

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА для начинающих



С. Н. ТИХОНОВ

ЭЛЕКТРО-  
ТЕХНИКА  
для начинающих

С. Н. ТИХОНОВ

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ

Ордена Трудового Красного Знамени  
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР  
МОСКВА — 1969

**Тихонов С. Н.**

**Т46**      **Электротехника для начинающих. М., Воениздат, 1969.**

352 с. 100 000 экз. 92 к.

В книге, написанной в плане пособия для начинающих изучать электротехнику, в доступной форме излагаются основные законы электротехники, рассматриваются физические процессы, протекающие в электрических цепях, принципы работы источников электрической энергии и измерительных приборов.

После каждой главы даны краткие выводы, облегчающие читателю повторение изученной темы, а также вопросы для самоконтроля и упражнения, выполнение которых необходимо для более твердого усвоения изложенного материала. В конце книги помещены обозначения элементов электрических схем, некоторые сведения из математики, ответы на вопросы для самоконтроля и упражнения, алфавитный указатель.

Книга рассчитана на лиц, приступающих к изучению основ электротехники.

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника занимается изучением электрических и электромагнитных явлений и проблемами использования их для нужд человека.

Начало развития электротехники относится ко второй половине XVIII — первой половине XIX веков.

Современное учение об электрических и магнитных явлениях есть результат длительного и упорного труда многих поколений ученых разных стран и народов. Большой вклад в него внесли и наши отечественные ученые.

Изучению электрических явлений в нашей стране положил начало отец русской науки Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). Он занимался исследованиями не только в области электричества, но и в других отраслях науки. В частности, много ценного внес в физику, химию, астрономию, географию.

Академик Василий Владимирович Петров (1761—1834) первый в мире открыл электрическую дугу и предсказал возможность ее использования для освещения, сварки и других целей.

Большая заслуга в развитии теоретической и практической электротехники принадлежит русскому академику Эмилию Христиановичу Ленцу (1804—1865), открывшему два важных закона электротехники. Первый закон («правило Ленца») устанавливает связь между электрическими и магнитными явлениями, второй — зависимость между количеством тепла, выделяемого током в проводнике, и величиной этого тока.

Плодотворной была работа в области электротехники профессора Московского университета Александра Григорьевича Столетова (1839—1896). Он открыл явление фотоэффекта и построил прибор, послуживший прообразом современного фотоэлемента.

Русский ученый Павел Николаевич Яблочков (1847—1894), используя дугу Петрова, первый дал миру электрический свет — «свечу Яблочкова». Он же сконструировал и практически использовал трансформаторы, которые сейчас широко применяются.

В 1873 г. замечательный изобретатель Александр Николаевич Лодыгин (1847—1923) создал электрическую лампу накаливания с угольной нитью. Огромной заслугой А. Н. Лодыгина было то, что он первый вынес лампу накаливания из физического кабинета на улицу.

Почти одновременно с П. Н. Яблочковым оригинальную конструкцию трансформатора предложил русский физик-самоучка Иван Филиппович Усагин (1855—1919). Демонстрация транс-

форматоров Усагина на промышленной выставке в Москве в 1882 г. вызвала восхищение зрителей.

К числу знаменитых русских электротехников принадлежит Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862—1919). Он творец первого трехфазного генератора, первого трехфазного двигателя, первого трехфазного трансформатора.

С особой гордостью мы называем имя Александра Степановича Попова (1859—1906). Ему принадлежит честь величайшего изобретения современности — радио.

Можно назвать еще много русских электротехников XIX века, которые внесли большой вклад в развитие отечественной науки. К ним относятся А. Т. Болотов (впервые применил электричество в агротехнике), Ф. А. Пироцкий (практически осуществил передачу электрической энергии на расстояние), Д. А. Лачинов (дал основы расчета электропередач), В. Н. Чиколев (изобрел дифференциальный регулятор к дуговой лампе), Н. Г. Славянов (положил начало промышленной электротермии), Н. А. Умов (написал ряд научных трудов, которые способствовали развитию учения об электромагнитных явлениях), П. Н. Лебедев (экспериментально доказал явление давления света, что окончательно подтвердило его электромагнитную природу) и многие другие.

После Великой Октябрьской социалистической революции развитие электротехники в нашей стране пошло ускоренными темпами. Электричество широко используется для облегчения труда человека.

С первых лет существования Советской власти Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют большое внимание электрификации нашей Родины.

В 1920 г. по инициативе Владимира Ильича Ленина была создана Государственная комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО). План ГОЭЛРО В. И. Ленин назвал второй программой партии. В том же году Владимир Ильич провозгласил знаменитый лозунг: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

План ГОЭЛРО предусматривал реконструкцию старых и строительство 30 новых электростанций. К 1935 г. мощность электростанций СССР превысила запланированную в 2,6 раза. В 1940 г. в нашей стране производилось в 25 раз больше электроэнергии, чем в 1913 г., а в 1966 г. — почти в 11,5 раза больше, чем в 1940 г.

Директивы XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. предусматривают довести выработку электроэнергии в 1970 г. до 830—850 млрд. киловатт-часов, что примерно в 18 раз превосходит уровень 1940 г.

Электричество прочно вошло в народное хозяйство, в наш быт,



Электротехника — это одна из отраслей науки, которая занимается изучением и использованием электрической энергии.

**Энергия** — способность тела производить работу. Существуют различные виды энергии. Так, в нефти, угле, древесине имеется химическая энергия; водопады, реки, ветер обладают запасами механической энергии и т. д. Очень часто эти виды энергии преобразуются в электрическую, а последняя, как наиболее удобная, используется для самых разнообразных целей, начиная с освещения и кончая производством трудоемких работ. Энергия — одно из основных свойств материи.

Различают два состояния энергии: **потенциальную**, когда тело может производить работу, но остается в покое и не обнаруживает своей энергии, и **кинетическую**, когда тело находится в движении и проявляет свою энергию.

**Электричество** — это вид энергии, используемый в промышленности и быту.

Слово «электричество» происходит от греческого слова «электрон», что означает янтарь.

Еще в древности, более двух с половиной тысяч лет назад, греческие ремесленники столкнулись с электрическими свойствами янтаря. Обтачивая и полируя украшения из янтаря, они заметили, что их изделия начинают притягивать к себе волоски шерсти, кусочки ниток, соломинки.

Позже было обнаружено, что свойством притягивать к себе предметы (оно получило название электризации) обладает не только янтарь, но и эбонит, стекло, алмаз, сера, сургуч и другие вещества.

Чтобы понять природу электризации и многих других электрических явлений, разберем коротко строение вещества.

## 1. Строение вещества

Все, что существует вокруг нас — земля, предметы на ней, растительный и животный мир, вода и воздух, — все без исключения состоит из мельчайших частиц, называемых **молекулами**.

**Молекула** — это мельчайшая частица вещества, которую можно отделить от него, и она будет обладать всеми свойствами данного вещества.

Чтобы судить о размерах молекул, достаточно представить, что для образования цепочки в 2—3 сантиметра потребуется не менее ста миллионов молекул, уложенных вплотную в один ряд.

Молекулы находятся в постоянном движении. В газах они свободно движутся по всем направлениям, сталкиваясь одна с другой. Молекулы газа всегда занимают весь объем сосуда. Поэтому нельзя набрать половину бутылки воздуха.

В жидкостях молекулы также движутся беспорядочно, но особые молекулярные силы удерживают их гораздо ближе между собой, чем в газах. В твердых телах молекулы совершают лишь небольшие колебательные движения, оставаясь на своих местах. Молекулярные силы прочно удерживают одну молекулу около другой. Поэтому твердые тела сохраняют форму.

Однако при нагревании твердого тела скорость движения молекул возрастает, размах их колебаний становится все больше и больше, наконец, молекулярные силы уже не в состоянии удержать молекулы, они начинают перемещаться; порядок расположения их нарушается, и твердое тело превращается в жидкость.

Увеличением скорости движения молекул при нагревании объясняется и превращение жидкости в газ.

Молекулы состоят из атомов.

**Атом** — это мельчайшая частица вещества, обладающая всеми свойствами этого вещества. Возьмем для примера воду. Ее молекула будет наименьшей частичкой, имеющей свойства воды. Если мы начнем делить эту частичку, то она потеряет свойства воды и распадется на два атома водорода и один атом кислорода. Молекула серной кислоты при делении распадается на два атома водорода, один атом серы и четыре атома кислорода (рис. 1).

Молекулы различных тел различаются числом входящих в них атомов и видом (сортом) этих атомов.

Нет ничего общего между водой и серной кислотой, за исключением того, что и та и другая — жидкости. Различные свойства воды и серной кислоты обусловлены неодинаковым составом их молекул.

Размеры атомов очень малы. Диаметр атома водорода приблизительно равен одной стомиллионной части сантиметра. Такую величину трудно себе представить. Диаметр других атомов всего в несколько раз больше диаметра атома водорода. Атом меньше маленького детского мячика примерно во столько же раз, во сколько раз этот мячик меньше земного шара. Даже сверхсовершенные современные микроскопы не в состоянии помочь человеку рассмотреть атом.

Когда простые вещества входят в состав сложного, то они теряют свои характерные химические свойства. Принято говорить, что вода состоит из химических элементов водорода и кислорода.

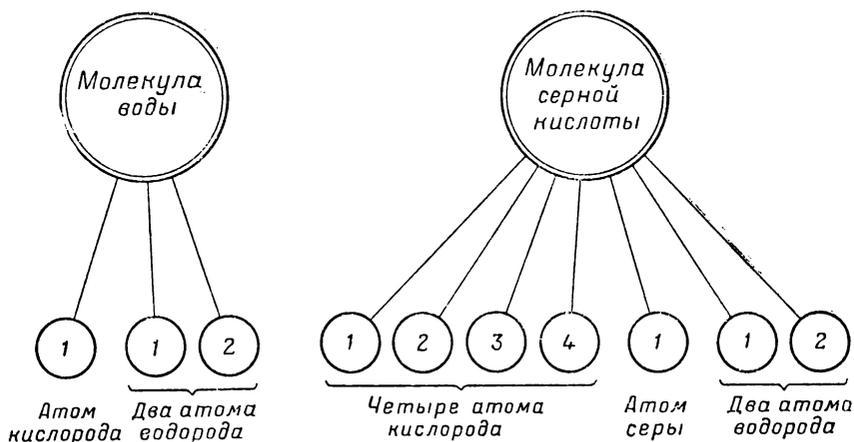


Рис. 1. Состав молекулы воды и серной кислоты

Таким образом, молекула любого вещества состоит из атомов химических элементов.

#### Химический элемент

Под химическим элементом следует понимать простое вещество, которое состоит из совершенно одинаковых атомов<sup>1</sup>. Химические элементы существуют в природе в чистом виде, и их можно получить при химическом разложении сложного вещества. Дальнейшему разложению (при химической реакции) на составные частицы химический элемент не поддается. Различные химические реакции сводятся к тому, чтобы соединить или разъединить атомы разных химических элементов.

Основой всех веществ являются атомы химических элементов. Атомы можно сравнить со строительным материалом для домов. Из нескольких видов строительных материалов — кирпичей, железных балок, досок и т. д. — можно построить самые разнообразные дома. Точно так же из атомов различных химических элементов созданы все окружающие нас тела.

К 50-м годам прошлого столетия было известно свыше 50 химических элементов. Постепенно ученые открывали новые элементы. До открытия этих элементов никто не знал и не мог предсказать их свойств. Связаны ли эти элементы между собой? Если связаны, то где тот закон, которому под-

<sup>1</sup> В природе существуют простые вещества, состоящие из одного и того же сорта атомов, но резко различающиеся по своим свойствам. Например, водород, дейтерий и тритий — простые вещества, но водород представляет собой химический элемент, а дейтерий и тритий — его изотопы (см. ниже понятие об изотопах).

чиняются атомы? Ответ на этот вопрос дал великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907), открывший так называемый периодический закон химических элементов. Он разместил все известные тогда химические элементы в порядке возрастания их атомных весов (атомный вес — это отвлеченное число, показывающее, во сколько раз вес атома данного химического элемента больше  $\frac{1}{12}$  части веса атома углерода). Таким образом, все химические элементы оказались определенным образом связанными между собой, а их свойства — периодически повторяющимися. Периодический закон — один из важнейших законов естествознания.

На основании периодического закона Д. И. Менделеев предсказал существование новых, еще не открытых химических элементов и описал их свойства. Научные предсказания великого русского ученого полностью подтвердились, когда эти химические элементы были найдены.

Количество химических элементов (не считая искусственно созданных), существующих на земле, невелико — немногим больше ста, но соединения одинаковых или различных элементов в молекулы бесчисленны.

Каждый химический элемент имеет свой условный знак, состоящий из начальной или из начальной и последующей букв его латинского названия. Например, кислород обозначается буквой O, железо — Fe, водород — H, сера — S и т. д.

Это обозначение очень удобно. Молекула воды, состоящая из двух атомов водорода и одного атома кислорода, запишется  $H_2O$ ; молекула серной кислоты —  $H_2SO_4$  (два атома водорода, один атом серы и четыре атома кислорода).

**Электрон** Атом — слово греческое и по-русски означает «неделимый», «неразрезаемый». Такое название объясняется тем, что до конца XIX века атом считали простейшей и неделимой частицей. Однако затем выяснилось, что атом — тоже сложная частица, состоящая из более простых и причем электрически заряженных частиц. Сначала был открыт **электрон**, имеющий минимальный (элементарный) отрицательный заряд. Позже были обнаружены другие элементарные частицы атома. Оказалось, что атом состоит из ядра и **вращающихся вокруг него электронов**.

**Атомное ядро** Ядро атома тоже сложная частица, состоящая из **протонов** — носителей положительного электричества и **нейтронов** — электрически не заряженных частиц. Положительный заряд ядра равен суммарному заряду входящих в него протонов. Масса ядра атома равна суммарной массе всех нейтронов и протонов этого ядра. Протоны и нейтроны, входящие в атомное ядро, имеют общее название — **нуклоны**.

Порядковый номер элемента в таблице Менделеева равен суммарному числу электронов во всех оболочках атома этого элемента и соответствует суммарному числу протонов в ядре.

В ядерной физике химический элемент обозначается числом протонов (внизу) и общим числом нуклонов (вверху) в ядре атома, например:  ${}_2He^4$ ,  ${}_8O^{16}$ ,  ${}_{92}U^{238}$ . Так, в ядре урана, состоя-

шем из 92 протонов, 238 нуклонов. Для определения числа нейтронов необходимо из числа нуклонов вычесть число протонов. Значит, в ядре атома урана  $238 - 92 = 146$  нейтронов.

### Изотопы

Количеством протонов в ядрах определяются химические свойства элементов. При изменении числа протонов в ядре атом данного элемента преобразуется в атом другого элемента с другими химическими и физическими свойствами.

Атомы, имеющие в ядре одинаковое количество протонов, но различное количество нейтронов (а следовательно, и нуклонов), называются **изотопами**. Изотопы элемента имеют одинаковые химические свойства, но несколько различаются по физическим свойствам.

Наибольшее применение получили изотопы урана и водорода.

Химический элемент уран  ${}_{92}\text{U}^{238}$  имеет два изотопа. В небольшом количестве существует изотоп  ${}_{92}\text{U}^{235}$ , в ядре атома которого 143 нейтрона. Этот изотоп служит исходным материалом для получения атомных бомб. Содержание изотопа  ${}_{92}\text{U}^{233}$  в природном уране ничтожно.

Изотоп водорода дейтерий  ${}_{1}\text{D}^2$  (или  ${}_{1}\text{H}^2$ ) имеет в ядре атома один протон и один нейтрон. Этот изотоп входит в состав так называемой тяжелой воды, которая в небольшом количестве содержится в обычной воде. Изотоп водорода тритий  ${}_{1}\text{T}^3$  (или  ${}_{1}\text{H}^3$ ) имеет в ядре атома один протон и два нейтрона. При синтезе (слиянии) ядер дейтерия и трития выделяется огромное количество энергии. Эта реакция, называемая термоядерной, используется в водородных бомбах.

### Строение атома

Проще всего по своему строению атом водорода: он состоит из одного протона в ядре и одного электрона (рис. 2, а).

Атом гелия имеет более сложное строение: вокруг ядра вращаются два электрона (рис. 2, б).

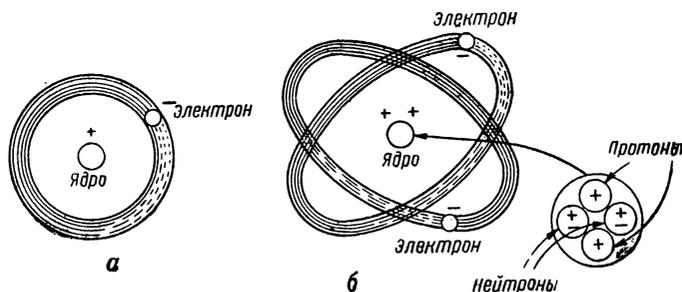


Рис. 2. Строение простых атомов:  
а — водорода; б — гелия

Рассмотрим строение атомов углерода и меди (рис. 3). Атом углерода состоит из шести протонов (т. е. положительно заряженных частиц, сосредоточенных в ядре) и шести электронов (рис. 3, а). Электроны расположены на двух орбитах (оболочках). Первая из них (считая от ядра) имеет два электрона, которые являются устойчивыми. Такую орбиту принято называть заполненной. Вторая орбита (внешняя) имеет четыре электрона — до восьми электронов не хватает четырех, следовательно, эта орбита незаполненная.

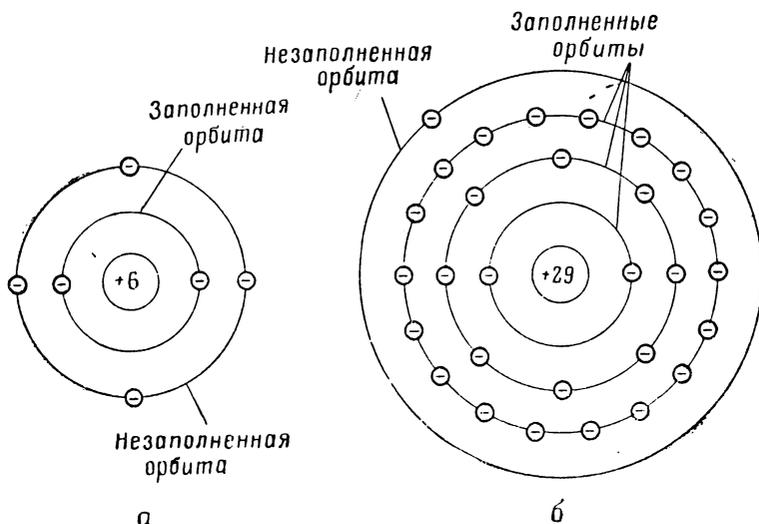


Рис. 3. Строение более сложных атомов:

а — углерода (с шестью протонами в ядре и шестью электронами на орбитах); б — меди (с 29 протонами в ядре и 29 электронами на орбитах)

Атом меди состоит из 29 протонов в ядре и 29 электронов на четырех орбитах. На первой орбите 2 электрона, на второй — 8, на третьей — 18; эти орбиты заполненные. Внешняя (четвертая) орбита незаполненная, так как она имеет один электрон.

Электроны вращаются вокруг ядра подобно вращению планет вокруг Солнца.

Электрическая сила притягивает электрон к ядру, а механическая (центробежная) сила вращения отталкивает его. Эти силы уравновешиваются, получается устойчивая структура атома.

Вещество молекулы занимает лишь небольшую часть ее объема. Расстояние между атомами примерно в десять раз больше их диаметра. Почему же вещество не распадается? Потому что между атомами существует сильная связь (так называемое сцепление), которая и держит их вместе.

В том, что между атомами имеется пространство, легко убедиться. Бросим металлический шарик на каменный пол. Шарик отскочит. Это происходит вследствие «пружинящего действия» пространства между атомами.

Имеется определенное число комбинаций электронов и протонов. Каждая стабильная их комбинация создает один определенный тип атома. Таким образом, каждый химический элемент имеет свои свойства в зависимости от числа и расположения электронов, т. е. в зависимости от строения атома.

## 2. Понятие об энергии атомного ядра

При расщеплении атомных ядер (например, при делении атома изотопа урана  $^{235}$  на две части) выделяется громадное количество внутриатомной энергии.

Весы всех атомов известны. Например, атом водорода весит приблизительно  $2 \cdot 10^{-24}$  г. Поскольку это ничтожно малый вес, условно принято пользоваться так называемым атомным весом элементов, когда вес атома водорода принимается за единицу. Тогда атомный вес гелия будет равен 4, кислорода — 16, урана — 238 и т. д. Эти числа показывают, во сколько раз атомы указанных элементов тяжелее атома водорода. Вес электрона равен  $1/1838$  веса атома водорода<sup>1</sup>.

Итак, все атомы состоят из разнообразного сочетания одних и тех же трех частиц: протонов (вес 1, электрический заряд +1), нейтронов (вес 1, заряд 0) и электронов (вес  $1/1838$ , заряд — 1).

Так как электроны значительно легче протонов и нейтронов, то можно считать, что вес атома практически совпадает с весом его ядра и равен общему числу протонов и нейтронов в ядре.

Важной характеристикой химического элемента является атомный номер, который указывает место элемента в периодической системе Менделеева. Атомный номер равен числу протонов в ядре.

Поскольку в состав ядра входят одноименно заряженные протоны, то, казалось бы, оно должно разлететься на составные части (протоны и нейтроны)<sup>2</sup>. Тем не менее ядра атомов очень устойчивы. Оказывается, между частицами, входящими в состав ядра, действуют особые ядерные силы сцепления. Они значительно больше электрических сил отталкивания. Ядерные силы заметно уменьшаются при увеличении расстояния между частицами и действуют только в самом ядре и в непосредственной близости от него.

Когда атомы соединяются, образуя молекулу, происходит изменение движения тех электронов, которые наиболее удалены от ядра; последнее же в химической реакции не участвует совершенно. Поэтому источниками энергии, которая выделяется при соединении атомов (при горении, обычном взрыве и т. д.), являются только электроны. Энергия почти невесомых электронов очень мала, а основная громадная энергия, скрытая в атоме, —

---

<sup>1</sup> Первые вычисления атомных весов были сделаны английским химиком Д. Дальтоном. Он относил атомные веса химических элементов к атомному весу водорода, приняв последний за единицу. Водородная единица удерживалась в химии почти столетие. Позднее химики отказались от нее и приняли кислородную единицу, равную  $1/16$  массы атома кислорода. Кислородная единица была общепринятой с 1906 по 1961 г. С 1961 г. принята углеродная единица, равная  $1/12$  массы атома углерода. Она оказалась более удобной.

<sup>2</sup> Ниже мы узнаем, что одноименные заряды отталкиваются.

энергия сил сцепления частиц ядра — остается неиспользованной. Так, ядерная энергия, имеющаяся в 1 кг гелия, соответствует электрической энергии, достаточной для того, чтобы лампочка в 100 вт горела 28 миллионов лет.

Энергию ядра можно «освободить» путем его «обстрела» какими-либо частицами, способными нарушить связь между протонами и нейтронами. Большую роль в изучении атомного ядра, в нахождении таких «пуль», которыми можно было бы «обстреливать» ядро, сыграло открытие радиоактивности. Оказалось, что в природе атомные ядра самых тяжелых элементов (урана, тория, радия и др.) без всякого внешнего воздействия распадаются, превращаясь в другие ядра с выделением при этом энергии.

Ядро урана, имеющее заряд 92 и атомный вес 238, может «выбросить» из себя ядро элемента гелия (заряд 2, атомный вес 4). Оставшееся ядро с зарядом 90 и атомным весом 234 представляет собой ядро атома элемента тория. В этом и заключается явление радиоактивного распада.

Процесс приведенного превращения можно записать так: (уран)  ${}_{92}^{238}$  → (торий)  ${}_{90}^{234}$  + (гелий)  ${}_{2}^{4}$ .

Ядра гелия, получающиеся в результате распада ядер урана, радия и некоторых других элементов, получили название **альфа-частиц**<sup>1</sup>; скорость их движения приблизительно равна 20 000 км/сек. Распад ядер, сопровождающийся вылетом таких частиц, называется **альфа-распадом**.

Кроме того, существует **бета-распад**<sup>2</sup>, в результате которого получаются не ядра гелия, а так называемые быстрые электроны. Например, ядра тория, получающиеся при альфа-распаде урана, выбрасывают быстрые электроны, превращаясь при этом в ядра элемента протактиния: (торий)  ${}_{90}^{234}$  → (протактиний)  ${}_{91}^{234}$  + электрон.

Ядро протактиния, получающееся при бета-распаде тория, в свою очередь распадается, выбрасывая опять бета-частицу, т. е. быстрый электрон, и превращаясь снова в ядро урана: (протактиний)  ${}_{91}^{234}$  → (уран)  ${}_{92}^{234}$  + электрон.

Уран, который образуется при этом, имеет свой заряд 92, но вес его равен теперь 234 вместо первоначального веса ядра урана 238.

Химические свойства атома полностью определяются числом электронов. А так как их суммарный заряд равен заряду ядра, то заряд ядра является решающим фактором, определяющим свойства тех или иных тел. Вес ядра при этом никакого значения не имеет. Поэтому наличие двух изотопов ядер элемента урана при одном и том же заряде 92 долгое время оставалось незамеченным. Разделить химическим путем такие ядра невозможно.

Изучение радиоактивности помогло обнаружить многие химические элементы, ядра которых имеют один и тот же заряд, но разный атомный вес (т. е. неодинаковое число нейтронов). Такие химические элементы, как мы знаем, называются изотопами.

Изотопов в природе встречается много. Торий, который образуется при альфа-распаде урана, как нам известно, имеет атомный вес 234. В природе встречается преимущественно торий с атомным весом 232.

Выше уже указывалось, что уран, как и некоторые другие вещества, распадается в природе без участия человека. Однако процесс этот происходит очень медленно. Например, для того чтобы кусок урана уменьшился вдвое, необходимо 4,5 миллиарда лет. Поэтому с момента образования земли

<sup>1</sup> Вначале не знали, что за частицы выбрасываются ураном и радием, и поэтому назвали их первой буквой греческого алфавита  $\alpha$  — «альфа».

<sup>2</sup> «Бета»  $\beta$  — название второй буквы греческого алфавита; происхождение этого названия такое же, как и альфа-частиц.

весь уран не успел распасться даже на одну четверть. Распад радия происходит значительно быстрее, и для уменьшения его количества вдвое нужно всего лишь 1590 лет. Радий, который был на земле при ее образовании, давно уже распался, а имеющийся в настоящее время является продуктом распада урана.

Радиоактивность — ядерное явление, так как при ней происходит превращение атомных ядер. Никакими внешними воздействиями (сильным нагреванием, изменением давления в широких пределах и т. д.) не удается повлиять на ход радиоактивного распада. Однако мчащимися с огромной скоростью ядрами гелия (альфа-частицами) можно воздействовать на атомное ядро. При «обстреле» альфа-частица, подобно пуле, влетает в ядро и остается в нем или разрушает его.

Первое искусственное расщепление ядра было получено при «обстреливании» обычного азота быстрыми альфа-частицами (ядрами гелия). Но оказалось, что управлять такими частицами (например, изменять их скорость) невозможно. Это заставило прибегнуть к искусственному разгону частиц (протонов, ядер гелия и др.) в электрическом поле, созданном очень высоким напряжением. Так, для искусственного разгона ядра гелия до скорости альфа-частиц (20 000 км/сек), выпускаемых радиоактивными элементами, необходимо напряжение около 4 миллионов вольт. Сложность работы с очень высоким напряжением и трудность получения его привели к созданию так называемых ускорителей, в которых сравнительно небольшие напряжения, подаваемые по пути движения частицы, во много раз увеличивают ее скорость.

После получения искусственных потоков быстрых заряженных частиц были «обстреляны» протонами и альфа-частицами все элементы. Количество обнаруженных ядерных превращений сильно возросло.

Рассмотрим механизм ядерных превращений. Попадающая в ядро частица (протон, нейтрон, альфа-частица, дейтон<sup>1</sup>) повышает его энергию. Новое ядро обладает избытком энергии и находится как бы в возбужденном состоянии. Эта энергия может сосредоточиться на одном из протонов или на нейтроне, и тогда они вылетят из ядра. Иногда из ядра вылетает альфа-частица.

Выше мы говорили, что существует другой тип ядерных превращений, а именно бета-распад, при котором ядро выбрасывает электроны. Но откуда берутся электроны, если их нет в ядре? Современная физика это объясняет тем, что в некоторых условиях нейтрон, который имеется в ядре, может превращаться в протон и электрон, причем последний немедленно излучается. В большинстве ядер атомов различных веществ такого превращения нейтрона не происходит вследствие влияния соседних протонов и нейтронов.

Для того чтобы разбить ядро на протоны и нейтроны, необходимо совершить работу. Наоборот, при соединении этих частиц выделяется энергия, равная той, которую нужно затратить для расщепления ядра. Эта энергия называется **энергией связи**. Для дейтона она равна 2 миллионам вольт, для альфа-частицы — 28 миллионам вольт, для ядра лития (с атомным весом 7) — 39 миллионам вольт<sup>2</sup>.

Энергию связи определяют несколькими способами. Наиболее распространен способ, основанный на законе взаимосвязи **массы и энергии**.

Раньше считали, что существуют два различных закона: закон сохранения массы и закон сохранения и превращения энергии. Из первого закона вытекает, что масса данного вещества или нескольких веществ остается неизменной при химических реакциях, при нагревании или охлаждении и т. д. В этом случае вместо массы можно говорить о весе, так как они пропорциональны. Из второго закона следует, что энергия не появляется и не исчезает, а лишь переходит из одной формы в другую.

<sup>1</sup> Ядро тяжелого водорода (атомный вес 2, заряд 1).

<sup>2</sup> Под энергией, например, в 2 миллиона вольт следует понимать энергию, которую получает протон, ускоренный напряжением в 2 миллиона вольт. Строго говоря, энергия связи выражается в электрон-вольтах.

На самом деле оба эти закона взаимосвязаны, потому что масса и энергия взаимосвязаны. Если сообщить телу энергию, то его масса и вес возрастут. Если отнять энергию, то масса и вес тела уменьшатся. Однако даже большое изменение энергии приводит к ничтожному изменению массы, так как масса равна энергии, деленной на огромную величину — скорость света в квадрате:

$$\text{масса} = \frac{\text{энергия}}{(\text{скорость света})^2}$$

При обычных химических реакциях и физических процессах масса и энергия тела практически остаются неизменными.

В атомном ядре происходят огромные изменения энергии, поэтому и изменение массы становится заметным. При соединении протонов и нейтронов в ядро выделяется энергия связи, поэтому масса или вес ядра должны быть меньше суммы масс всех входящих в его состав протонов и нейтронов. Следовательно, если определить с большой точностью вес (массу) атомного ядра, то будет известна его энергия связи, или, как ее обычно называют, **атомная энергия**. Современная наука определяет вес ядра с большой точностью. Когда говорят, что вес урана 238, подразумевают, что это целое число, наиболее близкое к истинному весу ядра урана, который выражается дробным числом.

Каковы запасы атомной энергии? На первый взгляд может показаться, что никаких запасов нет, так как нет в природе свободных нейтронов. Они всегда входят в состав атомных ядер, и, казалось бы, получить энергию, выделяющуюся при соединении протонов и нейтронов, нельзя. Кроме того, чтобы разбить ядро на протоны и нейтроны, нужно затратить энергию. Однако запасы ядерной энергии есть и очень большие. Поясним это конкретным примером.

Если ядро (лития)  $\frac{7}{3}$  захватывает протон, то оно превращается в ядро бериллия, которое распадается на две альфа-частицы (ядра гелия). При этом выделяется энергия, равная 17 миллионам вольт. Откуда берется эта энергия?

Предположим, что мы разбили ядро (лития)  $\frac{7}{3}$  на протоны и нейтроны (3 протона и 4 нейтрона), затратив 39 миллионов вольт, т. е. энергию, равную энергии связи. Дадим теперь этим 3 протонам и 4 нейтронам вместе с «обстреливающим» протоном соединиться в два ядра гелия. Энергия связи двух ядер гелия равна 56 миллионам вольт. Так как на разрушение ядра лития была затрачена энергия 39 миллионов вольт, то при образовании двух ядер гелия должна выделиться энергия 17 миллионов вольт.

Силы, которые действуют в ядре, очень большие. Отсюда и энергия, выделяющаяся при ядерных превращениях, значительно больше той, которую можно получить при сгорании, скажем, угля или при каком-нибудь взрыве.

Если расщепить при помощи протонов все ядра, находящиеся в 1 г лития, то получится энергия, равная 56 миллионам больших калорий. Другими словами, 100—200 г лития или другого элемента выделяют столько же энергии, сколько выделит ее целый железнодорожный состав угля!

Чтобы лучше понять, какая энергия выделяется при распаде ядер, рассмотрим один пример. Пусть процесс распада происходит со скоростью  $10^{19}$  делений в секунду (что вполне осуществимо). Тогда 1 г урана, в котором находится  $4 \cdot 10^{21}$  атомов, исчезнет примерно за 7 мин. Если такая скорость деления сохранится в течение года, то за это время израсходуется 70 кг урана. При этом выделится такая энергия, какую вырабатывает ДнепрогЭС в течение года.

Выдающимся достижением советской науки и техники является создание в нашей стране первой в мире промышленной атомной электростанции и строительство новых.

### 3. Проводники и изоляторы

#### Проводники

Распределение электронов на орбитах определяет электрические свойства материалов. Установлено, что, если на внешней орбите находится восемь электронов, орбита заполнена, атом стабилен, электроны очень крепко связаны со своим ядром. Незаполненную внешнюю орбиту электроны легко покидают.

Во многих веществах отдельные электроны, слабо связанные с ядром, легко покидают атом и образуют так называемые **свободные электроны**. Эти вещества называются **проводниками**, так как они хорошо проводят электрический ток.

Медь значительно лучше проводит электрический ток, чем уголь, поскольку ее атом имеет менее заполненную внешнюю орбиту. Один электрон на последней орбите в каждом атоме меди может легко передвигаться между атомами. Кроме того, у атома меди больше орбит и внешняя орбита дальше удалена от ядра, поэтому электрон, находящийся на последней орбите, слабее взаимодействует с ядром.

Движение свободных электронов в проводнике имеет беспорядочный характер. Двигаясь в пространстве между атомами в различных направлениях и с разными скоростями, они сталкиваются с атомами, часто выбивают из атомов новые свободные электроны, а их места занимают сами и т. д.

К проводникам относятся металлы, растворы солей, кислот и щелочей в воде, уголь и многие другие вещества. Из металлических проводников широко распространены медь, железо, алюминий и различные сплавы.

В таких веществах, как воздух, слюда, **Изоляторы** стекло, мрамор, фарфор, минеральные масла, каучук, резина, эбонит, парафин и пр., электроны очень крепко связаны со своими атомами. Эти вещества называются **изоляторами** или **диэлектриками**. Многие диэлектрики используются в качестве изолирующих материалов.

Кроме проводников и изоляторов, в природе существуют вещества, которые занимают промежуточное положение. Эти вещества называются **полупроводниками** электричества.

В полупроводниках очень мало свободных электронов, поэтому в обычном состоянии они плохо проводят электрический ток. Но при определенных посторонних воздействиях электроны, слабо связанные со своими атомами, могут покидать их, и полупроводники становятся проводниками. К полупроводникам относятся, например, селен, германий, теллур, многие окислы, карбиды, сульфиды. С каждым годом полупроводники все больше и больше применяются в электронике.

Деление веществ на проводники, полупроводники и изоляторы условно. В природе нет чистых проводников электричества, как и нет идеальных диэлектриков.

#### 4. Электрический заряд

Итак, электричество содержится во всех веществах в виде **электронов и протонов**. Обе частицы имеют одинаковое количество заряда, но противоположной полярности.

В зависимости от того, какие частицы оказываются в веществе в избытке — электроны или протоны, оно заряжается отрицательно или положительно.

**Взаимодействие зарядов**      **Разноименные (разных знаков) заряды притягиваются, одноименные отталкиваются.**

Французский физик Шарль Огюстен Кулон в конце XVIII века установил закон, согласно которому сила, с которой взаимодействуют два точечных заряда, прямо пропорциональна величинам зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль линии, соединяющей эти заряды. Этот закон выражается формулой

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — величины взаимодействующих точечных зарядов;

$r$  — расстояние между зарядами;

$k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения величин, входящих в формулу.

Точечными зарядами называются заряды, находящиеся на телах любой формы, размеры которых малы по сравнению с расстояниями их взаимодействия.

Ядра атомов всех элементов заряжены положительным электричеством, поэтому они взаимно отталкиваются. Силы отталкивания настолько велики, что даже при обычных взрывах, наблюдаемых в природе, ядра никогда не сближаются до соприкосновения.

Между электрическими зарядами атома существуют силы взаимодействия. С одной стороны, электроны, имеющие отрицательный заряд, отталкиваются один от другого, но, с другой стороны, между электронами и ядром действуют электрические силы притяжения. Эти силы взаимодействия у разных веществ различны.

Обычно атом химических элементов **электрически нейтрален**, т. е. общий отрицательный заряд, сосредоточенный в электронах, равен положительному заряду ядра. В этом случае

атом не проявляет никаких электрических свойств, он электрически как бы уравновешен, нейтрален.

Теперь легко объяснить явления, происходящие при натирании некоторых тел. Так, например, когда натирают стеклянную палочку кожей, то часть электронов с поверхности стекла как бы «стирается», т. е. электроны переходят на кожу. В этом случае на стекле образуется избыток положительных зарядов, а на коже — избыток отрицательных. Стекло заряжается положительно, а кожа — отрицательно.

Заряд является статическим электричеством, так как электроны и протоны находятся в состоянии покоя (нет направленного движения).

**Единицы  
электрического  
заряда**

За единицу измерения электрических зарядов, т. е. за единицу измерения количества запасенных в веществе электронов или протонов, в международной системе единиц СИ принят **кулон** ( $\kappa$ ).

Зачем потребовалось вводить особую единицу для измерения количества электричества? Почему нельзя было за эту единицу принять заряд электрона или протона? Да потому, что их заряд ничтожно мал. Исчислять количество электричества зарядами электрона — это все равно, что учитывать количество воды, необходимое Москве, числом капель.

В одном кулоне  $6,28 \cdot 10^{18}$  электронов ( $10^{18}$  получится, если миллион умножить на миллион и еще раз на миллион).

Таким образом,  $6,28 \cdot 10^{18}$  лишних электронов, запасенных в веществе, равны 1 кулону отрицательного заряда; то же самое число лишних протонов составляет 1 кулон положительного заряда.

Закон Кулона дает возможность установить единицу электрического заряда.

Пользуясь для измерения расстояния и силы единицами системы СГС и полагая  $r=1$  см,  $F=1$  дин,  $q_1=q_2=q$  и  $k=1$ , по формуле  $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{q^2}{r^2}$  находим, что при этих условиях  $q = \pm 1$  заряду.

За единицу электрического заряда принимают такой заряд, который действует в вакууме (пространстве, где нет воздуха) на равный ему заряд, находящийся на расстоянии одного сантиметра, с силой в одну дину.

Эту единицу заряда называют абсолютной электростатической единицей заряда (эл.-ст. ед. заряда).

Систему единиц для измерения электрических величин, в которой за единицу заряда принимается электростатическая единица (эл.-ст. ед.) заряда, называют абсолютной электростатической системой и обозначают СГСЭ.

1 кулон равен  $3 \cdot 10^9$  эл.-ст. ед. заряда, или

1  $\kappa = 3 \cdot 10^9$  ед. заряда СГСЭ.

## 5. Разность потенциалов

### Понятие о разности потенциалов

Любой электрический заряд может производить работу, которая выражается в притяжении или отталкивании другого заряда. Способность заряда производить работу зависит от потенциала, который он создает.

Предположим, что на правой пластине (рис. 4, а) имеется положительный заряд, равный  $3\kappa$ . Этот заряд создает определенную величину потенциала, что соответствует какой-то работе, которую может произвести этот заряд.

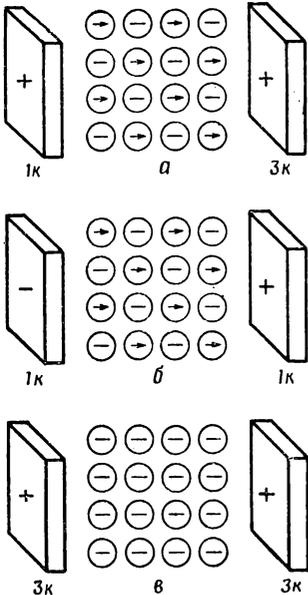


Рис. 4. Работа, затрачиваемая при движении электронов между зарядами, зависит от разности потенциалов:

а, б — разность потенциалов эквивалентна работе заряда  $2\kappa$ ; в — разность потенциалов равных одноименных зарядов равна нулю

Пусть работа выражается в перемещении электронов. Положительный заряд в  $3\kappa$  будет притягивать определенное число электронов. Другой положительный заряд, находящийся на левой пластине и равный  $1\kappa$ , также будет притягивать электроны, однако ввиду меньшей своей величины он сможет притянуть меньше электронов. Если, например, заряд в  $3\kappa$  притягивает 12 электронов, то заряд в  $1\kappa$  — только 4 электрона. В результате в направлении к правой пластине с зарядом в  $3\kappa$  будут перемещаться 8 электронов. Это число перемещающихся электронов эквивалентно работе, которая выполняется зарядом в  $2\kappa$  при отсутствии других зарядов. Поэтому число электронов, перемещающихся в направлении большего положительного заряда, зависит от разности потенциалов между двумя зарядами.

На рис. 4, б отрицательный заряд в  $1\kappa$  на левой пластине может произвести работу, отталкивая 4 электрона. Та же величина положительного заряда на правой пластине может притянуть 4 электрона. В результате 8 электронов перемещаются в направлении положительного заряда. Разность потенциалов здесь также эквивалентна работе заряда в  $2\kappa$ .

На рис. 4, в два заряда равны. Электроны, притягиваемые в направлении одного заряда, с такой же силой притягиваются в противоположном направлении к другому заряду. В результате электроны остаются на месте, поскольку нет разности

потенциалов между равными зарядами одной и той же полярности. В этом случае говорят, что **разность потенциалов равна нулю**.

«Почему река течет в море?» — спрашивал себя известный немецкий физик Ом. Потому, что уровень воды в ее верховьях выше, чем в море.

Чтобы лучше понять явления электрического тока, часто сравнивают его с другими явлениями природы, которые хорошо всем известны.

Для уяснения условий, при которых возникает электрический ток в цепи, рассмотрим условия, при которых будет течь вода по трубе, соединяющей два сосуда, наполненных водой (рис. 5). Если вода в сосудах находится на одном уровне, никакого движения воды по трубе не будет. Стоит только приподнять один сосуд, как вода сейчас же придет в движение. Таким образом, движение воды по трубе зависит от разности ее уровней в сосудах. Если эту разность уровней поддерживать при помощи насоса, то последний будет причиной движения воды в трубе, т. е. будет движущей силой.

Для возникновения электрического тока в цепи необходимо иметь разность электрических уровней на зажимах источника тока, т. е. избыток электронов на одном и недостаток их на другом. Эту разность электрических уровней, или, другими словами, **разность потенциалов на зажимах, поддерживает электродвижущая сила (э. д. с.) источника тока**.

Чтобы использовать электрические силы, которые имеются во всех материалах, предварительно нужно затратить определенную работу для разделения электронов от протонов. В основе разделения электронов от протонов, т. е. в создании разности потенциалов, лежит явление электризации. Обычно каждое тело электрически нейтрально: разноименные электричества находятся в нем в равных количествах, вследствие чего оно не проявляет себя заряженным положительно или отрицательно по отношению к какому-либо заряженному телу. Но стоит только нарушить количественное равновесие разноименного электричества в теле, как оно станет электрически заряженным. **Электризацией тела и называется процесс перехода его из электрически нейтрального состояния в электрически заряженное**, причем тем сильнее, чем больше заряд нескомпенсированного электричества.

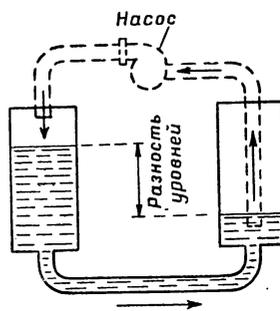


Рис. 5. Вода течет по трубе благодаря разности уровней в сосудах, создаваемой насосом

Положительное электричество сосредоточено в ядре, которое очень устойчиво. Поэтому электризация тела осуществляется путем количественного изменения отрицательного электричества. Практически это достигается при помощи источников тока, создающих электродвижущую силу.

Остановимся на явлении электризации тел более подробно.

Возьмем два металлических шарика — *А* и *Б* (рис. 6). Предположим, мы имеем возможность переносить свободные электроны с одного шарика на другой. При переносе первого электрона мы должны затратить какую-то энергию на преодо-

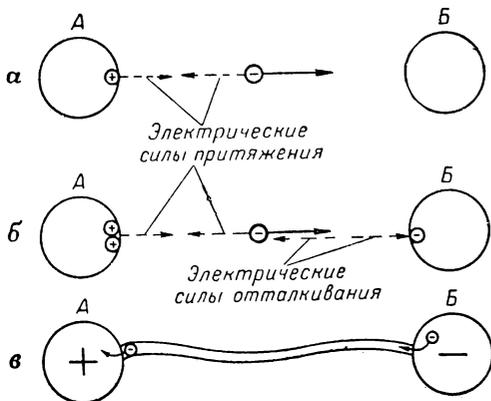


Рис. 6. Физическая сущность электризации тел

ление силы электрического притяжения между ним и положительным ионом — частицей, образовавшейся при потере электрона атомом (рис. 6, *а*). При переносе следующего электрона необходимо затратить большую энергию, так как нужно преодолеть силы электрического притяжения уже между двумя положительными ионами и электроном, а также силы электрического отталкивания между переносимым электроном и электроном, находящимся на шарике *Б* (рис. 6, *б*). Для переноса третьего электрона потребуется затратить еще больше энергии и т. д.

Таким образом, электризация тел сопровождается затратой какой-то энергии и возникновением электрических сил.

В результате электризации шарик *А* зарядился положительно, а шарик *Б* — отрицательно. Получилась разность потенциалов. Стоит только шарики *А* и *Б* соединить проводником, как свободные электроны из него займут место недостающих электронов на шарике *А* (рис. 6, *в*). Избыточные электроны с шарика *Б* перейдут в проводник. Произойдет мгновенное смещение электронов в проводнике, а шарики *А* и *Б* вновь станут электрически нейтральными.

Роль источника электрического тока состоит в том, что он все время электризует электроды (зажимы) и тем самым поддерживает непрерывное движение электронов в замкнутой цепи.

## 6. Ток в различных средах

**Электрический ток** Когда разность потенциалов между двумя зарядами заставляет перемещаться третий, то этот движущийся заряд и представляет собой электрический ток. Таким образом, разность потенциалов является необходимым условием для появления электрического тока.

### Ток в металлических проводниках

Как уже указывалось, во всяком металлическом проводнике имеется громадное количество беспорядочно движущихся электронов. Под действием внешних электрических сил (если они приложены к проводнику), т. е. под влиянием разности потенциалов, электроны движутся в одну сторону. Такое упорядоченное движение электронов в проводнике называется электрическим током.

Движение электронов в проводнике под действием электрических сил грубо можно сравнить с падением снега. Снежинки имеют направленное движение — они падают сверху вниз, но каждая снежинка проходит при этом сложный путь — совершает беспорядочное движение.

**Движение свободных электронов** Рассмотрим движение свободных электронов в проводнике (рис. 7). В среднем ряду каждый электрон пронумерован в соответствии с атомом проводника (меди), к которому электрон относится. В левой части проводника электрон обозначен буквой *M*, чтобы показать, что он пришел от минусового заряда источника, создающего разность потенциалов.

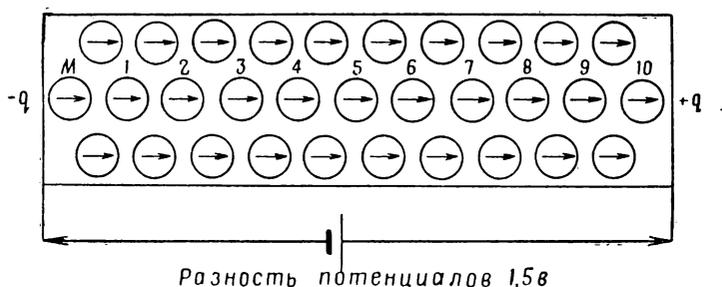


Рис. 7. Разность потенциалов на двух концах металлического проводника вызывает в нем движение свободных электронов, создавая электрический ток

Этот электрон отталкивается от минусового заряда  $-q$  и притягивается плюсовым  $+q$ . Следовательно, разность потенциалов источника заставляет электрон *M* двигаться к атому 1. Под

действием тех же сил свободный электрон атома 1 перемещается к атому 2 и т. д. Таким образом осуществляется движение свободных электронов от атома к атому. В конечном итоге свободный электрон 10 из проводника поступает к положительному заряду источника.

В точках, расположенных ближе к отрицательному заряду, имеется большая сила отталкивания свободных электронов и меньшая сила притяжения. В середине проводника на свободные электроны действуют равные силы отталкивания и притяжения. Ближе к положительному заряду силы притяжения больше сил отталкивания. **Общая сила, приводящая в движение свободные электроны, одна и та же в любой точке провода, поэтому в проводе протекает один и тот же ток.**

Скорость движения электронов в проводнике (около 0,5 мм/сек) не следует путать со скоростью электрического тока (300 000 км/сек), под которой понимается скорость передачи движения одних электронов другим (соседним).

Чтобы лучше это уяснить, рассмотрим такой пример.

Предположим, имеется труба длиной 10 м, сплошь заполненная шарами (внутренний диаметр трубы равен диаметру шара). Нажмем на крайний шар и передвинем его за одну секунду на 3 см, тогда за эту же секунду передвинется и последний шар на другом конце трубы тоже на 3 см. Скорость движения каждого шара в отдельности будет 3 см/сек. Скорость же передачи движения от одного шара к другому в данном случае будет 10 м/сек, так как в течение 1 сек пришли в движение все шары, находящиеся в десятиметровой трубе.

Телеграфный сигнал, переданный из Москвы в Ленинград, проходит 600 км за 1/500 сек. Чтобы пройти это расстояние по проводам, электрону потребовалось бы около 40 лет.

Число свободных электронов, участвующих в движении, зависит от величины приложенной разности потенциалов. **Чем больше разность потенциалов, тем большее число свободных электронов начинает участвовать в направленном движении,** поскольку силы притяжения и отталкивания возрастают. С увеличением числа движущихся с одной и той же скоростью электронов возрастает величина тока. При разности потенциала, равной нулю, тока в проводе не будет.

Свободные электроны перемещаются вдоль проводника только при включенном источнике, имеющем разность потенциалов. При отключении этого источника в проводнике восстанавливается первоначальное состояние; сколько электронов ушло из проводника к источнику, столько же их и возвратилось.

Когда провод не подключен к источнику тока, в нем тока нет. В проводе не будет тока и в том случае, когда два конца его имеют один и тот же потенциал. В этом случае разность потенциалов равна нулю. Пример нулевой разности потенциалов — подключение обоих концов провода к одному из зажимов

источника тока. Вот почему птица, сидящая на оголенном включенном электрическом проводе, остается живой: своими лапками она прикасается к одному зажиму источника тока.

Когда не было известно строение атома, предполагали, что электрический ток создается движением положительных зарядов от плюса источника тока по внешней цепи к его минусу. На самом же деле движение электронов происходит от минуса источника через внешнюю цепь к его плюсу (рис. 8).

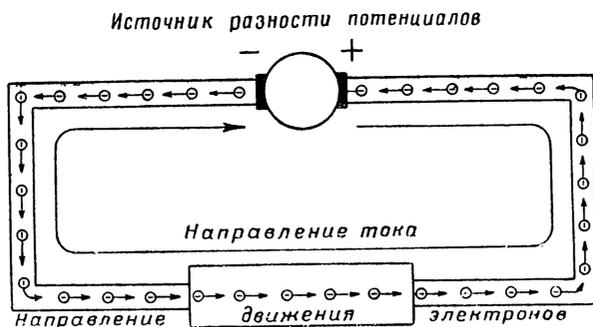


Рис. 8. Условное направление электрического тока не совпадает с направлением движения электронов

В настоящее время в нашей стране при рассмотрении цепи электрического тока считают по-старому, что ток протекает от плюса (+) источника через внешнюю цепь к его минусу (-). Такой условный выбор направления тока совершенно не влияет на физические процессы в цепи.

В зарубежной литературе часто за направление тока принимают истинное направление движения электронов.

### Ток в жидких проводниках

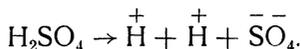
**Образование ионов** Не все жидкости могут служить проводниками электрического тока. Например, химически чистая (без всяких примесей) вода, так же как и химически чистая кислота, электрический ток не проводит, т. е. является изолятором. А вот растворы солей, кислот и щелочей в воде (или в других растворителях) являются проводниками. В них молекулы расщепляются на две части. Одна часть, где атом теряет один или несколько электронов, становится положительным ионом (ион по-гречески означает «идуший», «странствующий»), другая часть, где к атому присоединяется один или несколько электронов, становится отрицательным ионом. Следовательно, молекула перестает быть нейтральной — происходит ионизация жидкого проводника.

Ионизация объясняется ослаблением электрических сил сцепления между атомами молекул вещества, находящегося в растворе. Не все молекулы расщепляются. Число их различно для разных веществ и зависит от концентрации раствора (от количества растворенного вещества) и его температуры.

Разноименно заряженные ионы, сталкиваясь между собой, снова образуют нейтральные молекулы, но в то же время другие молекулы расщепляются. Этот процесс непрерывный.

Таким образом, в жидких проводниках ионы движутся беспорядочно, подобно тому как в металлических проводниках беспорядочно движутся свободные электроны.

Рассмотрим, как расщепляется молекула серной кислоты  $H_2SO_4$ . Она делится на два положительно заряженных иона водорода ( $H^+$ ), в которых недостает по одному электрону, и один отрицательно заряженный ион — так называемый кислотный остаток ( $SO_4^-$ ), в котором имеются два избыточных электрона. Записывается это так:



#### Движение ионов

Если в жидкий проводник опустить два металлических проводника (электроды) и соединить один из них с положительным, а другой — с отрицательным зажимами источника тока, то будет происходить следующее (рис. 9).

Отрицательные ионы начнут передвигаться к положительному электроду (соединенному с плюсом источника), а положительные — к отрицательному. Возникнет направленное движение ионов — ионный ток. Положительный ион, дойдя до отрицательного электрода (катода), получит от него недостающие электроны, после чего превратится в нейтральную молекулу, которая осядет на электроде. Отрицательный ион, дойдя до положительного электрода (анода), отдаст ему свои избыточные электроны, которые под действием источника направятся к отрицательному электроду, а сам ион превратится в нейтральную молекулу, которая останется в электролите (электролитами называются растворы солей, кислот или щелочей в воде).

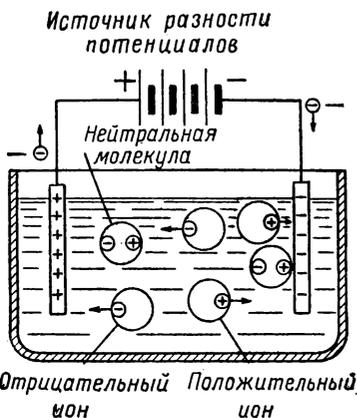


Рис. 9. Направленное движение ионов в электролите под действием разности потенциалов

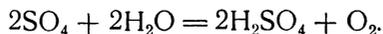
Следовательно, у катода положительно заряженные водо-

родные ионы ( $\text{H}_2^{++}$ ) превращаются в нейтральные молекулы водорода ( $\text{H}_2$ ), которые тонким слоем покрывают катод, а затем в виде газа водорода выделяются из электролита.

Сокращенно это можно записать так:



У анода кислотный остаток ( $\text{SO}_4^-$ ) превращается в электрически нейтральные частицы ( $\text{SO}_4$ ). В природе в свободном виде эти частицы не встречаются; они сразу вступают в химическую реакцию с водой, в результате которой образуется кислота и кислород:



Молекулы серной кислоты опять расщепляются в воде, а молекулы кислорода тонким слоем покрывают анод, после чего в виде газа выделяются из электролита, т. е. электрический ток фактически разлагает не серную кислоту, а воду.

Таким образом в цепи, состоящей из источника тока, металлического и жидкого проводников, **создается электрический ток.**

Положительный электрод называется **анодом**, отрицательный — **катодом**. Эти названия даны из предположения, что ток идет от плюса к минусу. Отсюда и ионы,двигающиеся к аноду, получили название анионов, а ионы,двигающиеся к катоду, — катионов.

**Сравнение токов** Обратим внимание на природу электрического тока в металлических и жидких проводниках. В металлических проводниках происходит движение только отрицательных зарядов (свободных электронов), в жидких же — как положительных, так и отрицательных (ионов), перемещающихся в противоположных направлениях.

Человек не может непосредственно наблюдать электрический ток. О наличии его можно судить по следующим внешним признакам:

— при прохождении электрического тока по проводникам они нагреваются;

— в жидких проводниках происходят химические процессы;

— ток создает магнитное поле, которое можно обнаружить по отклонению магнитной стрелки в определенном направлении.

### Ток в газах

Все газы, в том числе и воздух — диэлектрики, но при определенных условиях они становятся проводниками. В обычном состоянии молекулы газа нейтральны; значит, нет свободных зарядов, которые (при наличии разности потенциалов) при своем движении могли бы создать электрический ток.

## Ионизация газов

Однако под влиянием внешних причин (нагревание газа, прохождение через него ультрафиолетовых, рентгеновских или космических лучей, воздействие большой разности потенциалов, радиоактивного излучения и т. д.) может происходить ионизация газов. В них появляется большое количество свободных электронов и положительных ионов. В этих условиях при наличии разности потенциалов в газах возникает электрический ток. Положительные ионы движутся к отрицательному полюсу источника тока, а свободные электроны — к положительному.

Ионизация газа отличается от ионизации жидкого проводника. В газах происходит отделение электронов от молекулы, в то время как в жидких проводниках молекула распадается на две противоположно заряженные частицы.

Если устранить внешнюю причину, вызывающую ионизацию газа, последний перестанет быть проводником тока. В жидких проводниках этого нет, они всегда проводят электрический ток.

Примером прохождения электрического тока через газ может служить молния — электрический разряд атмосферного электричества через воздушный промежуток между облаком и землей или между облаками.

## Ток в полупроводниках

В технике в основном используются кристаллические полупроводники.

По внешнему виду и внутреннему строению все кристаллы одного и того же вещества подобны друг другу. Каждый из них состоит из симметрично, упорядоченно расположенных атомов, образующих так называемую **кристаллическую решетку**.

Междуатомная связь в кристаллическом веществе создается электронами внешней оболочки атомов.

Наиболее широкое применение из полупроводников нашли германий и кремний. Оба эти элемента находятся в четвертой группе периодической системы Менделеева.

На примере германия проследим механизм прохождения электрического тока в полупроводниках. Германий имеет четыре валентных (находящихся на внешней оболочке атома) электрона, которые способны принимать участие в химических реакциях и в процессе создания тока. Эти же электроны связывают между собой соседние атомы. Остальные 28 электронов атома прочно связаны с ядром.

Таким образом, каждый атом германия в кристалле оказывается связанным с четырьмя соседними атомами. Для связи с каждым из этих атомов участвуют по два электрона: один от данного и другой от соседнего атома (рис. 10). Такая связь

одноименных атомов обычно называется **электронной или валентной связью**, поскольку в ее образовании участвуют валентные электроны.

При нагревании, под действием света, радиоактивного излучения и других факторов электронные связи в полупроводнике нарушаются. Под влиянием внешних сил кинетическая энергия электронов увеличивается и многие из них разрывают свои связи с атомами. Освободившиеся электроны не могут войти ни в одну из заполненных связей кристалла и беспорядочно перемещаются по нему. Если к полупроводнику приложить электродвижущую силу, эти электроны создадут электрический ток. Проводимость полупроводника, вызванная движением свободных электронов, называется **электронной проводимостью**.

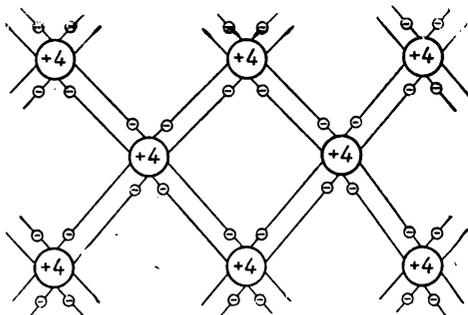


Рис. 10. Электронная связь в кристаллической решетке германия

Электронная связь, из которой вырван электрон, называется **дыркой**. Дырка обладает свойством положительного электрического заряда, равного по величине заряду электрона (в незаполненной связи недостает одного электрона). Образовавшуюся дырку может заполнить электрон из соседнего атома. При этом в соседней связи образуется новая дырка, которая в свою очередь может быть заполнена электроном другого атома. Происходит беспорядочное движение дырки по полупроводнику. Если к полупроводнику приложить электродвижущую силу, то дырки начнут упорядоченно двигаться в сторону, противоположную направлению движения электронов. Проводимость, обусловленная движением дырок, называется **дырочной**, а ток — **дырочным**.

Полупроводники, в которых основными носителями тока служат электроны, называются полупроводниками с электронной проводимостью или сокращенно полупроводниками ***n*-типа** (*n* — первая буква слова «negative», что означает «отрицательный»).

Полупроводники, в которых основными носителями тока служат дырки, называются полупроводниками с дырочной проводимостью или сокращенно полупроводниками ***p*-типа** (*p* — первая буква слова «positive», означающего «положительный»).

Любой полупроводник в зависимости от примесей можно сделать по желанию полупроводником *n*- или *p*-типа.

## 7. Ток. Электродвижущая сила. Сопротивление. Напряжение

Ток

**Величина тока** Количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в одну секунду, называется силой (величиной) тока или просто током.

Под количеством электричества следует понимать суммарный заряд электронов. Таким образом, сила тока зависит от числа электронов, проходящих по цепи в единицу времени. Чем больше пройдет их через поперечное сечение проводника за единицу времени, тем больше сила тока, и наоборот.

Сила тока при равномерном движении электрических зарядов определяется по формуле

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (1)$$

где  $I$  — сила тока в амперах ( $a$ );

$Q$  — количество электричества в кулонах ( $\kappa$ );

$t$  — время в секундах ( $сек$ ).

Эта формула получается непосредственно из определения силы тока. Если за время  $t$  прошло количество электричества  $Q$ , то для того, чтобы узнать силу тока, нужно  $Q$  разделить на  $t$ .

**Ампер** Чтобы судить о силе тока в той или иной цепи, его нужно измерить. За единицу силы тока принят ампер.

Если через поперечное сечение проводника в течение одной секунды проходит один кулон электричества, то это значит, что в цепи течет ток в один ампер. И наоборот, если по проводнику течет ток величиной в один ампер, то через поперечное сечение проводника в течение одной секунды проходит один кулон электричества:

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}.$$

Ампер обозначается буквой  $a$  или  $A$ , кулон —  $\kappa$  или  $C$ . Сокращенные обозначения единиц измерения очень удобны. Так, например, вместо того чтобы писать: ток в цепи равен трем амперам, сокращенно пишут:  $I=3 a$ . Поэтому сокращенные обозначения приняты во всех отраслях науки, в том числе и в электронике.

На практике очень часто приходится иметь дело с токами значительно меньше ампера. Для их измерения приняты следующие единицы:

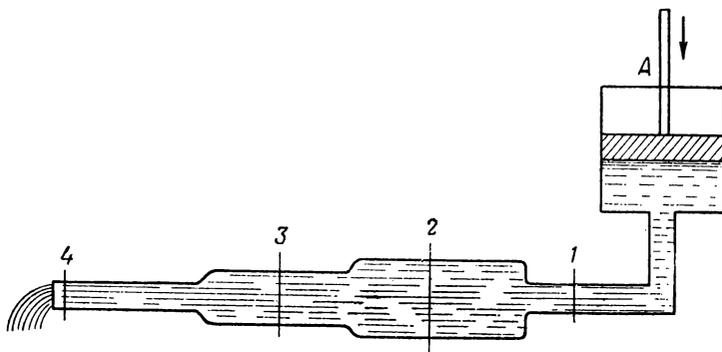
— миллиампер (тысячная часть ампера), обозначается  $мa$  или  $mA$ ;

— микроампер (миллионная часть ампера), обозначается *мкА* или  $\mu\text{A}$  ( $\mu$  — греческая буква «ми»).

Ток, протекающий в электрической цепи, измеряется прибором, который называется **амперметром**.

Электрический ток может протекать только по замкнутой цепи. Величина его в любом месте данной цепи одна и та же. Это справедливо даже в том случае, когда, например, сечения соединительных проводов различны (т. е. отдельные участки электрической цепи имеют разное сопротивление).

Аналогично обстоит дело с потоком воды в трубе. На рис. 11 изображена труба с различными поперечными сечениями. Нажмем на поршень *A*. Предположим, что за две секунды из



**Рис. 11.** Течение воды по трубе с различными поперечными сечениями

трубы вылились два литра воды. Очевидно, за это же время через поперечные сечения 1, 2, 3 и 4 прошло также два литра воды. Если бы через сечение 2 прошло больше воды (скажем, три литра), чем через сечение 3, то уже заполненное водой пространство между этими сечениями должно было бы вместить дополнительно один литр воды, а это невозможно.

**Пример 1.** Из раствора азотнокислого серебра выделено 5,59 г серебра. Определить, какое количество электричества прошло через раствор.

**Решение.** Один кулон электричества выделяет 1,118 мг (миллиграмм) серебра, а всего выделено 5,59 г или 5590 мг, тогда

$$Q = \frac{5590}{1,118} = 5000 \text{ к.}$$

**Пример 2.** Через поперечное сечение проводника за 1 ч прошло 900 к электричества. Определить ток.

**Решение.** Ток определяется по формуле (1):

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{900}{1 \cdot 3600} = 0,25 \text{ а} = 250 \text{ ма}$$

(число 3600 служит для перевода часа в секунды: 1 ч = 60 мин = 3600 сек).

**Пример 3.** В течение 2 мин по цепи проходил ток 0,5 а. Определить количество прошедшего электричества.

**Решение.** Из формулы (1)

$$Q = It = 0,5 \cdot 2 \cdot 60 = 60 \text{ к}$$

(на 60 умножаем для того, чтобы минуты превратить в секунды).

## Электродвижущая сила

### Источники электрической энергии

Для поддержания электрического тока в проводнике требуется внешний источник электрической энергии.

Источники электрической энергии обладают определенной электродвижущей силой, которая создает и длительное время поддерживает разность потенциалов на концах проводника.

Назначение источника электрической энергии состоит в том, чтобы придать направленное движение свободным электронам, которые имеются в проводнике, т. е. создать ток. Поэтому источники электрической энергии иногда называют источниками тока.

Источник электрической энергии производит определенную работу, перемещая электрические заряды по всей замкнутой цепи. Работа, совершаемая источником электрической энергии при переносе единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи, называется **электродвижущей силой источника**.

**Вольт** Электродвижущая сила (сокращенно э. д. с.) обозначается буквой *E*. За единицу измерения э. д. с. принят вольт. Сокращенно вольт обозначается *v* или латинской буквой *V*.

**Э. д. с. источника электрической энергии равна одному вольту, если при перемещении одного кулона электричества по всей замкнутой цепи источник электрической энергии совершает работу, равную одному джоулю:**

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}$$

На практике для измерения э. д. с. используются как более крупные, так и более мелкие единицы:

- киловольт (тысяча вольт), обозначается *кв* или *kV*;
- милливольт (тысячная часть вольта), обозначается *мв* или *mV*;
- микровольт (миллионная часть вольта), обозначается *мкв* или  $\mu V$ .

## Сопротивление

При прохождении тока по проводнику последний нагревается. Это означает, что источник электродвижущей силы при создании тока совершает работу, преодолевая какое-то препятствие.

Противодействие, оказываемое проводником прохождению электрического тока, называется **электрическим сопротивлением** или просто **сопротивлением проводника**.

Проводники имеют очень маленькое сопротивление, изоляторы — очень большое.

Если приложить одну и ту же разность потенциалов к медному и угольному проводникам (одной длины), то токи в них установятся разные. В медном проводнике ток будет больше, так как его сопротивление меньше. Чтобы получить одинаковые токи, к угольному проводнику нужно приложить большую разность потенциалов, т. е. затратить большую работу, а это вызовет больший нагрев.

**Ом** За единицу величины сопротивления принят ом. Сопротивление проводника равно одному ому, если при прохождении по нему тока в один ампер выделяется 0,24 калории<sup>1</sup> тепла. Обозначается сопротивление *ом* или  $\Omega$  (омега).

Большие сопротивления (резисторы<sup>2</sup>) измеряются в тысячах ом — килоомах (обозначаются *ком* или  $k\Omega$ ) и миллионах ом — мегомах (обозначаются *Мом* или  $M\Omega$ ).

### Зависимость сопротивления

Электроны, двигаясь по проводнику, сталкиваются с атомами и молекулами вещества, отдавая им часть своей энергии. Чем больше столкновений имеет электрон с атомами и молекулами, тем труднее ему двигаться, тем больше сопротивление проводника. В этом случаедвигающиеся электроны отдают больше энергии, которая выделяется в форме тепла. Число столкновений зависит от материала, из которого сделан проводник, т. е. от размеров молекул, от того, насколько близко одна к другой они расположены, от числа свободных электронов и т. д. Чем больше свободных электронов, тем меньше сопротивление проводника.

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен, его размеров (длины и площади поперечного сечения) и температуры.

---

<sup>1</sup> Калория — единица измерения тепловой энергии — равна количеству тепла, необходимого для того, чтобы нагреть 1 г воды на 1° Ц.

<sup>2</sup> Термин «резистор» введен в 1962 г. (ГОСТ 10318—62) для обозначения сопротивления как предмета (детали). Термин «сопротивление», применявшийся ранее, обозначает не сам предмет, а его свойство препятствовать прохождению тока.

Зависимость сопротивления от материала и размеров проводника определяется формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где  $R$  — сопротивление проводника в омах;

$\rho$  — его удельное сопротивление в  $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;

$l$  — длина проводника в метрах;

$S$  — площадь поперечного сечения в квадратных миллиметрах.

**Удельным сопротивлением** называется сопротивление проводника из данного материала длиной в один метр с площадью поперечного сечения в один квадратный миллиметр при температуре  $+15^\circ \text{Ц}$ . Удельное сопротивление характеризуется числом свободных электронов в материале: чем их больше, тем меньше удельное сопротивление, а значит, и сопротивление проводника.

Из приведенной выше зависимости следует, что сопротивление проводника зависит:

— от материала, из которого он изготовлен, т. е. от удельного сопротивления  $\rho$ : чем оно больше, тем больше сопротивление проводника;

— от длины проводника: чем длиннее проводник, тем больше его сопротивление;

— от поперечного сечения проводника: чем оно больше, т. е. чем толще проводник, тем меньше его сопротивление.

Другими словами, **сопротивление проводника прямо пропорционально удельному сопротивлению и длине проводника и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.**

Чтобы лучше уяснить, от чего зависит сопротивление проводника, сравним прохождение электрического тока по проводнику с течением воды в трубе. Вода легче течет по трубе с гладкими стенками, чем с шероховатыми. Трудно течь воде по трубе, засоренной камнями. Серебряный и медный провода подобны гладким трубам — по этим проводам ток течет легко. Стальной и никелевый провода подобны шероховатой трубе или трубе, засоренной камнями.

В воде легче течь по короткой трубе, чем по длинной. Аналогично короткий провод представляет меньшее сопротивление току, чем длинный.

Наконец, воде легче течь по трубе большого сечения, чем малого. Точно так же толстый провод представляет меньшее сопротивление току, чем тонкий.

Сопротивление проводника зависит также от его температуры. При нагревании проводника скорость беспорядочного движения электронов и молекул возрастает, а значит, возрастает и число столкновений между ними. Следовательно, сопро-

тивление металлических проводников с повышением температуры увеличивается. Сопротивление жидких проводников, угля и некоторых сплавов с повышением температуры уменьшается.

При очень низких температурах (близких к абсолютному нулю, равному  $-273^{\circ}\text{C}$ ) некоторые твердые проводники обладают так называемой **сверхпроводимостью**; их сопротивление резко уменьшается и практически становится равным нулю. Это явление в достаточной степени еще не изучено, поэтому объяснить его трудно.

При температурах до  $+100^{\circ}\text{C}$  сопротивление металлического проводника возрастает прямо пропорционально температуре:

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2^{\circ} - t_1^{\circ}), \quad (3)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — сопротивления проводника в омах соответственно при первоначальной температуре ( $t_1^{\circ}\text{C}$ ) и после изменения температуры (при  $t_2^{\circ}\text{C}$ );

$t_1^{\circ}$  и  $t_2^{\circ}$  — температура проводника первоначальная и после изменения;

$\alpha$  — коэффициент пропорциональности, называемый температурным коэффициентом. Он показывает, на какую величину изменится сопротивление проводника в 1 ом при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Пусть сопротивление медного проводника при первоначальной температуре  $t_1^{\circ} = 10^{\circ}\text{C}$  равнялось 10 ом. Через некоторое время температура повысилась до  $t_2^{\circ} = 70^{\circ}\text{C}$ . Как при этом изменится сопротивление?

Поскольку  $R_1 = 10$  ом, температурный коэффициент меди  $\alpha = 0,004$ , а разность температур  $t_2^{\circ} - t_1^{\circ} = 70 - 10 = 60^{\circ}\text{C}$ , то прирост сопротивления

$$\alpha R_1 (t_2^{\circ} - t_1^{\circ}) = 0,004 \cdot 10 (70 - 10) = 0,04 \cdot 60 = 2,4 \text{ ом.}$$

Следовательно, сопротивление проводника

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2^{\circ} - t_1^{\circ}) = 10 + 2,4 = 12,4 \text{ ом.}$$

**Проводимость**

Иногда расчет электрических цепей удобно вести по проводимости. **Проводимость проводника** (обозначается буквой  $G$ ) — это величина, обратная его сопротивлению.

В математике обратными называются две величины, произведение которых равно единице. Значит, если  $GR = 1$ , то проводимость

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

Единицей измерения проводимости является величина, обратная ому, т. е.  $1/\text{ом}$  или сименс (*сим*).

В отличие от сопротивления проводимость характеризует проводник с точки зрения его способности пропускать электрический ток. Чем больше проводимость, тем лучше проводник пропускает ток.

Проводимость проводника равна одному сименсу, если его сопротивление равно одному ому.

В табл. 1 приведены значения удельных сопротивлений, удельных проводимостей и температурных коэффициентов некоторых материалов.

Таблица 1

**Удельное сопротивление, удельная проводимость и температурный коэффициент некоторых материалов**

Материал	Удельное сопротивление, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Удельная проводимость, $\frac{\text{м}}{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}$	Температурный коэффициент, $\alpha$
Серебро	0,016	62,5	0,0038
Медь	0,0175	58,2	0,0039
Алюминий	0,03	33,3	0,0036
Цинк	0,063	15,9	0,0037
Олово	0,12	8,33	0,0045
Железо	0,12	8,33	0,0045
Свинец	0,208	4,81	0,004
Манганин	0,43	2,326	0,000015
Нихром	0,43	2,326	0,00023
Константан	0,5	2	0,000025

**Пример 4.** Определить величину сопротивления медной проволоки длиной 0,5 км и поперечным сечением 2,5 мм<sup>2</sup>.

**Решение.** Удельное сопротивление медного проводника  $\rho = 0,0175 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ; 0,5 км = 500 м. Следовательно, согласно формуле (2)

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 500}{2,5} = 3,5 \text{ ом.}$$

**Пример 5.** Какой длины нужно выбрать никелиновую проволоку сечением  $S = 1 \text{ мм}^2$ , чтобы изготовить реостат на 50 ом, если известно, что  $\rho = 0,332 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ?

**Решение.** Из формулы (2)

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{50 \cdot 1}{0,332} \approx 151 \text{ м.}$$

**Пример 6.** Сопротивление медной проволоки длиной 600 м равно 3 ом. Определить поперечное сечение проволоки.

**Решение.** Из формулы (2)

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,0175 \cdot 600}{3} = 3,5 \text{ мм}^2.$$

**Пример 7.** Имеется 1 км 413 м железной проволоки диаметром 6 мм. Определить ее сопротивление.

**Решение.** В формулу (2) входит поперечное сечение  $S$ , а не диаметр. Площадь поперечного сечения круглого проводника

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $\pi$  — постоянное число, равное 3,14;

$d$  — диаметр проводника.

Следовательно,

$$S = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 36}{4} = 28,26 \text{ мм}^2.$$

Определяем теперь сопротивление проволоки по формуле (2):

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{0,12 \cdot 1413}{28,26} = 6 \text{ ом}.$$

**Пример 8.** Катушка намотана медным проводом длиной 500 м, толщиной 0,075 мм. Каково сопротивление катушки?

**Решение.** Площадь поперечного сечения

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2 = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot (0,075)^2 = 0,0044 \text{ мм}^2.$$

Удельное сопротивление меди  $\rho = 0,0175 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ . Значит,

$$R = \frac{0,0175 \cdot 500}{0,0044} = 2000 \text{ ом} = 2 \text{ ком}.$$

**Пример 9.** Телеграфная линия имеет сопротивление  $R_1 = 1000$  ом при температуре  $t_1^\circ = -10^\circ \text{Ц}$ . Определить сопротивление этой линии при температуре  $t_2^\circ = +20^\circ \text{Ц}$ ,  $\alpha = 0,00625$  (для стали).

**Решение.** По формуле (3) находим

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 + \alpha R_1 (t_2^\circ - t_1^\circ) = 1000 + 0,00625 \cdot 1000 \cdot [20 - (-10)] = \\ &= 1000 + 187,5 = 1187,5 \text{ ом}. \end{aligned}$$

## Напряжение

**Разность потенциалов на зажимах источника тока называется напряжением** и обозначается латинской буквой  $U$ . За единицу напряжения принят вольт.

Не следует путать напряжение на зажимах источника тока с его электродвижущей силой. Только при разомкнутой элек-

трической цепи напряжение источника тока численно равно его э. д. с.

Напряжение, как и э. д. с., измеряется вольтметром.

## 8. Электрическая цепь

### Потребители

Электрический ток применяется для освещения, движения трамвая, отопления и других целей. В этих случаях электрическая лампочка, электродвигатель, электрическая печь и т. д. являются потребителями электрической энергии, точнее, преобразователями электрической энергии в другие виды энергии (электрическая лампочка преобразует электрическую энергию в световую, электродвигатель — в механическую, электрическая печь — в тепловую).

### Цепь

Электрическая энергия передается потребителям по цепи. Цепь можно определить как путь тока. Самая простая электрическая цепь (рис. 12, а) состоит из следующих элементов:

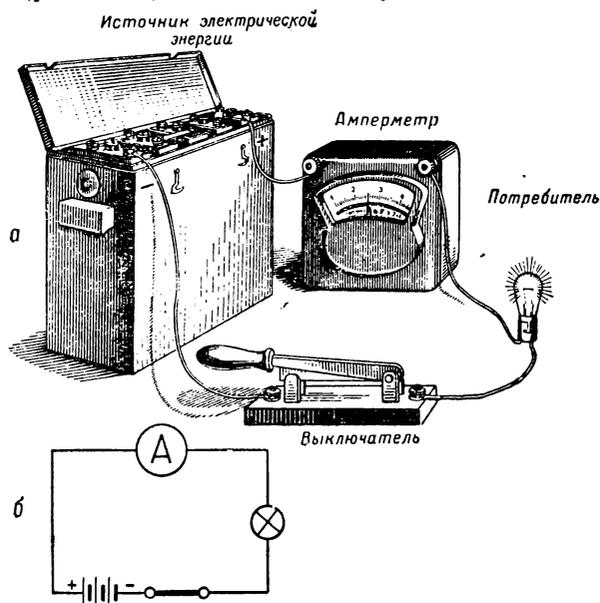


Рис. 12. Электрическая цепь:

а — замкнутая цепь с включенным амперметром; б — условное изображение цепи

- источника электрической энергии;
- потребителя электрической энергии;
- соединительных проводов.

Кроме того, каждая электрическая цепь имеет выключатель.

Назначение данной цепи — вызвать свечение электрической лампочки. Лампочка светится, когда вольфрамовая нить, находящаяся внутри, разогрета до белого свечения. Сама нить не может вырабатывать ток. Необходим источник электрической энергии, которым в данном случае служит аккумулятор.

На рис. 12, б приведено условное изображение цепи в электрических схемах: сопротивление потребителей электрической энергии обозначается прямоугольником (на схеме показана лампочка), а соединительные провода — прямыми тонкими линиями.

Если сопротивление соединительных проводов меньше  $0,01 \text{ ом}$ , то практически оно равно нулю по сравнению, скажем, с сопротивлением нити лампочки в  $300 \text{ ом}$ . Если же сопротивление провода достаточно велико, то его изображают в любой части схемы как дополнительное сопротивление.

Часть цепи, подключенная к источнику тока, играет роль сопротивления нагрузки, которое определяет величину работы источника. В рассматриваемом нами случае нить электрической лампочки служит сопротивлением нагрузки аккумулятора.

Потребители электрической энергии, включенные во внешнюю цепь, часто называют нагрузкой, а ток, протекающий через них, — током нагрузки. Увеличить нагрузку источника электрической энергии, — значит, взять от него больший ток; наоборот, уменьшить нагрузку, — значит, взять меньший ток.

Очень часто начинающие изучать электротехнику считают, что увеличение нагрузки источника равнозначно увеличению сопротивления в его внешней цепи. Такое представление ошибочно. Возрастание величины работы, которую затрачивает источник, связано с увеличением не сопротивления, а тока нагрузки.

Название «потребитель электрической энергии» — чисто условное, и не следует считать, что ток до потребителя больше, чем после него.

Чтобы выключить лампочку, необходимо изменить положение выключателя (разомкнуть цепь), тогда между его контактами будет воздух, который при нормальных условиях не имеет свободных электронов и поэтому не проводит тока. В разомкнутой цепи тока нет.

На рис. 12 изображена цепь постоянного тока. Постоянным ток называется потому, что он имеет только одно направление, которое определяется постоянной полярностью выходного напряжения аккумулятора.

### *Краткие выводы*

1. Электричество имеется во всех веществах, носителями которого являются электроны и протоны. Протоны сосредоточены в ядре атома, электроны вращаются вокруг ядра по определенным орбитам,

2. Электрон представляет наименьшее количество отрицательного электричества, протон — положительного. Заряд электрона равен заряду протона.

3. Разноименные заряды притягиваются, одноименные — отталкиваются.

4. Электроны двигаются по направлению к протонам, так как электрон в 1800 раз легче протона.

5. Закон Кулона для электрических зарядов устанавливает, что сила притяжения или отталкивания прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

6. За единицу заряда ( $Q$ ) принят кулон ( $\kappa$ ). Он характеризует величину запасенного в веществе избытка электронов или протонов.

7. Величина напряжения выражает разность потенциалов на зажимах источника тока, которая заставляет электроны двигаться. За единицу напряжения ( $U$ ) принят вольт ( $\text{в}$ ).

8. Ток представляет собой упорядоченное движение электронов. За единицу тока ( $I$ ) принят ампер ( $\text{а}$ ).

9. В жидкостях электрический ток создается движением ионов, а в газах — движением ионов и электронов. Ионы — атомы (или молекулы), которые являются электрически заряженными: отрицательные ионы имеют излишек электронов, положительные — их недостаток.

10. Сопротивление — это препятствие, оказываемое проводником потоку электронов; при прочих равных условиях оно определяет величину тока в цепи. За единицу сопротивления ( $R$ ) принят ом ( $\text{ом}$ ).

11. Проводимость — величина, обратная сопротивлению. За единицу проводимости ( $G$ ) принят сименс ( $\text{сим}$ ).

12. Проводники имеют небольшое сопротивление. Хорошие проводники — металлы. Наилучшие из них — серебро, медь и алюминий. Для соединительных проводов обычно используется медь.

13. Удельное сопротивление ( $\rho$ ) материала равно сопротивлению провода длиной  $1 \text{ м}$  с поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$  при температуре  $15^\circ \text{Ц}$  ( $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ ).

14. Удельная проводимость — величина, обратная удельному сопротивлению.

15. Сопротивление проводника прямо пропорционально удельному сопротивлению ( $\rho$ ) и длине проводника ( $l$ ) и обратно пропорционально площади его поперечного сечения ( $S$ ):

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

16. Когда требуется, чтобы провод нагревался (в электрических плитках, лампочках и т. д.), он должен иметь относи-

тельно большое удельное сопротивление. Таким сопротивлением обладают вольфрам, никель, нихром, марганец, константан.

17. Температурный коэффициент сопротивления показывает, на какую величину изменится сопротивление проводника в 1 ом при изменении температуры на 1°С. Для всех металлов сопротивление увеличивается при повышении температуры. Сопротивление нагретого провода, имеющего высокий температурный коэффициент, намного больше, чем холодного. Высокий температурный коэффициент имеют вольфрамовая, никелевая и нихромовая проволоки.

18. Электрическая цепь представляет собой замкнутый путь для потока электронов. Чтобы получить ток, необходимо иметь разность потенциалов.

19. За направление тока условно принято направление от положительного зажима источника через внешнюю цепь к отрицательному зажиму.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

В этом разделе читатель имеет возможность проверить себя, насколько усвоен материал, изложенный в гл. 1. На каждый из приведенных ниже вопросов даны четыре ответа, из них один правильный, а остальные нет. Читатель должен выбрать один ответ, который он считает правильным. В конце книги даны правильные ответы.

1. Атом натрия под воздействием внешней силы имеет 11 протонов, 12 нейтронов и 13 электронов. Этот атом называется:

а — нейтральным; б — нормальным; в — положительным ионом; г — отрицательным ионом.

2. Закон Кулона устанавливает, что сила взаимодействия двух заряженных тел равна:

а — сумме зарядов, деленной на расстояние между ними; б — произведению зарядов, деленному на расстояние между ними; в — сумме зарядов, деленной на квадрат расстояния; г — произведению зарядов, деленному на квадрат расстояния.

3. Одно тело имеет отрицательный заряд 10 единиц, а другое — положительный заряд 10 единиц. Расстояние между ними 5 линейных единиц. Сила между двумя зарядами равна:

а — 20 единицам притяжения; б — 20 единицам отталкивания; в — 4 единицам притяжения; г — 4 единицам отталкивания.

4. Сила притяжения между двумя заряженными телами равна 20 единицам. Расстояние между ними уменьшилось в два раза. Новая сила притяжения равна:

а — 80 единицам; б — 40 единицам; в — 10 единицам; г — 5 единицам.

5. Почему в электрической цепи электроны двигаются к протонам?

а — противоположные заряды отталкиваются, и электроны легче протонов; б — противоположные заряды притягиваются, и электроны легче протонов; в — противоположные заряды отталкиваются, и протоны легче электронов; г — противоположные заряды притягиваются, и протоны легче электронов.

6. Что измеряется в кулонах?

а — величина запасенного заряда; б — интенсивность электрического тока, протекающего через данное сечение проводника; в — сопротивление проводника электрическому току; г — способность проводника пропускать электрический ток.

7. Что измеряется в вольтах?  
 а — разность потенциалов между двумя различными зарядами; б — интенсивность электрического тока, протекающего через данное сечение проводника; в — сопротивление проводника электрическому току; г — способность проводника пропускать электрический ток.
8. Что измеряется в амперах?  
 а — разность потенциалов между двумя точками, которые имеют различные заряды; б — интенсивность электрического тока, протекающего через данное сечение проводника; в — сопротивление проводника электрическому току; г — способность проводника пропускать электрический ток.
9. Что измеряется в омах?  
 а — разность потенциалов между двумя различными зарядами; б — интенсивность электрического тока; в — сопротивление проводника электрическому току; г — способность проводника пропускать электрический ток.
10. Ток в 2 а равен потоку электронов:  
 а — 1 к/2 сек; б — 2 к/1 сек; в — 2 к/2 сек; г — 1 к/1 сек.
11. Сопротивление проводника изменяется:  
 а — прямо пропорционально длине; б — обратно пропорционально длине; в — прямо пропорционально диаметру; г — обратно пропорционально температуре.
12. Когда напряжение прикладывается к разомкнутой цепи, то:  
 а — ток равен нулю во всех ее частях; б — приложенное напряжение падает до нуля; в — сопротивление цепи падает до нуля; г — ток возрастает до очень большой величины.
13. Нормальное сопротивление нескольких метров медного провода в замкнутой электрической цепи:  
 а — очень велико; б — практически равно нулю; в — равно нескольким тысячам омов; г — близко к 100 000 ом.
14. Нормальное сопротивление резиновой изоляции провода:  
 а — очень велико; б — практически равно нулю; в — меньше 10 ом; г — близко к 100 ом.
15. Отрезок проводника имеет сопротивление 0,1 ом. Если удвоить длину проводника, его сопротивление станет равным:  
 а — 0,01 ом; б — 0,02 ом; в — 0,05 ом; г — 0,2 ом.
16. Сопротивление нагретой вольфрамовой нити лампочки выше, чем холодной, потому что температурный коэффициент нити:  
 а — отрицательный; б — положительный; в — равен нулю; г — около 10 ом на 1° Ц.
17. Перегоревший предохранитель имеет сопротивление:  
 а — равное нулю; б — равное бесконечности; в — 50 ом; г — не менее 100 ом.
18. Назначение изоляционных материалов:  
 а — проводить очень большие токи; б — предотвращать размыкание цепи между источником напряжения и нагрузкой; в — предотвращать короткое замыкание между проводниками; г — запасать очень большой ток.
19. У изоляторов:  
 а — много свободных электронов; б — мало свободных электронов; в — нет свободных электронов; г — нет электронов.
20. Ион представляет собой:  
 а — свободный электрон; б — протон; в — атом с нескомпенсированными зарядами; г — ядро без протонов.
21. Ток в жидкостях представляет собой поток:  
 а — свободных электронов; б — протонов; в — положительных и отрицательных ионов; г — нейтронов.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Что такое атом?
2. Что такое молекула?
3. Какие электроны называются свободными?

4. Дайте определение положительного и отрицательного ионов.
5. Объясните коротко, что такое заряд, разность потенциалов, ток, сопротивление и проводимость. Дайте их единицы измерения и условное обозначение.
6. Что такое электризация тел?
7. Объясните коротко, почему нет тока в электрической лампочке, если она не соединена с зажимами источника приложенного напряжения.
8. Укажите направление электрического тока в замкнутой цепи.
9. Укажите два способа увеличения тока в цепи.
10. Что такое постоянный ток?
11. Как взаимодействуют одноименные и разноименные электрические заряды?
12. Нарисуйте схему: источник тока, соединенный с сопротивлением 50 ом.
13. Какая разница между диаметром и поперечным сечением проводника? Как они определяются?
14. Катушка возбуждения электродинамического громкоговорителя намотана из 1000 м медной проволоки диаметром 0,2 мм. Какова величина сопротивления катушки в килоомах?



Сила тока в замкнутой цепи зависит от двух факторов: от электродвижущей силы и сопротивления. Если при увеличении э. д. с. возрастает сила, способная заставить большее число свободных электронов направленно перемещаться в цепи, то при увеличении сопротивления цепи число перемещающихся электронов, наоборот, уменьшается. Эта зависимость была найдена немецким ученым Омом в 1828 г.

### 1. Закон Ома

**Закон Ома  
для всей цепи**

В замкнутой цепи между электродвижущей силой, током и сопротивлением существует зависимость, получившая название закона Ома для всей цепи.

**Сила тока прямо пропорциональна электродвижущей силе источника тока и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи:**

$$I = \frac{E}{R}, \quad (4)$$

где  $I$  — сила тока в цепи;

$E$  — э. д. с. источника тока;

$R$  — сопротивление всей цепи.

В данном случае (рис. 13) сопротивление всей цепи состоит из внутреннего сопротивления источника тока и сопротивлений амперметра, лампочки и реостата (переменного сопротивления), т. е. внешнего сопротивления цепи. Поэтому часто сопротивление всей цепи называют полным сопротивлением цепи.

При измерении величины э. д. с. в вольтах, сопротивления в омах и силы тока в амперах получим

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ вольт}}{1 \text{ ом}}.$$

Таким образом, сила тока в цепи находится в прямой зависимости от э. д. с. источника и в обратной зависимости от сопротивления цепи, т. е. для увеличения тока необходимо увеличить э. д. с. источника или уменьшить сопротивление цепи; для уменьшения тока — уменьшить э. д. с. источника или увеличить сопротивление цепи.

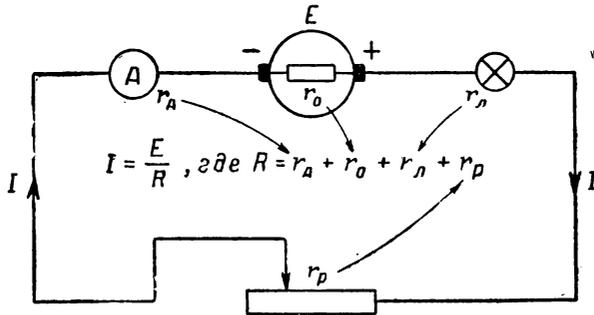


Рис. 13. Закон Ома для всей цепи

При большой э. д. с. ток в цепи может иметь небольшую величину, если в цепи имеется очень большое сопротивление. И наоборот, небольшая величина э. д. с. может вызвать в цепи очень большой ток, если сопротивление цепи невелико. Рассмотрим два примера.

**Пример 10.** Определить силу тока в цепи, если э. д. с. источника равна 1000 в, а сопротивление цепи равно 1000000 ом.  
Решение.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1000 \text{ в}}{1000000 \text{ ом}} = \frac{1}{1000} \text{ а} = 0,001 \text{ а} = 1 \text{ ма.}$$

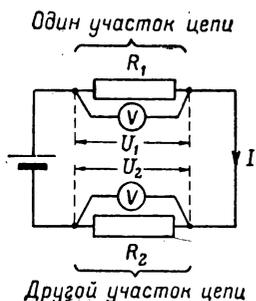
**Пример 11.** Определить силу тока в цепи, если э. д. с. источника равна 6 в, а сопротивление цепи равно 0,01 ом.  
Решение.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{6 \text{ в}}{0,01 \text{ ом}} = 600 \text{ а.}$$

Закон Ома — один из основных в электротехнике. Пользуясь законом Ома и выводами, которые из него следуют, можно производить расчеты электрической цепи.

**Закон Ома для участка цепи** справедлив не только для всей замкнутой электрической цепи, но и для любого ее участка. В последнем случае он выражает зависимость между силой тока на этом участке, напряжением (разностью электрических потенциалов) на концах (т. е. на крайних точках) участка и его сопротивлением (рис. 14).

Сила тока прямо пропорциональна напряжению на концах участка цепи и обратно пропорциональна его сопротивлению:



$$I = \frac{U_1}{R_1},$$

$I = \frac{U_1}{R_1}$  илч где  $I$  — сила тока участка цепи;  
 $U_1$  — напряжение на концах участка;  
 $R_1$  — сопротивление участка.

Эта формула для первого участка цепи, изображенной на рис. 14, справедлива и для любого другого участка:

Рис. 14. Определение величины тока на участках цепи

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5)$$

## 2. Следствия закона Ома

Из формул (4) и (5) закона Ома можно получить несколько важных соотношений.

1. Электродвижущая сила численно равна произведению величины тока на сопротивление всей цепи:

$$E = IR. \quad (6)$$

Из этой формулы как будто бы следует, что если увеличить сопротивление в два раза, то увеличится в два раза и э. д. с. В действительности этого не произойдет. Электродвижущая сила зависит не от силы тока и сопротивления, а от свойств источника тока. При увеличении сопротивления в два раза ток в цепи в два раза уменьшится, а э. д. с. останется прежней.

2. Напряжение на концах участка цепи численно равно произведению силы тока на сопротивление участка:

$$U = IR. \quad (7)$$

Это напряжение часто называют падением напряжения на данном участке цепи.

3. Сопротивление всей цепи численно равно э. д. с., деленной на силу тока:

$$R = \frac{E}{I}. \quad (8)$$

4. Сопротивление участка цепи численно равно падению напряжения на этом участке, деленному на силу тока в нем:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (9)$$

Сопротивление цепи не зависит от э. д. с. и силы тока; оно определяется только свойствами самой цепи.

С одной стороны, сопротивление можно рассматривать как свойство материала определенной структуры, которая позволяет свободным электронам перемещаться при той или иной величине э. д. с.

С другой стороны, существует зависимость  $R = \frac{U}{I}$ . Любая среда, которая позволяет протекать току  $I$  а при э. д. с.  $10$  в, имеет сопротивление  $10$  ом. В этом случае отношение  $\frac{U}{I}$ , равное  $10$  ом, характеризует сопротивление. Если э. д. с. удваивается до  $20$  в, то при этом удвоится и ток до  $2$  а, тогда как отношение  $\frac{U}{I}$  останется равным  $10$  ом. Значит, нет необходимости знать физическую структуру сопротивления для того, чтобы рассматривать его влияние на ток в цепи, поскольку мы знаем отношение  $\frac{U}{I}$ .

#### Правило треугольника

Чтобы лучше запомнить закон Ома и вытекающие из него следствия, рекомендуется первое время пользоваться правилом треугольника (рис. 15).

Если, например, нужно вспомнить формулу для определения силы тока, то достаточно закрыть пальцем букву  $I$ . Тогда относительное расположение двух других букв покажет, какое действие (деление или умножение) нужно произвести.

Если вместо напряжения  $U$  на участке цепи в треугольнике поставить электродвижущую силу источника тока  $E$ , то под сопротивлением  $R$  следует понимать полное сопротивление цепи.

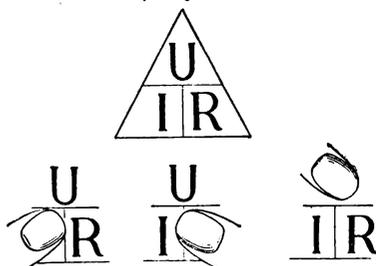


Рис. 15. Правило треугольника для запоминания закона Ома

### 3. Определение практических единиц

По закону Ома соотношения практических единиц таковы:

$$1 \text{ а} = \frac{1 \text{ в}}{1 \text{ ом}}; \quad 1 \text{ в} = 1 \text{ а} \cdot 1 \text{ ом}; \quad 1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ в}}{1 \text{ а}}.$$

1 ампер есть сила тока, протекающего через сопротивление в  $1$  ом, на зажимах которого имеется разность потенциалов, равная  $1$  вольту.

1 вольт есть разность потенциалов на зажимах сопротивления в  $1$  ом, через которое протекает ток в  $1$  ампер.

1 ом есть сопротивление, при котором напряжение в 1 вольт создает ток в 1 ампер.

**Пример 12.** Источник тока с э. д. с.  $E=24$  в включен в замкнутую цепь, сопротивление которой  $R=48$  ом. Определить силу тока в цепи.

**Решение.** Согласно формуле (4)

$$I = \frac{E}{R} = \frac{24}{48} = 0,5 \text{ а.}$$

**Пример 13.** По цепи протекает ток  $I=200$  ма (0,2 а); э. д. с. источника тока  $E=12$  в. Определить сопротивление всей цепи.

**Решение.** По формуле (8)

$$R = \frac{E}{I} = \frac{12}{0,2} = 60 \text{ ом.}$$

**Пример 14.** Напряжение на зажимах электрической лампы  $U=120$  в, сопротивление ее  $R=240$  ом. Определить силу тока, проходящего через нить лампы.

**Решение.** В соответствии с формулой (5)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ а.}$$

**Пример 15.** Сопротивление электрического чайника  $R=48$  ом. При включении в электрическую сеть по нему протекает ток  $I=2,5$  а. Определить напряжение на зажимах.

**Решение.** По формуле (7)

$$U = IR = 2,5 \cdot 48 = 120 \text{ в.}$$

**Пример 16.** К электрической печи подведено напряжение  $U=220$  в, при этом в цепи проходит ток  $I=2,5$  а. Определить сопротивление печи.

**Решение.** По формуле (9)

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{2,5} = 88 \text{ ом.}$$

#### 4. Зависимость между э. д. с. источника тока и напряжением на его зажимах

На рис. 16 схематически изображена электрическая цепь, состоящая из источника тока, потребителя (нагрузки) и соединительных проводов.

Если внутреннее сопротивление  $r_0$ , а внешнее  $r$ , — значит, полное сопротивление цепи

$$R = r_0 + r.$$

Подставим в формулу (4) вместо  $R$  правую часть этого равенства. Тогда формула закона Ома примет вид

$$I = \frac{E}{r_0 + r}, \quad (10)$$

откуда

$$E = I(r_0 + r) = Ir_0 + Ir.$$

Так как произведение силы тока на сопротивление участка цепи численно равно падению напряжения на этом участке, то

$$E = U_0 + U. \quad (11)$$

Из формулы (11) видно, что э. д. с. источника тока расходуется на преодоление сопротивления при перемещении электронов внутри источника тока и по внешней цепи. Первая часть э. д. с. —  $U_0$  называется **внутренним падением напряжения**, вторая —  $U$  — **внешним** или просто **напряжением на зажимах источника тока**. Как видно из формулы (11),

$$U = E - U_0, \quad (12)$$

т. е. **напряжение на зажимах источника тока равно его э. д. с. минус падение напряжения внутри источника тока.**

Предположим, что э. д. с. источника тока постоянна и внутреннее сопротивление его практически не меняется. Посмотрим, как будет изменяться ток в цепи, падение напряжения внутри источника тока и напряжение на зажимах в зависимости от изменения нагрузки (внешнего сопротивления).

Допустим, сопротивление нагрузки  $r$  увеличилось. Тогда из формулы (10) следует, что ток в цепи уменьшился. Это приводит к уменьшению падения напряжения внутри источника тока:

$$U_0 = Ir_0,$$

что в свою очередь вызывает увеличение напряжения на зажимах, поскольку

$$U = E - U_0.$$

При уменьшении сопротивления нагрузки ток в цепи и падение напряжения внутри источника тока увеличиваются, а напряжение на зажимах уменьшается.

Рассмотрим два случая, имеющих важное практическое значение:

- 1) внешняя электрическая цепь разорвана, т. е. сопротивление нагрузки равно бесконечности;
- 2) источник тока замкнут накоротко отрезком провода, т. е. внешнее сопротивление равно нулю.

В первом случае при  $r = \infty$  (бесконечности) ток  $I = 0$ ; падение напряжения внутри источника тока  $U_0 = 0$  ( $U_0 = Ir_0 = 0$ ); напряжение на зажимах равно э. д. с. источника тока:

$$U = E - U_0 = E - 0 = E.$$

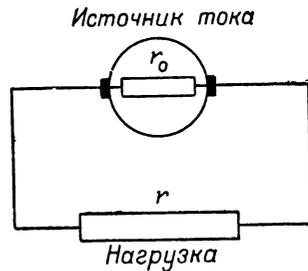


Рис. 16. Простая электрическая цепь

Отсюда ясно, что для определения э. д. с. источника тока необходимо разорвать внешнюю цепь и измерить вольтметром напряжение на зажимах.

Режим работы источника электрического тока при разомкнутой внешней цепи называется **холостым ходом**.

Во втором случае, при замыкании источника тока накоротко, внешнее сопротивление практически равно нулю ( $r=0$ ) и ток в цепи определяется по формуле

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{E}{r_0 + 0} = \frac{E}{r_0}.$$

Сила тока в цепи оказывается очень большой (внутреннее сопротивление источника обычно очень мало). Напряжение на зажимах источника тока практически равно нулю:

$$U = Ir = I \cdot 0 = 0.$$

Электродвижущая сила в рассматриваемом случае расходуется только на преодоление внутреннего сопротивления источника тока:

$$E = Ir_0.$$

Режим работы источника электрического тока при соединении зажимов проводом накоротко называется **коротким замыканием**.

Явления короткого замыкания необходимо избегать, поскольку чрезмерное увеличение тока опасно для его источника.

**Пример 17.** Источник электрического тока с э. д. с.  $E=220$  в подключен к внешней цепи с сопротивлением  $r=21,5$  ом (рис. 17). Внутреннее сопротивление источника тока  $r_0=0,5$  ом. Определить ток  $I$  в цепи, падение напряжения внутри источника  $U_0$  и напряжение на его зажимах  $U$ .

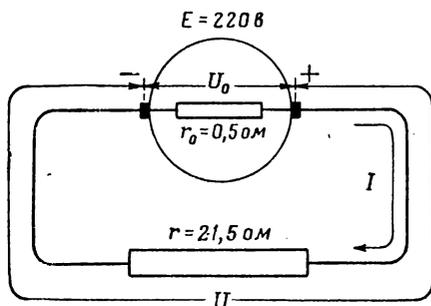


Рис. 17. Схема к примеру 17

Решение. По формуле (10) ток в цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{220}{0,5 + 21,5} = 10 \text{ а.}$$

Падение напряжения внутри источника

$$U_0 = Ir_0 = 10 \cdot 0,5 = 5 \text{ в.}$$

Напряжение на зажимах источника тока

$$U = Ir = 10 \cdot 21,5 = 215 \text{ в}$$

или по формуле (12)

$$U = E - U_0 = 220 - 5 = 215 \text{ в.}$$

**Пример 18.** Напряжение на зажимах источника  $U=120$  в (при замкнутой внешней цепи), ток в цепи  $I=5$  а, внутреннее сопротивление источника  $r_0=2$  ом. Определить сопротивление внешней цепи и э. д. с. источника тока.  
Решение. Сопротивление внешней цепи

$$r = \frac{U}{I} = \frac{120}{5} = 24 \text{ см.}$$

Электродвижущая сила источника тока

$$E = I(r_0 + r) = 5(2 + 24) = 130 \text{ в.}$$

## 5. Работа и мощность электрического тока

Работу электрического тока можно сравнить с работой воды в реке. Стоячая вода не производит никакой работы, например, не может вращать колесо водяной мельницы. Чтобы водяная мельница начала работать, необходимо движение воды в реке. Работоспособность реки зависит от количества воды в ней и от напора. Так же и работа электрического тока зависит от количества электричества и напряжения.

Электрический ток, проходя по цепи, совершает работу: двигает электрические поезда, трамваи, вращает электродвигатели станков на заводах, освещает дома, улицы и т. д.

**Способность электрического тока совершать работу называется электрической энергией.** Энергия проявляется только в виде работы, а последняя является единственной мерой определения количества энергии. Определить энергию — значит найти работу, которую совершает источник тока, расходуя свою энергию.

Работа, совершаемая электрическим током во всей цепи или на отдельном участке, выражается произведением количества прошедшего по цепи электричества на падение напряжения:

$$A = QU.$$

Как известно, количество электричества  $Q$ , прошедшее через нагрузку за время  $t$  [формула (1)], равняется произведению тока  $I$  на время  $t$ , т. е.

$$Q = It.$$

Подставив вместо  $Q$  его значение в приведенную выше формулу, получим

$$A = UIt, \quad (13)$$

где  $A$  — работа в ватт-секундах (см. определение ниже);

$U$  — напряжение в вольтах;

$I$  — ток в амперах;

$t$  — время в секундах.

Формулу (13) можно преобразовать, подставив в нее значение  $U=IR$ ; тогда

$$A = I^2 R t, \quad (13a)$$

где  $R$  — сопротивление в омах.

Подставив в последнюю формулу значение  $I = \frac{U}{R}$ , получим

$$A = \frac{U^2}{R^2} R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (13б)$$

Формулы (13), (13a), (13б) равнозначны и применяются в зависимости от условия задачи.

**Ватт-секунда, или джоуль** За единицу работы принята ватт-секунда (обозначается  $вт \cdot с$  или  $ws$ ), или джоуль (обозначается  $дж$ ).

**Ватт-секунда есть работа электрического тока величиной 1 а при напряжении 1 в в течение 1 сек.**

Более крупные единицы работы:

1 ватт-час ( $вт \cdot ч$ ) = 3600  $вт \cdot с$  = 3600  $дж$ .

1 гектоватт-час ( $гвт \cdot ч$ ) = 100  $вт \cdot ч$ .

1 киловатт-час ( $квт \cdot ч$ ) = 1000  $вт \cdot ч$ .

Например, если лампа в 100  $вт$  горит в течение 10  $ч$ , работа равна 100  $вт$ , умноженным на 10  $ч$ , т. е. 1000  $вт \cdot ч$ , или 1  $квт \cdot ч$ . Стоимость 1  $квт \cdot ч$  электрической энергии для бытовых нужд в нашей стране — 4 копейки.

**Мощность электрического тока** Энергия и работа выражают одно и то же понятие. Мощность же отличается от них: она представляет собой работу, производимую в единицу времени. Работа от времени не зависит. Например, если предмет весом 10  $кг$  перемещен на расстояние 100  $м$ , то совершена работа  $10 \cdot 100 = 1000$  килограммометров ( $кгм$ ) независимо от того, быстро или медленно она выполнена. Мощность же равна работе, деленной на время, за которое требуется ее выполнить. Если работу 1000  $кгм$  надо выполнить за 20  $сек$ , то мощность равна  $1000 : 20 = 50$   $кгм/сек$ .

**Работа электрического тока в одну секунду называется мощностью электрического тока**, она характеризует интенсивность работы, совершаемой током:

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

Подставив сюда вместо  $A$  правую часть равенства из формулы (13), получим

$$P = \frac{UIt}{t} = UI, \quad (14)$$

т. е. мощность, развиваемая электрическим током в цепи, равна произведению напряжения на ток.

Формулу (14) можно представить в другом виде, заменив напряжение  $U$  равной ему величиной  $IR$ :

$$P = IIR = I^2R, \quad (14a)$$

т. е. мощность можно определить как произведение квадрата величины тока на сопротивление.

Наконец, подставив в формулу (14) вместо  $I$  величину  $\frac{U}{R}$ , получим

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (14b)$$

т. е. мощность равна квадрату величины напряжения, деленному на сопротивление.

За единицу мощности принят ватт (*вт*,  $\omega$ ).  
**Ватт** есть мощность, которую развивает ток величиной **1 а** при напряжении **1 в**.

Более крупные единицы мощности:

1 гектоватт (*гвт*) = 100 *вт*;

1 киловатт (*квт*) = 1000 *вт*;

1 мегаватт (*Мвт*) = 1 000 000 *вт*.

При рассмотрении работы источника электрического тока приходится сталкиваться с понятиями полной и полезной мощности.

**Полной называется мощность, развиваемая источником тока, полезной — мощность, расходуемая во внешней цепи (потребителем).**

Полная мощность

$$P = EI, \quad (15)$$

где  $P$  — полная мощность в ваттах;

$E$  — электродвижущая сила в вольтах;

$I$  — ток в амперах.

Из формулы (15) видно, что полная мощность, развиваемая источником тока, прямо пропорциональна величине тока  $I$ .

Поскольку э. д. с.  $E$  источника тока складывается из двух напряжений (падения напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи), можно написать, что

$$E = Ir + Ir_0,$$

где  $r$  — сопротивление внешнего участка цепи в омах;

$r_0$  — сопротивление внутреннего участка цепи в омах.

Подставив значение  $E$  в формулу (15), получим

$$P = I^2r + I^2r_0. \quad (16)$$

Из формулы (16) видно, что полная мощность  $P$ , развиваемая источником тока, состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое

$$P_1 = I^2r$$

и есть полезная мощность источника тока, которая расходуется во внешнем участке цепи.

Второе слагаемое

$$P_0 = I^2 r_0$$

представляет собой мощность, которая теряется внутри источника тока, т. е. это мощность потерь.

**Отношение полезной мощности к полной мощности, развиваемой источником тока, называется коэффициентом полезного действия.** Коэффициент полезного действия (сокращенно к. п. д.) обозначается греческой буквой  $\eta$  (эта):

Коэффициент  
полезного действия

$$\eta = \frac{P_1}{P}. \quad (17)$$

Величина  $\eta$  тем выше, чем больше внешнее сопротивление  $r$  по отношению к внутреннему  $r_0$ . В этом случае мощность  $P_1$ , расходуемая во внешней цепи, будет больше мощности  $P_0$ , расходуемой внутри источника тока.

Формулу (17) можно представить в другом виде:

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}. \quad (17a)$$

При постоянной э. д. с. источника тока к. п. д. тем выше, чем больше напряжение на его зажимах.

Для практической электротехники очень важно знать условия получения наибольших величин полезной мощности и к. п. д.

Определим зависимость полезной мощности от тока нагрузки.

При изменении тока нагрузки  $I$  изменяется и напряжение  $U$  на зажимах источника. Значит, величина полезной мощности  $P_1 = UI$  зависит от двух переменных величин —  $U$  и  $I$ . При увеличении тока нагрузки, как мы уже знаем, напряжение на зажимах падает. Как же изменяется полезная мощность?

Рассмотрим два крайних случая.

При холостом ходе ток нагрузки равен нулю, а напряжение на зажимах равно э. д. с., поэтому

$$P_{1 \text{ х. х. }} = E \cdot 0 = 0.$$

При коротком замыкании напряжение на зажимах равно нулю, а ток  $I = \frac{E}{r_0}$ , поэтому

$$P_{1 \text{ к. з. }} = 0 \cdot \frac{E}{r_0} = 0.$$

Следовательно, в режимах, близких к холостому ходу и к короткому замыканию, полезная мощность  $P_1 = UI$  мала в первом случае из-за малой величины тока  $I$ , а во втором — из-за малой

величины напряжения  $U$ . Очевидно, максимальная полезная мощность создается в каком-то промежуточном режиме, поскольку в процессе изменения тока нагрузки полезная мощность сначала увеличивается от нуля до какой-то максимальной величины, а затем вновь уменьшается до нуля. Она достигает максимальной величины, когда внешнее сопротивление  $r$  равно внутреннему сопротивлению источника  $r_0$ .

Из формулы (17а) следует, что при холостом ходе к. п. д. равен единице (напряжение на зажимах равно э. д. с. источника; в этом случае полезная мощность не выделяется, но в то же время и не затрачивается мощность источника тока). По мере увеличения тока нагрузки к. п. д. уменьшается по прямолинейному закону.

При коротком замыкании к. п. д. равен нулю (полезной мощности нет, а мощность, развиваемая источником, полностью расходуется внутри его).

Таким образом, условие получения наибольшей полезной мощности ( $r=r_0$ ) и условие получения наибольшего к. п. д. ( $r=\infty$ ) не совпадают. **При получении от источника максимальной полезной мощности к. п. д. составляет всего 50%, т. е. половина развиваемой источником мощности теряется внутри его.**

В мощных электрических установках стремятся получить наиболее высокий к. п. д., чтобы избежать слишком больших потерь. В технике слабых токов стараются добиться наибольшей полезной мощности, поскольку потери энергии здесь исчисляются долями или единицами милливатт, т. е. нет большого экономического ущерба.

Приведем соотношение между электрической и механической мощностями. 736 ватт электрической мощности равны одной лошадиной силе:

$$736 \text{ вт} = 1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кгм/сек.}$$

**Пример 19.** Напряжение источника питания  $U=220$  в, ток  $I=15$  а. Определить его мощность.

**Решение.** По формуле (14)

$$P = UI = 220 \cdot 15 = 3300 \text{ вт} = 3,3 \text{ квт.}$$

**Пример 20.** Электрическая лампа потребляет мощность  $P=60$  вт при напряжении 120 в. Определить ток, проходящий по лампе, и сопротивление нити накаливания.

**Решение.** Из формулы (14)

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{120} = 0,5 \text{ а.}$$

Сопротивление

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,5} = 240 \text{ ом.}$$

**Пример 21.** Двигатель внутреннего сгорания мощностью 6 л. с. приводит во вращение электрическую машину, мощность которой (при полной нагрузке)  $P=3$  квт. Определить к. п. д. машины.

**Решение.** Переведем механическую мощность двигателя в электрическую. Поскольку  $1 \text{ л. с.} = 736 \text{ вт}$ , то

$$P_{\text{эл}} = 736P_{\text{мех}} = 736 \cdot 6 = 4416 \text{ вт} = 4,416 \text{ кВт.}$$

Таким образом, машина потребляет мощность  $P_{\text{п}} = 4,416 \text{ кВт}$ , а отдает  $P_0 = 3 \text{ кВт}$ . Значит, к. п. д. машины

$$\eta = \frac{P_0}{P_{\text{п}}} = \frac{3}{4,416} = 0,68.$$

**Пример 22.** Через нить накала электрической лампы, сопротивление которой  $R = 18 \text{ ом}$ , проходит ток  $I = 120 \text{ ма}$  в течение времени  $t = 1,5 \text{ ч}$ . Определить энергию, которая расходуется источником тока на накал лампы.

**Решение.** По формуле

$$A = I^2 R t = 0,12^2 \cdot 18 \cdot 1,5 \cdot 60 \cdot 60 = 1400 \text{ дж.}$$

В эту формулу величину тока надо подставлять в амперах ( $120 \text{ ма} = 0,12 \text{ а}$ ), а время — в секундах ( $1,5 \text{ ч} = 1,5 \cdot 60 \cdot 60 \text{ сек}$ ).

Выразим расходуемую энергию в ватт-часах ( $1 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ дж}$ ):

$$A = 1400 \text{ дж} = \frac{1400}{3600} = 0,39 \text{ вт} \cdot \text{ч.}$$

**Пример 23.** Электрический чайник подключен к сети напряжением  $U = 220 \text{ в}$ . Сопротивление нагревательного элемента чайника  $R = 100 \text{ ом}$ . Определить энергию, израсходованную в чайнике за время  $t = 5 \text{ мин}$ .

**Решение.**

$$A = \frac{U^2}{R} t = \frac{220^2}{100} \cdot 5 \cdot 60 = 145200 \text{ дж} = \frac{145200}{3600} \text{ вт} \cdot \text{ч} \approx 40,3 \text{ вт} \cdot \text{ч.}$$

## 6. Мощность, рассеиваемая сопротивлением

Согласно закону сохранения и превращения энергии, открытому М. В. Ломоносовым, энергия не исчезает и не появляется вновь, она только переходит из одного вида в другой. Электрическая энергия источника тока переходит в другие виды энергии — механическую, световую, тепловую и т. д.

Было замечено, что проводник при прохождении по нему тока нагревается. Почему это происходит? Электрическая энергия тока затрачивается на преодоление сопротивления, превращаясь в тепловую.

Какова же зависимость между количеством тепла, выделяемого в проводнике при прохождении по нему тока, силой тока и сопротивлением?

Эту зависимость установили независимо друг от друга русский ученый Ленц и английский ученый Джоуль, поэтому она получила название закона Джоуля — Ленца.

**Количество тепла, выделяемого в проводнике электрическим током, пропорционально квадрату величины тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.**

Закон Джоуля — Ленца выражается формулой

$$Q = 0,24 I^2 R t, \quad (18)$$

где  $Q$  — количество тепла в калориях;

$I$  — величина тока в амперах;

$R$  — сопротивление в омах;

$t$  — время в секундах;

0,24 — коэффициент, называемый тепловым эквивалентом.

Произведение  $I^2Rt$  определяет количество электрической энергии, потребляемой нагрузкой; тепловой эквивалент переводит эту энергию в тепловую.

Опытным путем Ленц определил, что ток величиной 1 а, проходя по проводнику, сопротивление которого 1 ом, в течение 1 сек выделяет в нем тепло, равное 0,24 малой калории. Таким образом, коэффициент 0,24 служит для перехода от единиц электрической энергии к единицам тепловой энергии.

#### Подсчет мощности

Мощность, рассеиваемая сопротивлением, в зависимости от известных величин, подсчитывается по одной из формул (14), (14а), (14б):

$$P = UI; \quad P = I^2R; \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

**Пример 24.** Определить мощность, рассеиваемую сопротивлением цепи, изображенной на рис. 18.

**Решение.** Определим мощность по трем формулам.

По формуле (14)

$$P = UI = 12 \cdot 2 = 24 \text{ вт.}$$

По формуле (14 а)

$$P = I^2R = 2^2 \cdot 6 = 24 \text{ вт.}$$

По формуле (14 б)

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{12^2}{6} = \frac{144}{6} = 24 \text{ вт.}$$

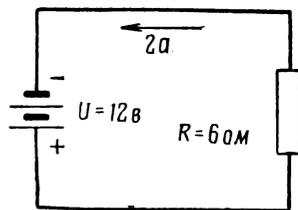


Рис. 18. Подсчет электрической мощности

Результат подсчета получается один и тот же. В данном случае мощность 24 вт, рассеиваемая в форме тепла, должна непрерывно поступать от батареи.

На основе открытия теплового действия тока русский ученый А. Н. Лодыгин в 1873 г. изобрел электрическую лампу накаливания. В этой лампе электрическая энергия превращается в световую вследствие накаливания металлической нити, помещенной в вакуум, чтоб она не перегорела, до белого свечения, причем лишь незначительная часть электрической энергии переходит в световую, а большая часть — в тепловую.

На тепловом действии тока основана работа электрических осветительных ламп, электронагревательных приборов (печей, паяльников, утюгов), тепловых измерительных приборов (амперметров), предохранителей электрических цепей и т. д.

В любом случае мощность рассеяния равна квадрату силы тока, умноженному на сопротивление ( $I^2R$ ). Казалось бы, чем

меньше сопротивление, тем меньше мощность рассеяния на нем, поскольку сопротивление входит в формулу одним из множителей. В действительности это не так. Ведь, чем меньше сопротивление, тем больше величина тока, а последняя входит множителем во второй степени. Следовательно, **при уменьшении сопротивления мощность рассеяния увеличивается.**

**Номинальная мощность и напряжение** Приборы, в которых используется тепловое действие тока, обычно оцениваются номинальной мощностью при определенном напряжении. **Номинальная мощность показывает, какую мощность рассеивает сопротивление прибора.** Например, 100-ваттная лампа при напряжении 127 в рассеивает 100-ваттную мощность в сопротивлении нити. Номинальная мощность и напряжение сети, в которую можно включать данный прибор, указываются в паспорте и на самом приборе. В нашей стране используются для бытовых нужд два напряжения сети: 127 и 220 в.

**Плотность тока** В ряде случаев выделение тепла сверх определенной нормы допускать нельзя. Так, например, перегрев электрических проводов ведет к порче изоляции и к авариям. Чтобы избежать аварий, для электрических проводов устанавливаются допустимые плотности тока. **Плотностью тока называется величина тока в амперах, приходящегося на один квадратный миллиметр площади поперечного сечения провода ( $a/m^2$ ).**

**Короткое замыкание** Если два оголенных провода, идущие от разноименных полюсов источника тока к потребителям, соединятся между собой, то произойдет короткое замыкание. Оно вызывается разнообразными причинами: порчей изоляции, неправильным включением потребителей и т. д. Так как сопротивление соединительных проводов мало, то при коротком замыкании по ним идет очень большой ток. Провода перегреваются, загорается изоляция, может возникнуть пожар. Кроме того, при коротком замыкании могут быть повреждены источники тока (может сгореть обмотка электрической машины или испортиться аккумулятор).

**Предохранители** Чтобы избежать аварий при коротком замыкании, во все электрические цепи включают предохранители, использование которых основано чаще всего на тепловом действии тока. Такой предохранитель представляет собой кусок тонкой проволоки (или пластинку), включаемой последовательно в электрическую цепь (рис. 19). Предохранитель рассчитывают так, что, если ток в цепи превышает допустимую величину, проволока сильно нагревается и расплавляется (отсюда — плавкие предохранители), размыкая электрическую цепь.

Предохранитель имеет очень маленькое сопротивление, поэтому падение напряжения на нем практически равно нулю. Разомкнутый предохранитель имеет бесконечно большое сопротивление. В цепи при разомкнутом предохранителе все напряжение прикладывается к его зажимам.

В табл. 2 приведены наибольшие допустимые величины тока в амперах для голых проводов, а в табл. 3 — для изолированных медных проводов.

В табл. 3, кроме того, в третьей графе указано, какой плавкий предохранитель нужно включить в цепь при данной допустимой величине тока. Например, если ток в цепи не должен превышать 20 а, то предохранитель следует взять на 15 а.

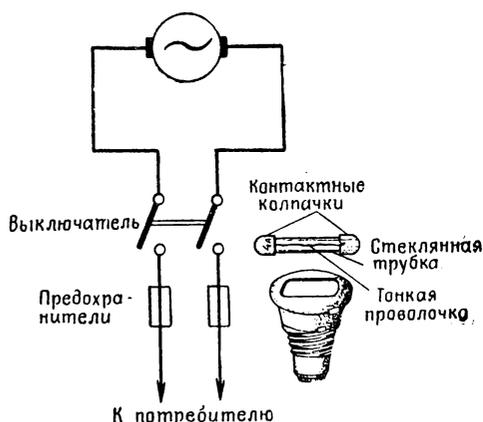


Рис. 19. Схема включения плавких предохранителей в электрическую цепь и их общий вид

Таблица 2

Допустимые величины тока для голых проводов

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Наибольшая допустимая величина тока, а		
	медь	алюминий	сталь
4	46	35	16
6	60	45	20
10	86	65	30
16	118	90	40
25	162	125	55
35	206	155	72
50	266	205	95
70	340	260	120
95	420	320	150

Таблица 3

Допустимые величины тока для изолированных медных проводов

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Наибольшая допустимая величина тока, а	Плавкий предохранитель 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 25.** В электрическую цепь, по которой проходит ток  $I=2,5$  а, включен реостат  $R=6$  ом. Определить количество тепла, выделяемого в реостате в течение 30 мин (1800 сек).

Решение. По формуле (18)

$$Q = 0,24 I^2 R t = 0,24 (2,5)^2 \cdot 6 \cdot 1800 = 16200 \text{ кал} = 16,2 \text{ ккал}$$

(ккал — килокалория, или большая калория; 1 ккал = 1000 кал).

**Пример 26.** Требуется вскипятить 2 л воды в электрическом чайнике. Начальная температура воды  $12^\circ \text{C}$ ; сопротивление нагревательного прибора чайника  $R=25 \text{ ом}$ ; величина тока, проходящего через чайник,  $I=6 \text{ а}$ . Известно, что только 80% тепла, выделяемого нагревательным прибором чайника, идет на нагревание воды, а 20% — на нагревание воздуха. Определить, через какое время закипит вода в чайнике.

Решение. Определим, сколько тепла необходимо затратить только на нагревание воды в чайнике:

$$Q_{\text{воды}} = 2 (100 - 12) = 2 \cdot 88 = 176 \text{ ккал.}$$

Вычисляем, сколько всего тепла необходимо затратить на нагревание воды (с учетом нагревания воздуха):

$$176 \text{ ккал} \rightarrow 80\%; \quad Q \text{ ккал} \rightarrow 100\%;$$

значит,

$$Q = \frac{176 \cdot 100}{80} = 220 \text{ ккал} = 220\,000 \text{ кал.}$$

Из формулы (18)

$$t = \frac{Q}{0,24 I^2 R} = \frac{220\,000}{0,24 \cdot 6^2 \cdot 25} = 1018 \text{ сек} \approx 17 \text{ мин.}$$

**Пример 27.** Падение напряжения на реостате  $U=20 \text{ в}$ , сопротивление его  $R=5 \text{ ом}$ . Определить количество тепла, выделяемого в реостате за 20 мин.

Решение. Преобразуем формулу (18). По закону Ома  $I = \frac{U}{R}$  или после возведения в квадрат левой и правой частей этого равенства  $I^2 = \frac{U^2}{R^2}$ . Подставим в формулу (18) вместо  $I^2$  его значение:

$$Q = 0,24 I^2 R t = 0,24 \frac{U^2}{R^2} R t = 0,24 \frac{U^2}{R} t.$$

Время  $t=20 \text{ мин}=1200 \text{ сек}$ .

Определяем количество тепла:

$$Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t = 0,24 \cdot \frac{20^2}{5} \cdot 1200 = 23040 \text{ кал} \approx 23 \text{ ккал.}$$

**Пример 28.** Напряжение на зажимах участка цепи  $U=120 \text{ в}$ ; ток, проходящий по цепи,  $I=2,5 \text{ а}$ . Определить количество тепла, выделяемого в цепи за 10 мин.

Решение. Преобразуем формулу (18), исключив из нее  $R$ . Так как  $U=IR$ , то

$$Q = 0,24 I R t = 0,24 I U t.$$

Следовательно,

$$Q = 0,24 I U t = 0,24 \cdot 120 \cdot 2,5 \cdot 600 = 43200 \text{ кал} = 43,2 \text{ ккал.}$$

**Пример 29.** Электрическая лампа мощностью 100 вт включена в сеть напряжением 120 в. Определить величину тока, протекающего через лампу, и сопротивление раскаленной нити.

Решение. По формуле (14)

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{120} \approx 0,833 \text{ а.}$$

По закону Ома

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,833} \approx 144 \text{ ом.}$$

**Большие и малые  
единицы**

Основные единицы: ампер, вольт, ом, ватт — удобны для расчета большинства электрических цепей, но во многих случаях они слишком малы или очень велики. Например, сопротивления могут измеряться несколькими миллионами омов, напряжения высоковольтных линий — многими тысячами вольт, а ток, протекающий через вакуумные лампы, — тысячными долями ампера. В этих случаях пользуются единицами, более крупными или мелкими по сравнению с основными (табл. 4).

Таблица 4

**Десятичная система измерений**

Приставка	Величина к основной единице	Условное обозначение	Примеры
Микро	Одна миллионная, или $\frac{1}{1\,000\,000} = 1 \cdot 10^{-6}$	<i>мк</i> ( <i>μ</i> )	$25 \text{ мкв} = \frac{25}{1\,000\,000} \text{ в} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ в};$ $225 \text{ мка} = \frac{225}{1\,000\,000} \text{ а} = 225 \cdot 10^{-6} \text{ а}$
Милли	Одна тысячная, или $\frac{1}{1000} = 1 \cdot 10^{-3}$	<i>м</i> ( <i>m</i> )	$12 \text{ мв} = \frac{12}{1000} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ в};$ $46 \text{ ма} = \frac{46}{1000} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ а};$ $0,075 \text{ а} = 0,075 \cdot 1000 = 75 \text{ ма}$
Кило	Одна тысяча, или $1000 = 1 \cdot 10^3$	<i>к</i>	$15 \text{ кв} = 15\,000 \text{ в};$ $56 \text{ ком} = 56\,000 \text{ ом};$ $10\,000 \text{ ом} = 10 \text{ ком};$ $15\,000 \text{ вт} = 15 \text{ квт}$
Мега	Один миллион, или $1\,000\,000 = 1 \cdot 10^6$	<i>М</i>	$5 \text{ Мом} = 5\,000\,000 \text{ ом} = 5 \cdot 10^6 \text{ ом}$

**Пример 30.** Через сопротивление  $R=5000$  ом протекает ток  $I=10$  ма. Определить падение напряжения на сопротивлении.

**Решение.**

$$U = IR = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ в.}$$

**Пример 31.** Напряжение  $U=10$  кв вызывает ток в цепи  $I=1$  ма. Определить сопротивление цепи.

**Решение.**

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-3}} \text{ ом} = 10 \cdot 10^6 \text{ ом} = 10 \text{ Мом.}$$

**Пример 32.** Напряжение  $U=300$  в приложено к сопротивлению  $R=50000$  ом. Определить величину тока, протекающего через сопротивление.

**Решение.**

$$I = \frac{U}{R} = \frac{300}{50 \cdot 10^3} = \frac{300}{50} \cdot 10^{-3} \text{ а} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ а} = 6 \text{ ма.}$$

Приведенные примеры показывают, насколько упрощаются подсчеты при использовании десятичной системы измерений.

## 7. Меры предосторожности при работе с электрическим током

Если прикоснуться к голым проводам, находящимся под током, то можно получить электрический удар: возникнут болезненные судороги мускул, вызванные током, проходящим через тело.

Сопротивление человека между двумя ладонями (через руки и тело) около 10 000—50 000 ом. Сопротивление тела между рукой и конечностями ног намного больше.

При среднем сопротивлении тела 30 000 ом напряжение 300 в создает ток 0,01 а, который вызывает сильный электрический удар. Ток 0,1 а приводит к трагическим последствиям. Когда же сопротивление тела ниже среднего, то серьезный удар может причинить линия даже напряжением 120 в. Поэтому при работе с током требуется соблюдать меры предосторожности.

Самое верное правило безопасности — работа при выключенном напряжении.

Если провода обесточить невозможно, то следует работать одной рукой, а другую держать за спиной. Себя необходимо изолировать от земли, особенно при работе с цепями мощной линии, так как одна сторона линии обычно заземляется.

Кроме того, при работе с электрическими установками нужно обязательно соблюдать требования инструкций по технике безопасности, прилагаемых к электрооборудованию.

### Краткие выводы.

1. Для определения силы тока, напряжения или сопротивления используется формула закона Ома:

$$I = \frac{U}{R}; \quad U = IR; \quad R = \frac{U}{I},$$

где напряжение  $U$  выражено в вольтах, ток  $I$  — в амперах, сопротивление  $R$  — в омах.

2. Один ампер есть величина тока, который создается разностью потенциалов в один вольт в цепи сопротивлением в один ом.

3. Электрический ток, протекая через сопротивление, выделяет в нем тепло: происходит преобразование электрической энергии в тепловую.

4. Количество выделяемой тепловой энергии зависит от напряжения, тока и времени. Единица энергии или работы — джоуль.

5. Работа электрического тока в одну секунду называется мощностью.

6. Единица электрической мощности — ватт. Один ватт равен одному вольту, умноженному на один ампер.

7. Для подсчета электрической мощности можно пользоваться формулами трех видов:

$$P = UI; \quad P = I^2R; \quad P = \frac{U^2}{R},$$

где  $P$  — в ваттах;  $U$  — в вольтах;  $I$  — в амперах;  $R$  — в омах.

8. Киловатт-час ( $квт \cdot ч$ ) является единицей электрической энергии.

$$1 \text{ квт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

9. Изоляторы используются для предотвращения короткого замыкания цепи. Обычные изоляционные материалы — воздух, вакуум, резина, стекло, фарфор, пластмассы.

10. Предохранители используются в цепи во избежание аварий при сильных токах: превышение расчетного значения тока предохранителя вызывает его перегрев и расплавление, а значит, и размыкание цепи.

11. Напряжение, приложенное к телу человека, может вызвать опасный электрический удар. Поэтому при работе с цепями электрического тока необходимо выключить напряжение.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. К сопротивлению в  $3 \text{ ом}$  приложено напряжение  $9 \text{ в}$ , при этом ток равен:

а —  $3 \text{ а}$ ; б —  $6 \text{ а}$ ; в —  $9 \text{ а}$ ; г —  $12 \text{ а}$ .

2. Напряжение  $10 \text{ в}$  вызывает ток  $3 \text{ а}$ , при этом сопротивление цепи равно:

а —  $2 \text{ ом}$ ; б —  $3\frac{1}{3} \text{ ом}$ ; в —  $10 \text{ ом}$ ; г —  $13 \text{ ом}$ .

3. Если через резистор  $20 \text{ ом}$  протекает ток  $2 \text{ а}$ , то напряжение на зажимах равно:

а —  $2 \text{ в}$ ; б —  $20 \text{ в}$ ; в —  $22 \text{ в}$ ; г —  $40 \text{ в}$ .

4. Напряжение источника тока  $5 \text{ в}$ , приложенное к резистору  $1000 \text{ ом}$ , вызывает ток, равный:

а —  $5 \text{ мка}$ ; б —  $5 \text{ ма}$ ; в —  $50 \text{ ма}$ ; г —  $5 \text{ а}$ .

5. Разница между мощностью и энергией состоит в том, что:  
а — мощность представляет собой работу, производимую в единицу времени, а энергия от времени не зависит; б — энергия представляет собой работу, производимую в единицу времени, а мощность от времени не зависит; в — мощность может измеряться в ватт-часах, а энергия нет; г — энергия равна произведению  $UI$  без учета времени.

6. Сопротивление  $820000 \text{ ом}$  равно:

а —  $82 \text{ ком}$ ; б —  $0,82 \text{ Мом}$ ; в —  $8,2 \text{ Мом}$ ; г —  $820 \text{ сим}$ .

7. Когда напряжение  $10 \text{ в}$  приложено к сопротивлению  $4 \text{ ом}$ , мощность, расходуемая источником напряжения, равняется:

а —  $14 \text{ вт}$ ; б —  $20 \text{ вт}$ ; в —  $40 \text{ вт}$ ; г —  $25 \text{ вт}$ .

8. Когда внешнее сопротивление уменьшается, мощность, расходуемая источником постоянного напряжения:

а — уменьшается, потому что меньше ток; б — увеличивается, потому что больше ток; в — остается той же самой, хотя ток увеличивается; г — остается той же самой, хотя ток уменьшается.

9. Телевизионный приемник потребляет мощность  $240 \text{ вт}$  от источника тока  $120 \text{ в}$ . В этом случае через приемник протекает ток, равный:

а —  $2 \text{ ма}$ ; б —  $2 \text{ а}$ ; в —  $120 \text{ а}$ ; г —  $240 \text{ а}$ .

10. Формула мощности не может быть написана в таком виде:

$$а - P = UI; \quad б - P = \frac{U^2}{R}; \quad в - P = IR; \quad г - P = I^2R.$$

11. Если ток, протекающий через резистор, увеличится в два раза, то мощность рассеяния будет:

а — составлять  $\frac{1}{4}$  первоначальной; б —  $\frac{1}{2}$  первоначальной; в — в два раза больше первоначальной; г — в четыре раза больше первоначальной.

12. Сопротивление, подключенное к зажимам  $100 \text{ в}$  источника, рассеивает  $200 \text{ вт}$  мощности. Его величина равна:

а —  $50 \text{ ом}$ ; б —  $100 \text{ ом}$ ; в —  $200 \text{ ом}$ ; г —  $500 \text{ ом}$ .

13. Ток  $50 \text{ ма}$  протекает через резистор  $1000 \text{ ом}$ . Мощность, рассеиваемая резистором, равна:

а —  $0,25 \text{ вт}$ ; б —  $0,5 \text{ вт}$ ; в —  $2,5 \text{ вт}$ ; г —  $25 \text{ вт}$ .

14. Сопротивление  $100 \text{ ом}$  рассеивает мощность  $100 \text{ вт}$ . Напряжение на его зажимах равно:

а —  $10 \text{ в}$ ; б —  $100 \text{ в}$ ; в —  $1000 \text{ в}$ ; г —  $1 \text{ в}$ .

15. Электрические часы имеют мощность рассеяния  $2 \text{ вт}$ . В течение 10 дней общая энергия рассеяния составляет:

а —  $20 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ ; б —  $48 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ ; в —  $240 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ ; г —  $480 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ .

16. Осветительная лампа уличного фонаря мощностью  $200 \text{ вт}$  горит в среднем 10 ч ночью в течение 1 года (365 дней). В этом случае потребуется энергия, равная:

а —  $73 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ ; б —  $730 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ ; в —  $7300 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ ; г —  $3650 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ .

17. При работе холодильник потребляет мощность  $50 \text{ вт}$ . Предположим, что он работает 20% времени. Расход энергии за месяц (30 дней) составит:

а —  $720 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ ; б —  $7200 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ ; в —  $72 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ ; г —  $3600 \text{ вт} \cdot \text{ч}$ .

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Напишите три вида формулы закона Ома.

2. Почему более высокое напряжение, приложенное к одному и тому же сопротивлению, вызывает более сильный ток?

Почему при большем сопротивлении и том же напряжении ток в цепи меньше?

3. Источник тока напряжением  $120 \text{ в}$  подключен к сопротивлению  $30 \text{ ом}$ .

а) Нарисуйте схему включения. б) Какой ток протекает через сопротивление? в) Какой ток протекает через соединительные провода? г) Какой ток протекает через источник напряжения?

4. Напишите три вида формулы электрической мощности.
5. Батарея напряжением  $12\text{ в}$  подключена к сопротивлению  $4\text{ ом}$ .
  - а) Нарисуйте схему включения.
  - б) Подсчитайте мощность, которая рассеивается на сопротивлении.
  - в) Какая мощность расходуется батареей?
  - г) Если сопротивление увеличится в два раза, какова будет мощность рассеяния на сопротивлении?
6. Какая из двух величин больше: вольт или киловольт; ампер или миллиампер; ом или мегом; вольт или микровольт?
7. Преобразуйте:  $12\text{ ма}$  в амперы;  $500\text{ в}$  в киловольты;  $1/2\text{ Мом}$  в омы;  $100000\text{ ом}$  в мегомы;  $1/2\text{ а}$  в миллиамперы.
8. Сопротивление состоит из нихромового провода длиной  $4,5\text{ м}$  и диаметром  $2,54\text{ мм}$ . Подсчитайте поперечное сечение провода в  $\text{мм}^2$  и его сопротивление. При каком напряжении ток равен  $0,5\text{ а}$ ?
9. К источнику какого напряжения необходимо подключить константовый провод длиной  $15\text{ м}$  и диаметром  $0,45\text{ мм}$ , чтобы получить ток  $1,2\text{ а}$ ?
10. Сопротивление  $40\text{ ком}$  имеет мощность рассеяния  $1\text{ вт}$ . Какова допустимая величина тока в сопротивлении?
11. Ток  $100\text{ ма}$  протекает в сопротивлении  $1200\text{ ом}$ . Какова мощность рассеяния сопротивления?
12. Чтобы нагреть утюг от сети  $120\text{ в}$ , необходим ток, равный  $1,8\text{ а}$ . Каково сопротивление нагревательного элемента?



**1. Последовательное соединение резисторов**

Последовательным называется такое соединение резисторов, когда к концу первого из них подключается начало второго, к концу второго — начало третьего и т. д., т. е. резисторы

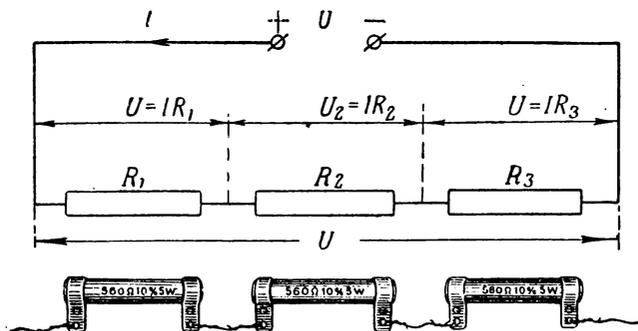


Рис. 20. Последовательное соединение резисторов

соединены в виде цепочки (рис. 20). За начало можно принять любой конец резистора.

**Ток в цепи**

Положительный зажим источника тока притягивает электроны с такой силой, с какой отрицательный зажим отталкивает их. Движение свободных электронов во всех частях последовательной цепи начинается одновременно с одинаковой скоростью. Следовательно, электронный поток во всей цепи один и тот же, через любое ее поперечное сечение одновременно проходит равное число электронов,двигающихся с одинаковой скоростью. Поэтому ток при последовательном соединении резисторов один и

тот же во всех частях цепи. Для тока во внешней цепи есть только один путь.

Порядок включения резисторов не влияет на силу тока. На рис. 21, а, б и в порядок включения резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  различный, но во всех трех случаях они соединены последовательно

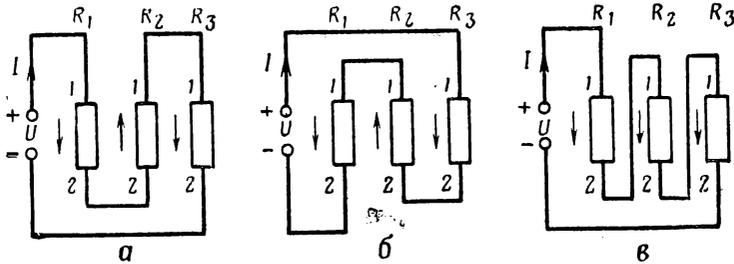


Рис. 21. Различный порядок последовательного включения резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$

и через них протекает один и тот же ток  $I$ . И если даже сопротивления резисторов имеют разные величины, ток в них один.

**Общее сопротивление цепи**

При последовательном соединении резисторов **общее сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений ее участков** (рис. 20):

$$R = R_1 + R_2 + R_3,$$

где  $R$  — общее сопротивление цепи;  
 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  — сопротивления участков.

Эта формула применима к любому числу сопротивлений одинаковых или разных величин:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (19)$$

Когда цепочка из последовательно соединенных резисторов подключается к источнику тока (рис. 21), свободные электроны, образующие ток, проходят по всем резисторам. Общее сопротивление внешней цепи на зажимах источника тока — это сопротивление всех резисторов.

**Падение напряжения**

Ток, проходя по резистору, создает на его концах напряжение, равное по закону Ома произведению  $IR$ . **Напряжение на концах каждого резистора называется падением напряжения**, так как на эту величину падает, т. е. уменьшается, разность потенциалов источника тока, которая приходится на остальные резисторы последовательной цепи.

На рис. 22 показана электрическая цепь, состоящая из двух последовательных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , подключенных к источнику тока 12 в. Ток 1 а, протекая через резисторы, создает падения

напряжений  $U_1 = IR_1 = 1 \cdot 4 = 4$  в на резисторе  $R_1$  и  $U_2 = IR_2 = 1 \cdot 8 = 8$  в на резисторе  $R_2$ . Разность потенциалов 12 в уменьшается на величину  $U_1 = 4$  в. Оставшиеся 8 в составляют падение напряжения на резисторе  $R_2$ . Таким образом, напряжение

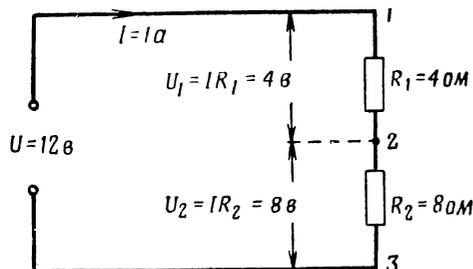


Рис. 22. Падения напряжения в последовательной цепи

падает с 12 в в точке 1 (по отношению к точке 3) до 8 в в точке 2. Затем напряжение с 8 в в точке 2 падает до 0 в точке 3. Разность потенциалов между любыми двумя точками на участке провода от нагрузки к источнику тока равна нулю, поскольку провод практически не имеет сопротивления и поэтому нет падения напряжения ( $1 \text{ а} \cdot 0 \text{ ом} = 0 \text{ в}$ ).

Падение напряжения на резисторе  $R_2$  больше падения напряжения на резисторе  $R_1$ , так как необходима бóльшая разность потенциалов, чтобы получить тот же самый ток в резисторе с более высоким сопротивлением.

**Сумма падений напряжений**

**Напряжение на зажимах цепи равно сумме падений напряжений на отдельных ее участках (рис. 20):**

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n. \quad (20)$$

Эти падения напряжений — пропорциональные части приложенного напряжения, которые необходимы для создания одного и того же тока в каждом последовательном сопротивлении. Значит, все приложенное напряжение равно сумме его частей. Так, на рис. 22 сумма падений напряжений 4 в и 8 в равна приложенному напряжению 12 в.

Ток один и тот же во всех резисторах последовательной цепи, а падение напряжения равно произведению силы тока на сопротивление, поэтому напряжения  $IR$  пропорциональны величинам последовательных сопротивлений. На большем сопротивлении происходит большее падение напряжения, и наоборот. На равных сопротивлениях будут равные падения напряжений. Это правило можно записать так:

$$IR = \frac{R}{R_{\text{общ}}} \cdot U,$$

где  $IR$  — падение напряжения;

$R$  — одно из сопротивлений последовательной цепи;

$R_{\text{общ}}$  — общее ее сопротивление;

$U$  — приложенное напряжение.

**Общее сопротивление** называют эквивалентным, поскольку им можно заменить несколько сопротивлений, не изменяя величины тока в цепи.

Цепочку из последовательно включенных резисторов можно рассматривать как делитель напряжения. На каждом резисторе происходит падение напряжения, равное отношению его сопротивления к сопротивлению всей цепи, умноженному на приложенное напряжение. **Напряжения на отдельных участках распределяются пропорционально их сопротивлениям.**

**Полярность падений напряжений**

Когда на резисторе имеется падение напряжения  $IR$ , то один конец резистора должен быть более положительный или более отрицательный, чем другой. Только в этом случае создается разность потенциалов, вызывающая ток. Полярность ее связана с направлением потока электронов в цепи от отрицательного к положительному потенциалу. Электроны движутся через резистор  $R_2$  (рис. 23) от точки 1 к точке 2. Поэтому конец резистора  $R_2$ , подключенный к точке 1, имеет более отрицательный потенциал ( $-$ ), чем конец, подключенный к точке 2. Полярность разности потенциалов (напряжения) на резисторе  $R_2$  такова, что точка 1 является отрицательной стороной ( $-$ ), а точка 2 — положительной ( $+$ ). Для резистора  $R_1$  точка 3 отрицательная, а 4 — положительная.

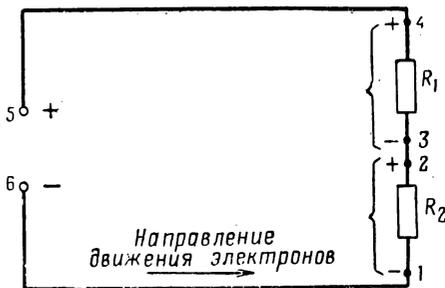


Рис. 23. Полярность падений напряжения

Общий способ определять полярность падений напряжений в цепи следующий. **В точке, расположенной ближе к положительному зажиму источника тока, потенциал более положительный, чем в точке, находящейся дальше.** Точно так же в точке, расположенной ближе к отрицательному зажиму, потенциал более отрицательный, чем в дальней точке.

На рис. 23, например, знак «+» возле точки 2 (эта полярность показана только для напряжения на резисторе  $R_2$ ) показывает, что потенциал в ней положительнее, чем в точке 1. Но та же точка 2 не может быть более положительной, чем точка 4, находящаяся ближе к положительному зажиму источника, и тем более, чем точка 5, являющаяся самим зажимом. По той же причине (для резистора  $R_1$ ) в точках 6 и 1 потенциал более отрицательный, чем в точке 3.

Разность потенциалов между точками 2 и 3 равна нулю, поскольку сопротивление между ними равно нулю. Эти точки в электрическом отношении равноценны, потому что они имеют

один и тот же потенциал — положительный по отношению к отрицательному зажиму источника тока (из-за падения напряжения на зажимах резистора  $R_2$ ) и отрицательный по отношению к положительному зажиму (из-за падения напряжения на резисторе  $R_1$ ).

**Общая мощность** — мощность расходуется в виде тепла на сопротивлении нагрузки. Величину мощности можно определять по формулам (14, 14а, 14б). Воспользуемся формулой  $P = UI$ .

Так как напряжение, приложенное к цепи, равно сумме падений напряжений на ее участках, а во всех сопротивлениях протекает один и тот же ток, то **общая мощность, расходуемая источником питания, равна сумме мощностей, рассеиваемых последовательно соединенными сопротивлениями**, т. е.

$$P_{\text{общ}} = UI = (U_1 + U_2 + U_3)I = U_1I + U_2I + U_3I = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

**Влияние разрыва** — Сопротивление разрыва цепи очень велико, потому что между концами разорванного проводника имеется воздух, который при обычных условиях не проводит ток. Поскольку ток в последовательной цепи нигде не разветвляется, разрыв в любой ее точке приводит к прекращению тока.

На рис. 24, а показана замкнутая цепь, состоящая из трех по-

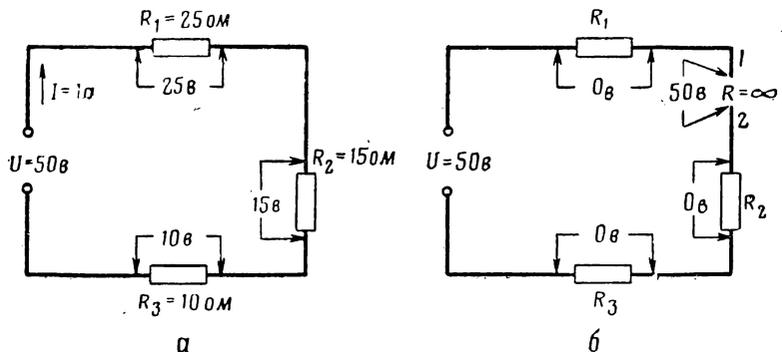


Рис. 24. Влияние разрыва в последовательной цепи:  
а — замкнутая цепь; б — при разрыве цепи тока нет

следовательно включенных резисторов, а на рис. 24, б — та же цепь, разорванная между точками 1 и 2. Разрыв в любом месте цепи имеет практически бесконечное сопротивление. Поэтому величина тока практически равна нулю, хотя источник вырабатывает напряжение 50 в.

Предположим, что сопротивление разрыва равно 50 миллиардам омов. По сравнению с этой величиной сопротивления рези-

сторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  ничтожно малы. По закону Ома (50 в : 50 миллиардов омов) ток во всех точках цепи составит одну миллиардную часть ампера, т. е. он практически будет равен нулю. Значит, и падения напряжений на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  не будет — все напряжение источника питания (50 в) окажется приложенным к точкам разрыва. (Произведение одной миллиардной ампера на 50 миллиардов омов дает 50 в.)

**Пример 33.** Напряжение на зажимах цепи, состоящей из последовательно включенных резисторов  $R_1=40$  ом,  $R_2=15$  ом и  $R_3=25$  ом, равно 120 в. Определить падение напряжения на каждом резисторе.

**Решение.** Эквивалентное сопротивление цепи определяем по формуле (19):

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 40 + 15 + 25 = 80 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{80} = 1,5 \text{ а.}$$

Значит, падения напряжений на резисторах:

$$U_1 = IR_1 = 1,5 \cdot 40 = 60 \text{ в;}$$

$$U_2 = IR_2 = 1,5 \cdot 15 = 22,5 \text{ в;}$$

$$U_3 = IR_3 = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ в.}$$

Проверяем правильность решения задачи:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 60 + 22,5 + 37,5 = 120 \text{ в.}$$

**Пример 34.** К цепи, состоящей из последовательно включенных резисторов  $R_1=10$  ом и  $R_2=20$  ом, подведено напряжение 30 в. Определить мощность, рассеиваемую каждым резистором, и мощность, расходуемую источником тока.

**Решение.** Эквивалентное сопротивление цепи

$$R = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ ом.}$$

Ток

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30 \text{ в}}{30 \text{ ом}} = 1 \text{ а.}$$

Мощность рассеяния резистором  $R_1$

$$P_1 = I^2 R_1 = 1^2 \cdot 10 = 10 \text{ вт,}$$

резистором  $R_2$

$$P_2 = I^2 R_2 = 1^2 \cdot 20 = 20 \text{ вт.}$$

Мощность, расходуемая источником тока,

$$P_{\text{ист}} = P_1 + P_2 = 10 + 20 = 30 \text{ вт.}$$

**Пример 35.** К цепи, состоящей из трех последовательно включенных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , подведено напряжение 120 в. Сопротивление  $R_1=10$  ом и  $R_2=30$  ом. Ток, протекающий через резистор  $R_1$ , равен 2 а. Определить: падение напряжений на каждом резисторе; сопротивление  $R_3$ ; общее сопротивление цепи; мощность, рассеиваемую каждым резистором, и мощность, поступающую от источника питания.

Решение. Падения напряжений на резисторах:

$$U_1 = IR_1 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ в};$$

$$U_2 = IR_2 = 2 \cdot 30 = 60 \text{ в};$$

$$U_3 = U - (U_1 + U_2) = 120 - (20 + 60) = 120 - 80 = 40 \text{ в}.$$

Сопротивление

$$R_3 = \frac{U}{I} = \frac{40}{2} = 20 \text{ ом}.$$

Общее сопротивление цепи

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 10 + 30 + 20 = 60 \text{ ом}.$$

Мощность, рассеиваемая резисторами:

$$P_1 = I^2 R_1 = 2^2 \cdot 10 = 40 \text{ вт};$$

$$P_2 = I^2 R_2 = 2^2 \cdot 30 = 120 \text{ вт};$$

$$P_3 = I^2 R_3 = 2^2 \cdot 20 = 80 \text{ вт}.$$

Мощность, поступающая от источника питания,

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 40 + 120 + 80 = 240 \text{ вт}.$$

## 2. Параллельное соединение резисторов

Параллельным называется такое соединение резисторов, когда их начала соединены в одну общую точку, а концы — в другую (рис. 25).

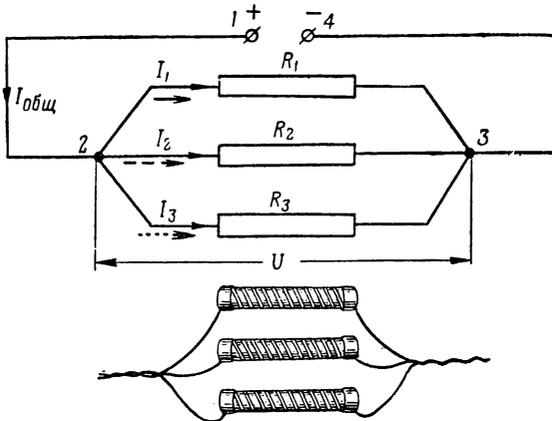


Рис. 25. Параллельное соединение резисторов

Так как резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  непосредственно подключены к зажимам источника тока, то разность потенциалов на их концах одна и та же — та, которую имеет источник. Отсюда следует, что напряжения на зажимах всех резисторов, соединенных параллельно, одинаковы:

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

Примером параллельных цепей служит домашняя электрическая проводка. Лампы, утюг, радиоприемник, телевизор — все подключаются параллельно к сети 127 или 220 в. Все штепсельные розетки в доме имеют одну и ту же разность потенциалов.

Ток ветви равен напряжению, приложенному к цепи, деленному на сопротивление этой ветви.

На рис. 26 напряжение  $U$  приложено к резистору  $R_1$  в точках 1 и 4, а к резистору  $R_2$  — в точках 3 и 6. Через первое со-

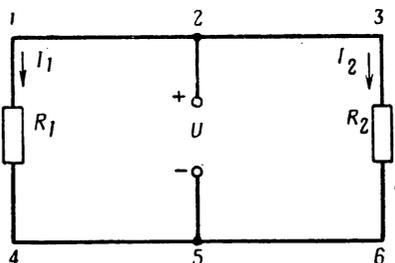


Рис. 26. Ток в каждой параллельной ветви равен приложенному напряжению, деленному на сопротивление ветви

противление протекает ток  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ , а через второе — ток  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ . Чем больше сопротивление ветви, тем меньше ток в ней, и наоборот. Если сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  равны, токи в обеих ветвях одинаковы по величине.

Потребители, которые должны быть подключены параллельно, обычно соединяют между собой, а затем подключают к источнику тока, как показано на рис. 25. Это эквивалентно подключению каждой параллельной ветви непосредственно к источнику напряжения, если провода имеют ничтожно малое сопротивление.

Два провода, которые соединяют все параллельные ветви с зажимами источника напряжения, составляют общую (неразветвленную) часть цепи. На рис. 25 это провода 1—2 и 3—4.

В ветви с резистором  $R_1$  протекает ток  $I_1$ , в ветви с резистором  $R_2$  — ток  $I_2$  и в ветви с резистором  $R_3$  — ток  $I_3$ . В общей цепи ток равен сумме токов ветвей (в любом участке поперечного сечения всей цепи протекает один и тот же ток).

На рис. 25 ток общей цепи 1—2  $I_{\text{общ}}$  в точке 2 разветвляется на токи ветвей  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ . В точке разветвления 3 токи параллельных ветвей складываются, и ток в цепи 3—4 опять равен  $I_{\text{общ}}$ :

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n. \quad (21)$$

Это правило справедливо для любого числа параллельных ветвей с разными или равными сопротивлениями.

Итак, ток каждой ветви равен напряжению источника, деленному на сопротивление ветви; ток в общей цепи равен сумме токов ветвей.

Рассмотрим, как происходит разветвление тока в цепях с резисторами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 27). Поскольку напряжение на зажимах этих резисторов одинаково, то

$$U = I_1 R_1 \text{ и } U = I_2 R_2.$$

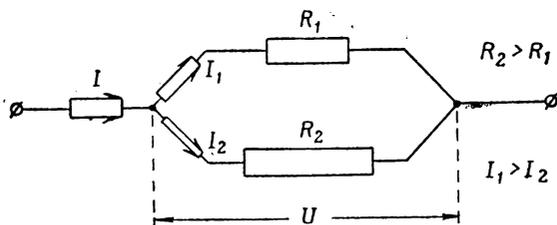


Рис. 27. Параллельное соединение двух резисторов

Левые части этих равенств одинаковы, следовательно, равны и правые части:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

т. е. ток при параллельном соединении резисторов разветвляется обратно пропорционально сопротивлениям ветвей (или прямо пропорционально их проводимостям). Чем больше сопротивление ветви, тем меньше ток в ней, и наоборот.

**Общее сопротивление цепи**

Общее (эквивалентное) сопротивление параллельной цепи можно определить по закону Ома, разделив напряжение на зажимах параллельных сопротивлений на общий ток всех ветвей.

На рис. 28, а пунктиром обозначено эквивалентное сопротивление цепи  $R_3$ , состоящей из двух параллельно включенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

Оно оказывает препятствие току в общей цепи. Поэтому

$$R_3 = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{60}{3} = 20 \text{ ом.}$$

Нагрузка, подсоединенная к источнику напряжения, такая же, как если бы одно эквивалентное сопротивление 20 ом было подключено к зажимам общей линии (рис. 28, б).

Формула для  $R_3$  справедлива для любого числа параллельных сопротивлений любой величины.

Ток в общей цепи представляет собой сумму токов всех параллельных ветвей, т. е. он всегда больше самого большого тока ветви. Наибольший ток имеет ветвь, сопротивление которой наименьшее. Следовательно, общее сопротивление всегда меньше наименьшего сопротивления ветви.

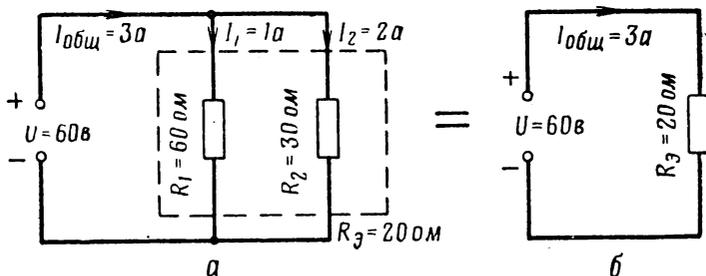


Рис. 28. Замена параллельно включенных резисторов эквивалентным сопротивлением:

а — два параллельно включенных резистора; б — эквивалентное сопротивление

Ток в общей цепи равен  $\frac{U}{R_3}$ , а в каждой ветви  $\frac{U}{R}$ . Поскольку общий ток равен сумме токов ветвей, то

$$\frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n}.$$

Разделив левую и правую части этого равенства на  $U$ , получим

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (22)$$

Таким образом, проводимость всех параллельно соединенных сопротивлений равна сумме их проводимостей.

Чтобы найти эквивалентное сопротивление при параллельном соединении, необходимо сложить проводимости всех участков, т. е. найти общую проводимость. Величина, обратная общей проводимости, и является общим сопротивлением.

Найдем эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 27). Проводимость первой ветви равна  $\frac{1}{R_1}$ , второй —  $\frac{1}{R_2}$ . Значит, общая проводимость

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

Отсюда эквивалентное сопротивление (обычно буква «э» не пишется)

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (23)$$

Таким образом, эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов равно **произведению этих сопротивлений, деленному на их сумму.**

Определим по формуле (23) величину эквивалентного сопротивления схемы (рис. 28):

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{60 \cdot 30}{60 + 30} = \frac{1800}{90} = 20 \text{ ом.}$$

При параллельном соединении  $n$  равных сопротивлений  $R_1$  эквивалентное сопротивление их будет в  $n$  раз меньше, т. е.

$$R = \frac{R_1}{n}.$$

На схеме, изображенной на рис. 29, включено пять резисто-

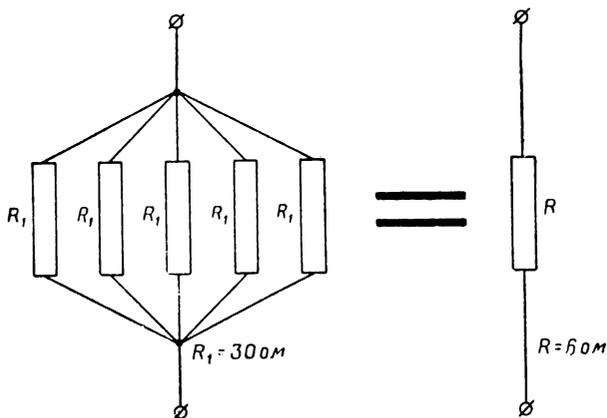


Рис. 29. Параллельное соединение пяти одинаковых резисторов

ров  $R_1$  по 30 ом каждый. Следовательно, общее сопротивление

$$R = \frac{R_1}{5} = \frac{30}{5} = 6 \text{ ом.}$$

**Пример 36.** Электрическая цепь состоит из трех параллельно включенных резисторов  $R_1=24$  ом,  $R_2=12$  ом и  $R_3=8$  ом. Определить эквивалентное сопротивление цепи.

**Решение.** Проводимость

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{24}; \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{12}; \quad \frac{1}{R_3} = \frac{1}{8}.$$

Проводимость всей цепи

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{8} = \frac{6}{24} = \frac{1}{4}.$$

Эквивалентное сопротивление цепи

$$R = 1 : \frac{1}{4} = 4 \text{ ом.}$$

**Пример 37.** Электрическая цепь, состоящая из трех параллельно соединенных резисторов  $R_1=4 \text{ ом}$ ,  $R_2=5 \text{ ом}$  и  $R_3=20 \text{ ом}$ , подключена к источнику тока напряжением  $U=24 \text{ в}$ . Определить общий ток в цепи и токи в отдельных резисторах.

**Решение.** Определяем эквивалентное сопротивление цепи:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{20} = \frac{1}{2};$$

$$R = 1 : \frac{1}{2} = 2 \text{ ом.}$$

Общий ток в цепи

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{2} = 12 \text{ а.}$$

Токи в резисторах

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{24}{4} = 6 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{24}{5} = 4,8 \text{ а}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ а.}$$

Проверяем правильность решения:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 6 + 4,8 + 1,2 = 12 \text{ а.}$$

**Пример 38.** Определить падение напряжения на участке цепи, состоящем из четырех параллельно соединенных резисторов  $R_1$  по  $60 \text{ ом}$  каждый, если общий ток равен  $2 \text{ а}$ .

**Решение.** Общее сопротивление участка цепи

$$R = \frac{R_1}{n} = \frac{60}{4} = 15 \text{ ом.}$$

Падение напряжения на участке цепи

$$U = IR = 2 \cdot 15 = 30 \text{ в.}$$

**Пример 39.** По двум параллельным ветвям с сопротивлениями  $R_1=5 \text{ ом}$  и  $R_2=20 \text{ ом}$  разветвляется ток  $25 \text{ а}$ . Определить ток в каждой ветви.

**Решение.** Ток при параллельном соединении резисторов разветвляется обратно пропорционально сопротивлениям ветвей, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{20}{5} = 4 \text{ или } I_1 = 4I_2.$$

Общий ток

$$I = I_1 + I_2 = 4I_2 + I_2 = 5I_2,$$

а следовательно,

$$I_2 = \frac{I}{5} = \frac{25}{5} = 5 \text{ а и } I_1 = 4I_2 = 4 \cdot 5 = 20 \text{ а.}$$

### Метод общего тока

Иногда легче подсчитать эквивалентное сопротивление методом общего тока, чем по формуле  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ . Подсчитаем

методом общего тока эквивалентное сопротивление параллельно включенных сопротивлений цепи, изображенной на рис. 30.

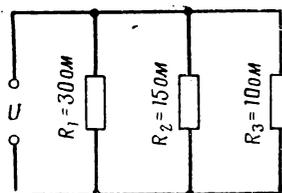


Рис. 30. Подсчет эквивалентного сопротивления параллельной цепи методом общего тока при напряжении 30 в

Хотя приложенное напряжение неизвестно, мы можем принять его любой величины. Обычно проще предположить приложенное напряжение равным наибольшему сопротивлению ветви. Тогда ток одной ветви будет равен 1 а, а токи в других ветвях будут больше.

Итак, берем за приложенное напряжение 30 в. В этом случае токи в ветвях будут 1, 2 и 3 а для резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  соответственно. Ток общей цепи равен 6 а, отсюда  $R_s = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{30}{6} = 5 \text{ ом}$ .

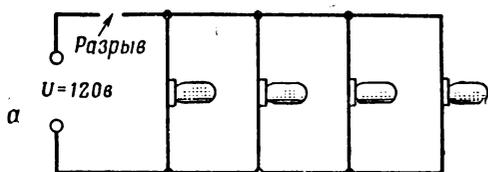
Та же величина получится, если произвести подсчет по формуле  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ . Подсчитайте и убедитесь в этом.

### Общая мощность

Поскольку вся мощность, рассеиваемая сопротивлениями ветвей, должна поступать от источника напряжения, то **общая мощность, вырабатываемая источником питания, равна сумме мощностей, рассеиваемых в отдельных ветвях.**

Общая мощность, вырабатываемая источником питания, как при последовательном, так и при параллельном включении сопротивлений равна сумме мощностей, рассеиваемых нагрузками.

### Влияние разрыва



Если разрыв произойдет в общей цепи (рис. 31, а), то все лампочки погаснут. Если перегорит одна лампочка

Рис. 31. Разрыв в параллельной цепи:

а — в неразветвленной части цепи; б — в одной ветви

(рис. 31, б), т. е. произойдет разрыв одной параллельной ветви, остальные лампочки будут гореть.

### 3. Смешанное соединение резисторов

Смешанным, или последовательно-параллельным, называется такое соединение резисторов, когда в цепи имеются одновременно и параллельное и последовательное их соединения.

На рис. 32 показано самое простое смешанное соединение

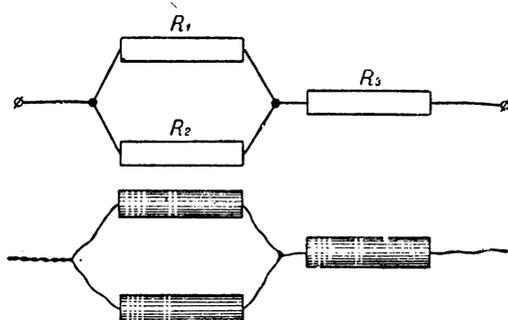


Рис. 32. Смешанное соединение резисторов

резисторов: резисторы  $R_1$  и  $R_2$  включены между собой параллельно, и в то же время они включены последовательно с резистором  $R_3$ . В этом случае эквивалентное сопротивление

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

Последовательно-параллельные цепи используются, когда необходимо получить в цепи различные величины токов и напряжений при одном источнике питания.

Элементы, которые требуют одного и того же тока, соединяются последовательно, а элементы, требующие одного и того же напряжения — параллельно.

Предположим, источник питания имеет напряжение 240 в, а 50-ваттные электрические лампочки — 120 в. Включать такие лампочки параллельно, как обычно, нельзя — они перегорят. Воспользуемся последовательно-параллельным включением. На рис. 33 приведена схема включения шести электрических лампочек. Три параллельные цепи по две лампочки в каждой соединены последовательно. Падение напряжения на зажимах каждой лампочки составляет 120 в. Каждая цепь рассеивает 100 вт мощности.

Часто бывает очень трудно определить, какое сопротивление включено последовательно, а какое параллельно. Признак последовательной цепи — общий ток. Анализ цепи следует начинать с сопротивлений, наиболее удаленных от источника тока.

Преобразуем цепь со смешанным соединением резисторов (рис. 34, а) в эквивалентную последовательную цепь. Резисторы  $R_4$  и  $R_5$  соединены параллельно, их эквивалентное сопротивление  $R_7$  равно 12 ом (рис. 34, б). Резисторы  $R_2$  и  $R_7$  соединены

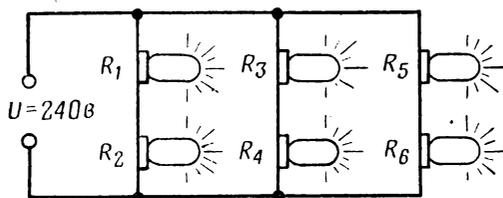


Рис. 33. Три одинаковые последовательные цепи соединены параллельно. Напряжение на зажимах каждой лампы 120 в

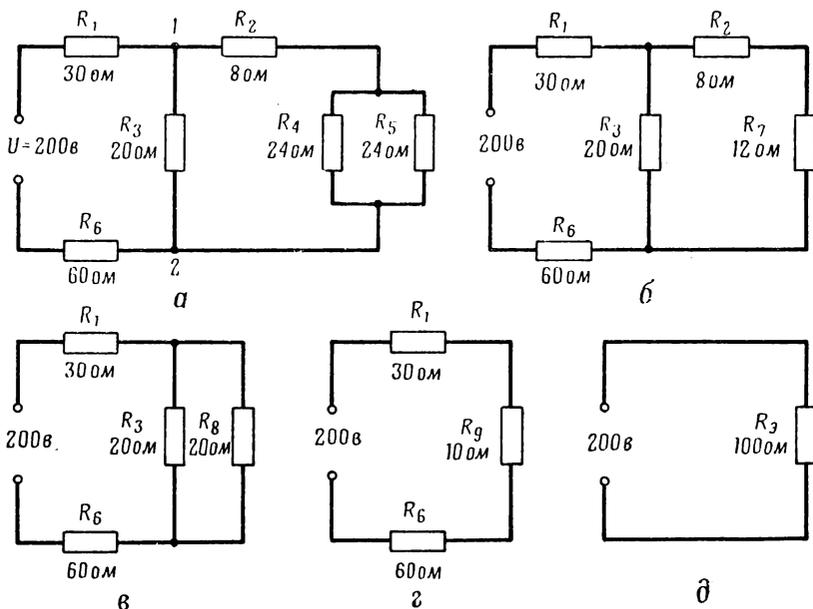


Рис. 34. Преобразование последовательно-параллельной цепи в эквивалентную последовательную:

а — последовательно-параллельная цепь; б —  $R_7 = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$ ; в —  $R_8 = R_2 + R_7$ ;  
 г —  $R_9 = \frac{R_1 R_8}{R_1 + R_8}$ ; д —  $R_9 = R_1 + R_8 + R_6$ .

последовательно, их эквивалентное сопротивление  $R_8$  равно 20 ом (рис. 34, в). Резисторы  $R_3$  и  $R_8$  соединены параллельно, их эквивалентное сопротивление  $R_9$  равно 10 ом (рис. 34, г). Таким образом, мы получили цепь, состоящую из трех последовательно включенных резисторов  $R_1$ ,  $R_9$  и  $R_6$ . Общее эквивалентное сопротивление цепи равно 100 ом (рис. 34, д).

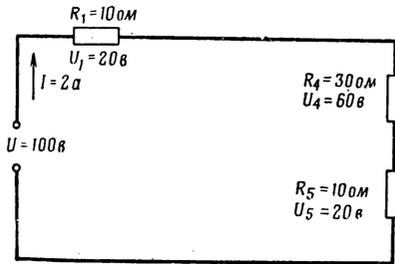
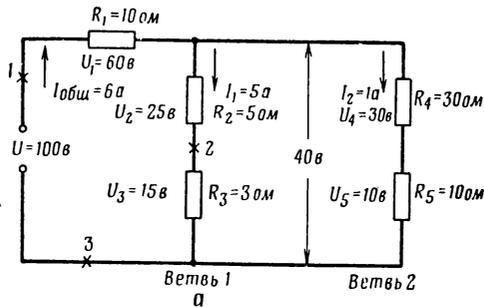
### Правила Кирхгофа

1. В любой последовательной цепи сумма падений напряжений  $IR$  должна равняться сумме напряжений источников (с учетом полярности).

2. В параллельных цепях ток, поступающий в точку разветвления, должен быть равен сумме токов, уходящих из этой точки.

### Влияние разрыва

На рис. 35, *a* приведена цепь со смешанным соединением резисторов. Если произойдет разрыв в общей цепи в точке 1 или 3, то ток прекратится во всей цепи. Если разрыв будет в одной параллельной цепочке, то произойдет перераспределение тока и напряжений в цепи.



*б*

Рис. 35. Разрыв в последовательно-параллельной цепи:

*a* — исправная цепь; *б* — эквивалентная цепь при разрыве в точке 2

Рассмотрим случай разрыва в точке 2. На рис. 35, *б* приведена эквивалентная цепь для этого случая. Сравните, какой ток протекал через резисторы  $R_1$ ,  $R_4$  и  $R_5$  до разрыва и после него. До разрыва через резистор  $R_1$  протекал ток 6 а и падение

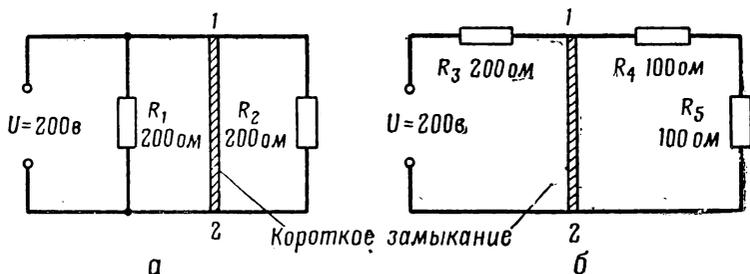
напряжения на нем составляло 60 в. После разрыва падение напряжения на резисторе  $R_1$  уменьшилось до 20 в; изменились ток и падение напряжения также и на резисторах  $R_4, R_5$ .

**Влияние короткого замыкания**

Сопrotивление участка цепи, замкнутого накоротко, практически равно нулю, что вызывает чрезмерно большой ток.

Рассмотрим замкнутую накоротко параллельную цепь, изображенную на рис. 36, а. Сопrotивление между точками 1 и 2 провода практически равно нулю. Поскольку эти точки подключены к зажимам источника напряжения, ток в цепи определяется внутренним сопротивлением источника, которое обычно очень мало. Поэтому ток короткого замыкания может возрасти до нескольких сотен ампер вместо нормальных 2 а. Он может настолько раскалить провода, что загорится изоляция.

В резисторах  $R_1$  и  $R_2$  ток протекать не будет, потому что участок, замкнутый накоротко, включен параллельно им, а поскольку сопротивление короткого замыкания практически равно нулю, то весь ток потечет по этому участку линии, минуя резисторы.



**Рис. 36.** Короткое замыкание:

а — в параллельной цепи; б — в последовательной цепи

сторы. Если вместо резисторов будут электрические лампы, то они погаснут. Закороченные элементы при параллельном включении не разрушаются; они станут нормально работать только после восстановления цепи.

Независимо от числа параллельных ветвей все они замыкаются накоротко, поэтому при закорачивании одной ветви перестает работать вся цепь.

В последовательной цепи не вся цепь может выключиться. На рис. 36, б закороченная цепь между точками 1 и 2 выключает из цепи резисторы  $R_4$  и  $R_5$ , так как напряжение на их зажимах равно нулю. Резистор  $R_3$  остается под напряжением, но в данном примере через него протекает ток 1 а вместо 0,5 а. Если резистор не рассчитан на этот ток, то он перегорит.

#### 4. Типы резисторов

Резисторы делятся на постоянные и переменные. В свою очередь в каждой из этих групп они подразделяются на проволочные и непроволочные.

Очень часто требуется регулировать силу **Переменные резисторы** тока или напряжение в цепи. Для этой цели применяются устройства — **реостаты и потенциометры**. Реостат дает возможность изменять сопротивление электрической цепи и тем самым регулировать в ней величину тока, а потенциометр — величину напряжения.

Принцип действия реостатов основан на использовании известной нам зависимости сопротивления проводников от их длины.

В проволочных реостатах токоведущей частью служит проволока с высоким удельным сопротивлением, а в непроволочных — токопроводящий слой специального состава, нанесенный на основание из изоляционного материала. Проволочные рео-

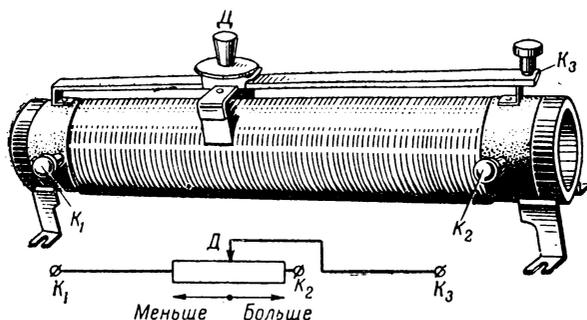


Рис. 37. Внешний вид и условное изображение реостата

статы стабильнее непроволочных, устойчивее при перегрузках и потому широко применяются в цепях питания.

Реостаты бывают со скользящим контактом и ступенчатые.

**Реостаты со скользящим контактом.** Наибольшее распространение получили реостаты, представляющие собой металлическую спираль, намотанную на изолирующий каркас. По спирали перемещается ползунок, благодаря чему меняется длина спирали, а следовательно, и сопротивление, включенное в цепь. На рис. 37 даны внешний вид и условное изображение реостата. При перемещении движка *Д* вправо сопротивление увеличивается, при перемещении влево — уменьшается.

На рис. 38, *а* показана схема включения реостата для регулирования величины тока в цепи; на рис. 38, *б* — для регулирования величины напряжения, подводимого к нагрузке.

В реостатах используется специальная проволока, изготов-

ленная из сплавов различных металлов или из чистых металлов, имеющих высокое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент, т. е. способность выдерживать продолжительный нагрев.

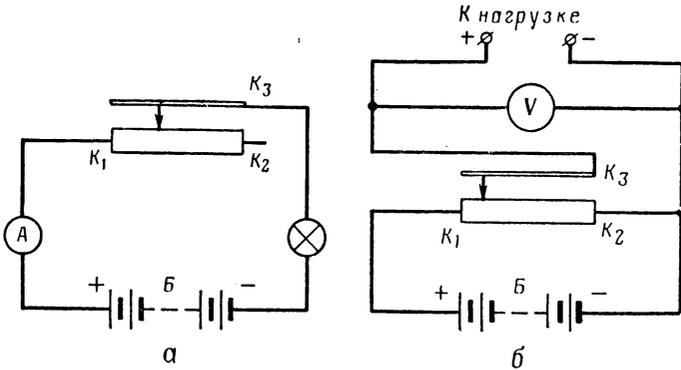


Рис. 38. Включение реостата:

а — для изменения величины тока; б — для изменения величины напряжения (в этом случае реостат называется потенциометром)

В радиотехнике широко распространены непроволоочные реостаты, выполненные в виде пластинки кольцевой формы с нанесенным на ней тонким слоем токопроводящего материала (рис. 39). Величину сопротивления (которая измеряется килоомами и мегомами) изменяют поворотом ручки реостата.

Реостаты со скользящим контактом позволяют плавно менять сопротивление электрической цепи.

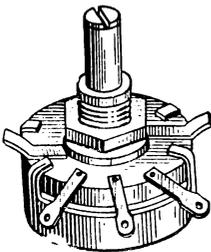


Рис. 39. Непроволоочный реостат

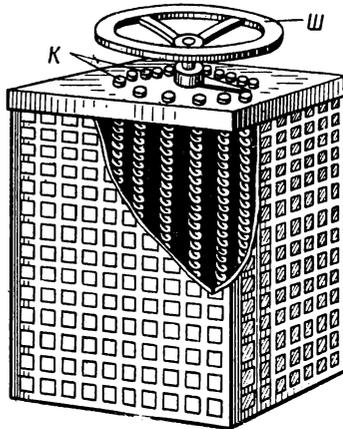


Рис. 40. Ступенчатый реостат:  
К — контакты; Ш — штурвал

**Ступенчатые реостаты.** В ступенчатых реостатах сопротивление меняется не постепенно, а скачкообразно. Ступенчатый реостат, приведенный на рис. 40, состоит из ряда одинаковых

сопротивлений (секций), присоединенных к контактным пластинам  $\kappa$ . Для включения в цепь различного количества секций служит штурвал  $\text{Ш}$ .

Ступенчатые реостаты широко применяются, например, в качестве пусковых для электродвигателей.

При измерениях часто используются так называемые магазины сопротивлений (рис. 41), которые с достаточно высокой

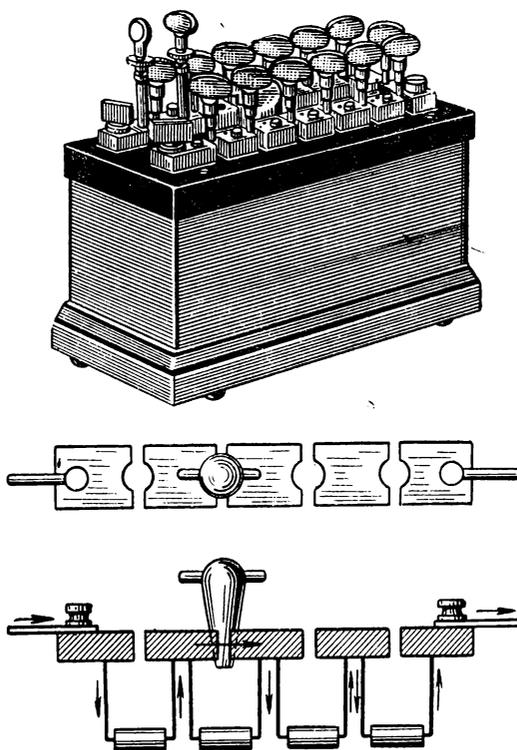


Рис. 41. Магазин сопротивлений  
(внешний вид и схема)

степенью точности дают возможность установить необходимое сопротивление. Набор сопротивлений строго определенной величины обычно помещается в ящике. Сопротивления соединяются между собой медными пластинами, имеющими гнезда для штепселей. Если в гнездо вставить штепсель, то подключенное к пластинам сопротивление замыкается накоротко. У каждого гнезда имеется число, показывающее, какое сопротивление дает магазин, если из данного гнезда вынуть штепсель.

## Постоянные резисторы

Проволочные постоянные резисторы используются, когда мощность рассеяния в резисторе примерно 5 *вт* или более. Если мощность рассеяния 2 *вт* или менее, то предпочтительнее непроволочные резисторы, так как они меньше по размерам и дешевле.

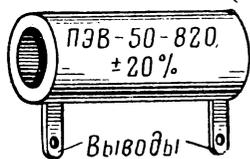


Рис. 42. Резистор ПЭВ

На рис. 42 показан проволочный резистор типа ПЭВ — постоянный, эмалированный, влагостойкий.

Недостаток проволочных резисторов — зависимость их сопротивления от частоты тока (см. гл. 5 и 6).

Номинальная мощность (понятие дается ниже) проволочных резисторов с сопротивлением приблизительно от 1 *ом* до нескольких тысяч омов — от 5 *вт* до нескольких сот ватт.

**Непроволочные резисторы.** Эти резисторы весьма широко распространены. Достоинства их — небольшие размеры, незначительные емкость и индуктивность (см. гл. 6 и 8), простота изготовления, небольшая стоимость.

Типовые непроволочные резисторы выпускаются величиной от 10 *ом* до десятков мегом. Номинальная мощность их обычно 0,25; 0,5; 1 и 2 *вт*.

Среди непроволочных часто применяются углеродистые резисторы. Их изготавливают из измельченного угля или графита, смешанного с порошком изоляционного материала в определенной пропорции, зависящей от величины сопротивления. Рези-

Резисторы постоянной величины изготавливаются на различные номинальные значения сопротивлений — от нескольких омов до нескольких мегомов.

**Проволочные резисторы.** Проволоку из сплава металлов высокого удельного сопротивления (нихрома, константана, манганина) наматывают вокруг основания из изоляционного материала (форфора, цемента, бакелита, прессованной бумаги). Сверху обмотку покрывают стекловидной эмалью, которая служит изолирующим

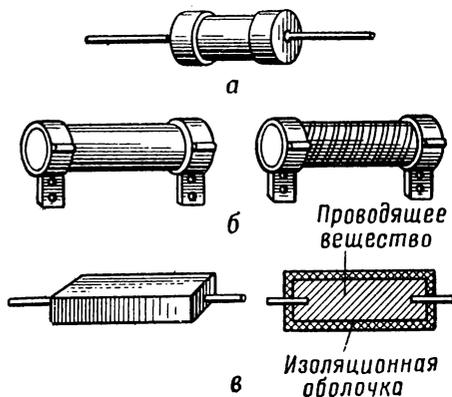


Рис. 43. Непроволочные резисторы: а — МЛТ; б — ВС; в — ТВО

стор обычно помещают в футляр для изоляции и механической прочности.

На рис. 43 приведены некоторые типы непроволочных резисторов.

Кроме необходимой величины сопротивления, резистор должен иметь достаточную номинальную мощность, чтобы при рассеивании мощности он не перегревался. Углеродистые резисторы допускают максимальную температуру нагрева  $85^{\circ}\text{C}$ . При перегревании они начинают «потеть» пузырьками жидкости на изолирующей оболочке. Проволочные резисторы допускают максимальную температуру нагрева  $300^{\circ}\text{C}$ . При перегревании они могут заметно изменить свое сопротивление или перегореть.

Большое напряжение в проволочных резисторах может вызвать дугу между витками, а в углеродистых резисторах — между зернами углерода.

Вначале выбирают величину необходимого сопротивления, а затем определяют мощность, которую должен рассеивать резистор. На рис. 44, а изображен потребитель электрической энергии с сопротивлением  $R_1 = 1100\ \text{ом}$ . Требуется подобрать такое

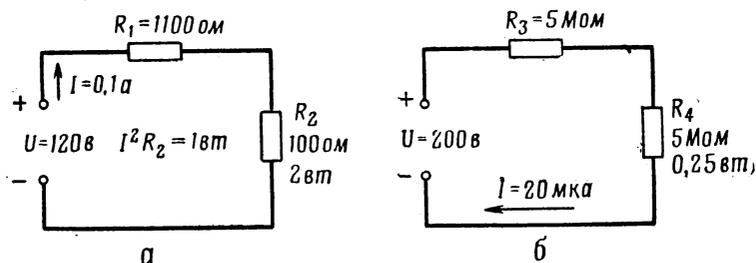


Рис. 44. Подбор дополнительных сопротивлений:

а — сопротивление  $R_2$ , рассеивая мощность 1 вт, работает с коэффициентом запаса 2; б — сопротивление  $R_4$  рассеивает 0,004 вт, а используется сопротивление с мощностью рассеяния 0,25 вт

дополнительное сопротивление  $R_2$ , чтобы при напряжении источника тока 120 в в цепи протекал ток 0,1 а. Общее сопротивление должно составлять 1200 ом, т. е.  $R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,1} = 1200\ \text{ом}$ . Таким образом, сопротивление дополнительного резистора равно 100 ом; он включается последовательно с потребителем.

Теперь надо определить, какую мощность должен рассеивать резистор:  $I^2R = 0,1^2 \cdot 100 = 0,01 \cdot 100 = 1\ \text{вт}$ . Однако берется резистор с номинальной мощностью рассеяния 2 вт, так как перекрытие мощности в два раза — обычное для углеродистых резисторов, при котором они не перегреваются. Резисторы с большей номинальной мощностью рассеяния при той же величине сопротивления гарантируют более длительную и надежную

работу цепи, но они могут оказаться неподходящими из-за больших размеров. Большую мощность рассеяния имеют проводочные резисторы, размеры которых значительно больше.

Проволочные резисторы могут иметь мощность рассеяния, близкую к номинальной вследствие более высокой максимальной температуры работы по сравнению с углеродистыми сопротивлениями.

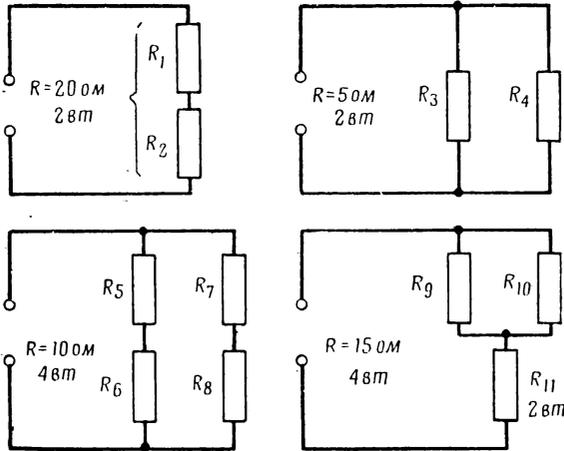


Рис. 45. Четыре примера различного включения сопротивлений для получения желаемой величины сопротивления с различной номинальной мощностью рассеяния. Величина каждого сопротивления 10 Ом, номинальная мощность 1 Вт (за исключением  $R_{11}$ , номинальная мощность которого 2 Вт)

Рассчитаем дополнительный резистор  $R_4$  для цепи, показанной на рис. 44, б. При напряжении 200 В ток в цепи должен быть равен 20 мкА. Тогда общее сопротивление цепи  $R_{\text{общ}} = \frac{U}{I} = \frac{200}{20 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Мом}$ . Так как  $R_3 = 5 \text{ Мом}$ , то сопротивление дополнительного резистора  $R_4$  должно быть равно 5 Мом. В этом резисторе будет рассеиваться мощность  $I^2 R = (20 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 5 \cdot 10^6 = 400 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^6 = 2000 \cdot 10^{-6} = 0,002 \text{ Вт}$ , или 2 мВт. Берем резистор с наименьшей мощностью рассеяния 0,25 Вт. Он будет работать с очень большим запасом прочности.

В некоторых случаях несколько резисторов соединяют вместе — последовательно, параллельно или смешанно, чтобы получить желаемую величину сопротивления, соответствующую большей номинальной мощности рассеяния. На рис. 45 приведены четыре примера различного включения резисторов. Сопротивление каждого резистора равно 10 Ом, номинальная мощность рассеяния — 1 Вт (за исключением резистора  $R_{11}$ , который имеет номинальную мощность рассеяния 2 Вт). Общее сопро-

тивление зависит от способа включения, общая номинальная мощность рассеяния равна сумме номинальных мощностей соединенных резисторов.

#### Специальные резисторы

**Пленочные резисторы.** Эти резисторы имеют кристаллическую углеродистую пленку, нанесенную на керамическую пластинку. Они имеют большую точность и стабильность при изменении температуры и влажности.

**Резисторы высокого напряжения.** Слой углеродистых соединений наносится на длинные керамические трубки.

**Катушечные проволочные резисторы.** Эти резисторы часто используются в качестве шунтов и добавочных сопротивлений в измерительных приборах.

**Варисторы.** Это резисторы, величины которых меняются в зависимости от приложенного напряжения. Они могут использоваться для контроля.

**Термисторы.** Эти сопротивления меняют величину в зависимости от температуры.

#### Неисправности резисторов

Наиболее частая неисправность в резисторе — разрыв. Он образуется в результате длительной работы резистора. При включении тока резистор расширяется, при выключении сжимается, и после нескольких лет работы может наступить разрыв. Он может получиться также из-за механической тряски.

Чаще всего выходят из строя резисторы, работающие в цепях с большими мощностями, потому что они сильно нагреваются. Срок службы таких резисторов можно значительно увеличить, если их брать с номинальной мощностью в два раза или еще большей по сравнению с рассеиваемой.

Чрезмерный ток может вызвать сгорание резисторов: он обуглится, рассыплется и разорвет цепь. Обычно такой ток появляется вследствие короткого замыкания в последовательно-параллельной цепи.

Величина сопротивления углеродистых резисторов может заметно меняться. Так как уголь имеет отрицательный температурный коэффициент, то сопротивление уменьшается при повышении температуры. При нормальной работе сопротивление резистора находится в пределах допуска.

Если резистор рассеивает мощность больше номинальной, то при длительной работе он кристаллизуется и его сопротивление намного возрастает.

#### Измерение сопротивления

Поскольку омметр имеет собственный источник напряжения, его используют для измерения резисторов без постороннего источника. Омметр подключают к зажимам резистора. При разрыве резистора показание омметра равно бесконечности. Следует учитывать, что если измерять, напри-

мер, сопротивление  $10 \text{ Мом}$  и  $10 \text{ ом}$  на шкале  $1 \text{ Мом}$ , то омметр в первом случае покажет бесконечность, а во втором — нуль. Поэтому, сопротивления надо измерять по соответствующим шкалам.

При измерении сопротивления в схеме надо убедиться, что в цепи нет параллельно включенных элементов.

### *Краткие выводы*

#### Для последовательных цепей

1. Во всех элементах цепи ток один и тот же.
2. Общее сопротивление цепи равно сумме входящих в нее сопротивлений.
3. Приложенное к цепи напряжение равно сумме падений напряжений на ее участках, или общее падение напряжений равно приложенному напряжению.
4. Полярность падения напряжения на каждом резисторе такова: конец, расположенный ближе к «плюсу» источника напряжения, имеет по сравнению с другим концом более положительный потенциал.
5. Сумма мощностей, потребляемых (рассеиваемых) в резисторах, равна мощности, которая поступает от источника тока.

#### Для параллельных цепей

6. Напряжение на зажимах всех нагрузок одно и то же.
  7. Ток в каждой ветви равен напряжению на зажимах ветви, деленному на ее сопротивление.
  8. Ток в одной ветви не зависит от тока в других ветвях.
  9. Ток в общей цепи равен сумме токов всех параллельных ветвей.
  10. Эквивалентное сопротивление параллельной цепи меньше наименьшего сопротивления ветви.  
Эквивалентное сопротивление двух резисторов равно произведению их сопротивлений, деленному на их сумму.
  - Для любого числа резисторов с равными сопротивлениями эквивалентное сопротивление равно сопротивлению одной ветви, деленному на число ветвей.
  11. Общая мощность, затрачиваемая источником питания, равна сумме мощностей, рассеиваемых в ветвях цепи.
  12. Обрыв в одной ветви вызывает прекращение в ней тока; в других ветвях ток остается прежним.
- Обрыв в общей цепи вызывает прекращение тока во всех ветвях.

### 13. Сравнение последовательных и параллельных цепей:

Последовательная цепь	Параллельная цепь
<p>1. Ток один и тот же во всех элементах цепи</p> <p>2. Падение напряжения на зажимах каждого сопротивления равно <math>IR</math></p> <p>3. Приложенное к цепи напряжение равно сумме падений напряжений</p> <p>4. <math>R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n</math></p> <p>5. Обрыв в одном месте цепи вызывает прекращение тока во всей цепи</p> <p>6. Короткое замыкание на участке цепи вызывает увеличение тока в цепи</p>	<p>1. Напряжение одно и то же на зажимах всех ветвей</p> <p>2. Ток в каждой ветви равен</p> $\frac{U}{R}$ <p>3. Ток в общей цепи равен сумме токов ветвей</p> <p>4. <math>\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}</math></p> <p>5. Обрыв в одной ветви не препятствует прохождению тока в остальных ветвях</p> <p>6. Короткое замыкание одной ветви соединяет накоротко все ветви и вызывает чрезмерно большой ток в источнике напряжения</p>

14. Резисторы бывают двух основных типов: углеродистые (угольные) и проволочные. Сравнение этих резисторов приводится ниже:

Угольные резисторы	Проволочные резисторы
<p>1. Изготавливаются из угольных зерен</p> <p>2. Величина сопротивления — до 20 <i>Мом</i></p> <p>3. Применяются в цепях малых токов; номинальная мощность рассеивания 0,25 — 2 <i>вт</i></p> <p>4. Применяются как потенциометры сопротивлением до 5 <i>Мом</i> для контроля громкости и тона в приемниках</p>	<p>1. Изготавливаются из проволоки в форме спирали</p> <p>2. Величина сопротивления — доли ома</p> <p>3. Применяются в цепях больших токов; номинальная мощность рассеивания 5—100 <i>вт</i> и выше</p> <p>4. Применяются как низкоомные реостаты; как потенциометры сопротивлением до 50 <i>ком</i> для делителей напряжения в источниках питания</p>

15. Номинальная мощность угольных резисторов зависит главным образом от их размеров. Резисторы больших размеров способны рассеивать большую мощность.

16. Для нормальной безопасной работы угольных резисторов номинальная мощность должна быть примерно в два раза выше мощности рассеяния  $I^2R$ . Номинальная мощность не влияет на величину тока в цепи — она определяет только предельный ток, при котором сопротивление работает без чрезмерного нагрева.

17. Наиболее частая неисправность в резисторах — обрыв. На концах оборванного резистора омметр показывает бесконечно большое сопротивление (если нет параллельных цепей).

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Три резистора включены последовательно. Если через резистор  $R_3$  протекает ток  $2\text{ а}$ , то через резистор  $R_1$  будет протекать ток:

а —  $\frac{1}{3}\text{ а}$ ; б —  $\frac{1}{2}\text{ а}$ ; в —  $2\text{ а}$ ; г —  $6\text{ а}$ .

2. Резисторы  $10$ ,  $20$  и  $30\text{ ом}$ , соединенные последовательно, подключены к зажимам источника тока. На зажимах резистора в  $20\text{ ом}$  падение напряжения  $40\text{ в}$ . Приложенное напряжение равно:

а —  $40\text{ в}$ ; б —  $80\text{ в}$ ; в —  $120\text{ в}$ ; г —  $180\text{ в}$ .

3. Резисторы  $6$  и  $12\text{ ом}$  включены последовательно. Через резистор  $6\text{ ом}$  протекает ток  $50\text{ ма}$ . Падение напряжения на зажимах двух резисторов равно:

а —  $180\text{ в}$ ; б —  $18\text{ в}$ ; в —  $9\text{ в}$ ; г —  $0,9\text{ в}$ .

4. Резистор  $50\text{ ом}$ , соединенный последовательно с резистором неизвестного сопротивления, подключен к зажимам источника тока  $15\text{ в}$ . Через резистор  $50\text{ ом}$  протекает ток  $0,2\text{ а}$ . Величина неизвестного сопротивления:

а —  $100\text{ ом}$ ; б —  $50\text{ ом}$ ; в —  $25\text{ ом}$ ; г —  $10\text{ ом}$ .

5. Резисторы  $50$ ,  $100$ ,  $150$  и  $200\text{ ом}$ , соединенные последовательно, подключены к зажимам источника напряжения  $100\text{ в}$ . Ток в цепи равен:

а —  $20\text{ ма}$ ; б —  $100\text{ ма}$ ; в —  $200\text{ ма}$ ; г —  $1000\text{ ма}$ .

6. В параллельной цепи:

а — ток ветви равен общему току; б — сумма токов ветвей равна общему току; в — ток ветви прямо пропорционален его сопротивлению; г — токи ветвей взаимно компенсируются.

7. В параллельной цепи, когда несколько резисторов подключены к зажимам источника тока:

а — напряжение ветви равно общему напряжению; б — напряжение ветви зависит от ее тока; в — напряжение ветви зависит от ее сопротивления; г — напряжения ветвей добавляются к общему напряжению.

8. В параллельной цепи:

а — сопротивление ветви зависит от тока ветви; б — сумма сопротивлений ветвей равна общему сопротивлению; в — общее сопротивление равно величине, обратной сумме проводимостей ветвей; г — сопротивление ветви определяется падением напряжения в ней.

9. Напряжение  $120\text{ в}$  приложено к зажимам шести резисторов по  $60\text{ ом}$ , соединенным параллельно. Через каждый резистор протекает ток:

а —  $2\text{ а}$ ; б —  $20\text{ а}$ ; в —  $60\text{ а}$ ; г —  $120\text{ а}$ .

10. Три резистора по  $3\text{ ом}$  соединены параллельно. Их эквивалентное сопротивление равно:

а —  $1\text{ ом}$ ; б —  $\frac{1}{3}\text{ ом}$ ; в —  $3\text{ ом}$ ; г —  $9\text{ ом}$ .

11. Резистор в  $1\text{ ом}$ , включенный параллельно с резистором в  $2\text{ ом}$ , образует эквивалентное сопротивление:

а —  $\frac{2}{3}\text{ ом}$ ; б —  $1\text{ ом}$ ; в —  $2\text{ ом}$ ; г —  $3\text{ ом}$ .

12. Если каждый из двух резисторов, соединенных параллельно, рассеивает  $10\text{ вт}$ , то общая мощность, отдаваемая источником, равна:

а —  $5\text{ вт}$ ; б —  $10\text{ вт}$ ; в —  $20\text{ вт}$ ; г —  $100\text{ вт}$ .

13. В параллельной цепи, к которой приложено напряжение 20 в, две ветви имеют общий ток 5 а. Сопротивление одной ветви 5 ом, а другой: а — 5 ом; б — 20 ом; в — 25 ом; г — 100 ом.

14. Три электрические лампочки мощностью 100 вт подсоединены параллельно к сети 120 в. Если одна лампочка перегорела, то сколько лампочек будет гореть?

— а — ни одной; б — одна; в — две; г — все.

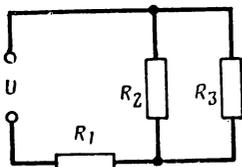


Рис. 46

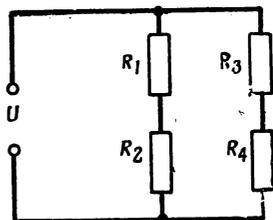


Рис. 47

15. В смешанной цепи с 12 резисторами три из них находятся в одной параллельной группе. Эти три резистора должны иметь:

а — один и тот же ток; б — одинаковое падение напряжения  $IR$ ; в — тот же ток, что и в источнике питания; г — падение напряжения  $IR$ , равное приложенному напряжению.

16. В смешанной цепи (рис. 46) резисторы включены так:

а —  $R_1$  последовательно с  $R_2$ ; б —  $R_2$  последовательно с  $R_3$ ; в —  $R_2$  параллельно с  $R_3$ ; г —  $R_1$  параллельно с  $R_3$ .

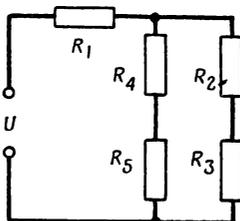


Рис. 48

17. В смешанной цепи (рис. 47) резисторы включены так:

а —  $R_1$  параллельно с  $R_3$ ; б —  $R_2$  параллельно с  $R_4$ ; в —  $R_1$  последовательно с  $R_2$ ; г —  $R_2$  последовательно с  $R_4$ .

18. Если резистор  $R_4$  (рис. 48) разомкнут, а все остальные исправны, ток:

а — в резисторе  $R_1$  равен нулю; б — в резисторе  $R_2$  равен нулю; в — в резисторе  $R_3$  равен нулю; г — будет меньше в резисторе  $R_1$ .

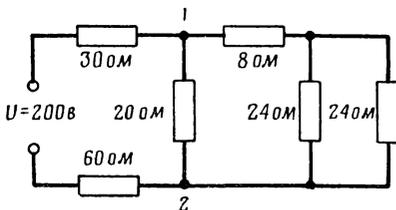


Рис. 49

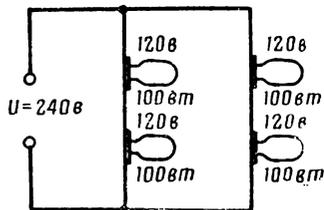


Рис. 50

19. В смешанной цепи (рис. 49) величина тока, входящего в точку  $I$  и выходящего из точки  $2$ , равна:

а —  $0,5$  а; б —  $1$  а; в —  $2$  а; г —  $4$  а.

20. В цепи (рис. 50) включены четыре электрические лампочки на  $120$  в,  $100$  вт каждая. Сопротивление одной лампочки равно:

а —  $72$  ом; б —  $100$  ом; в —  $120$  ом; г —  $144$  ом.

21. Какие из следующих величин сопротивления и мощности рассеяния типичны для проволочного резистора?

а —  $1$  Мом,  $1/3$  вт; б —  $500$  ом,  $1$  вт; в —  $50\,000$  ом,  $1$  вт; г —  $10$  ом,  $50$  вт.

22. Какие из следующих величин сопротивления и мощности рассеяния типичны для угольного резистора?

а —  $100\,000$  ом,  $1$  вт; б —  $10\,000$  ом,  $10$  вт; в —  $5$  ом,  $5$  вт; г —  $1000$  ом,  $100$  вт.

23. Два резистора по  $1000$  ом,  $1$  вт соединены параллельно. Их общее сопротивление и номинальная мощность:

а —  $500$  ом,  $1$  вт; б —  $500$  ом,  $2$  вт; в —  $1000$  ом,  $2$  вт; г —  $2000$  ом,  $2$  вт.

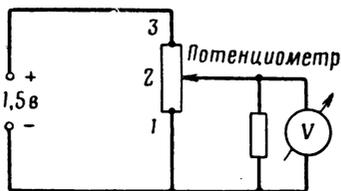


Рис. 51

24. Резистор должен быть подключен к зажимам источника напряжения  $45$  в так, чтобы получить ток в цепи  $1$  ма. Требуемое сопротивление с подходящей номинальной мощностью:

а —  $4,5$  ом,  $1$  вт; б —  $45$  ом,  $10$  вт; в —  $450$  ом,  $2$  вт; г —  $45\,000$  ом,  $1/3$  вт.

25. Когда переменный контакт потенциометра (рис. 51) дойдет до точки  $1$ , показания вольтметра будут равны:

а — нулю; б —  $1/3$  в; в —  $3/4$  в; г —  $1,5$  в.

26. При подключении омметра к зажимам оборванного резистора показания прибора:

а — равно нулю; б — равно бесконечности; в — высокое, но в пределах допустимого; г — низкое, но не равно нулю.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Приведите три правила, которые относятся к току, напряжению и сопротивлению в последовательной цепи.

2. Нарисуйте схему последовательного включения резисторов  $10$ ,  $20$  и  $30$  ом.

а) Определите сопротивление общей цепи. б) Какой ток протекает в каждом резисторе, если подключить источник напряжения  $120$  в? в) Найдите падение напряжения на зажимах каждого резистора. г) Найдите мощность, рассеиваемую в каждом резисторе.

3. Укажите, как распределяются напряжение и ток в параллельной цепи.

4. Нарисуйте схему подключения параллельно соединенных резисторов  $R_1=30$  ом и  $R_2=90$  ом к батарее  $90$  в.

а) Каково напряжение на зажимах  $R_1$  и  $R_2$ ? б) Определите величину тока в резисторах  $R_1$  и  $R_2$ . в) Найдите величину тока общей цепи. г) Определите величину эквивалентного сопротивления. д) Определите мощность, которую расходует батарея.

5. Нарисуйте схему параллельной цепи с тремя ветвями резисторов. Напряжение, приложенное к цепи, равно  $18\text{ в}$ ; ток в каждой ветви  $2\text{ а}$ .

а) Каков ток в общей цепи? Найдите величину эквивалентного сопротивления двумя способами.

6. Резисторы  $30$ ,  $15$  и  $10\text{ ом}$  соединены параллельно. Через резистор  $30\text{ ом}$  протекает ток  $1\text{ а}$ .

а) Какое напряжение приложено к зажимам всех ветвей? б) Какой ток протекает через резисторы  $15$  и  $10\text{ ом}$ ?

7. При каком условии ток в параллельных ветвях один и тот же и при каком — разный? Почему во втором случае ток разный, хотя напряжение одно и то же?

8. Предположим, что резистор  $R_1$  (рис. 52) вышел из строя.

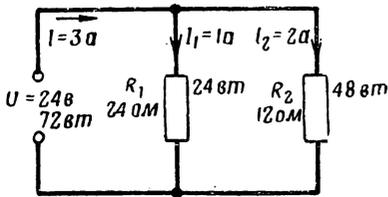


Рис. 52

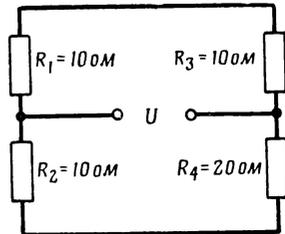


Рис. 53

а) Каков ток в ветви с резистором  $R_1$ , в ветви с резистором  $R_2$  и в общей цепи? б) Чему равно эквивалентное сопротивление цепи? в) Какова мощность, расходуемая источником питания?

9. Как соединить три одинаковых резистора, чтобы эквивалентное сопротивление было в полтора раза больше одного из них?

10. В схеме рис. 53:

а) Почему резистор  $R_1$  включен последовательно с  $R_3$ , а не с  $R_2$ ?

б) Каково общее сопротивление цепи, подключенной к источнику питания?

11. Покажите на схеме, как подключить к зажимам источника тока напряжением  $120\text{ в}$  две  $120\text{-в}$  и две  $60\text{-в}$  электрические лампочки (одинаковой мощности).

12. Ток  $1\text{ ма}$  протекает через угольный резистор на  $1\text{ Мом}$ ,  $2\text{ вт}$ . Какая мощность рассеивается в виде тепла? Какая максимальная мощность может быть рассеяна без чрезмерного нагрева резистора?

13. Резистор должен быть подключен к зажимам  $10\text{ в}$  аккумулятора для получения тока  $1\text{ ма}$ .

Какой величины требуется сопротивление резистора, какова его мощность рассеяния и номинальная мощность? Можно ли использовать угольный резистор?

14. Резисторы  $0,1\text{ Мом}$ ,  $5000\text{ ом}$  и  $60\text{ ком}$ , соединенные параллельно, подключены к источнику напряжения  $105\text{ в}$ .

Нарисуйте схему включения, определите эквивалентное сопротивление, общий ток и ток каждой ветви.

15. Радиоприемник потребляет мощность  $55\text{ вт}$ ; когда работает от сети  $110\text{ в}$ . Какой резистор необходимо включить дополнительно при работе от сети  $220\text{ в}$ ? Какова мощность рассеяния этого резистора?

16. Нити ламп батарейного приемника подключены параллельно к батарее  $1,4\text{ в}$ . При этом напряжении ток накала ламп равен  $50$ ,  $50$  и  $100\text{ ма}$ .

Какой ток должна давать батарея? Каково эквивалентное сопротивление нитей?

17. Нити трех ламп батарейного приемника подключены последовательно к источнику напряжения  $4,2$  в. Для накала нитей двух ламп требуется ток  $50$  ма при напряжении  $1,4$  в на каждую лампу; для накала третьей лампы требуется только  $25$  ма.

Определить величину шунтирующего сопротивления для третьей лампы.

18. Амперметр должен быть включен в цепь, где протекает ток  $50$  ма. Прибор рассчитан на ток  $1$  ма (сопротивление катушки  $100$  ом).

Какой ток должен протекать через шунт и какова величина его сопротивления?



### 1. Магнетизм

#### Природные и искусственные магниты

**Природный магнит** Природным (естественным) магнитом называется кусок руды, обладающий свойством притягивать к себе стальные предметы. Это свойство, называемое **магнетизмом**, имеет магнитный железняк, представляющий собой химическое соединение железа с кислородом. Наша Земля также представляет собой громадный естественный магнит с наибольшей силой притяжения на северном и южном полюсах.

**Искусственный магнит** Свойство магнитного железняка притягивать к себе стальные предметы можно сообщить стальным стержням, натерев их естественным магнитом. После такого намагничивания (намагничивания) стальной стержень становится **искусственным постоянным магнитом**, имеющим те же свойства, что и природный магнит. Искусственные магниты получили широкое распространение. В зависимости от назначения они бывают самой разнообразной формы (рис. 54).

На рис. 55 изображен магнит с притянутыми к его концам стальными опилками. Наиболее сильное притяжение происходит у противоположных концов, называемых полюсами магнита. Условная линия, проходящая через середину магнита, где не проявляются магнитные свойства, называется **нейтральной линией**.

**Северный и южный магнитные полюсы** Концы любого свободно подвешенного магнита устанавливаются в пространстве в строго определенном направлении. Один конец указывает на север, а другой — на юг. Конец, обращенный к северу, называется **северным полюсом** магнита и обозначается буквой С или N, а конец, обращенный к югу, называется **южным полюсом** и обозначается буквой

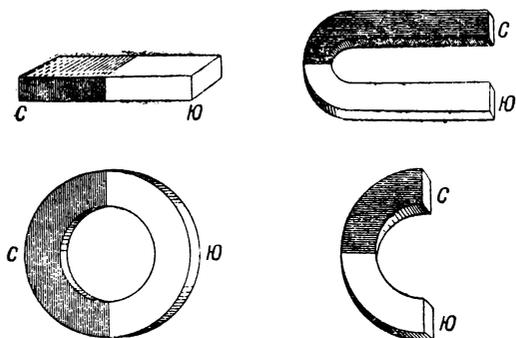


Рис. 54. Искусственные магниты

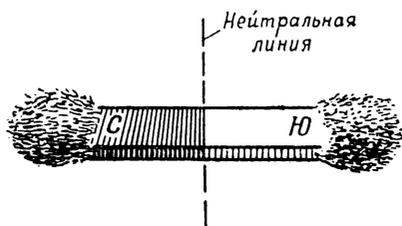


Рис. 55. Стальные опилки наиболее сильно притягиваются у полюсов магнита

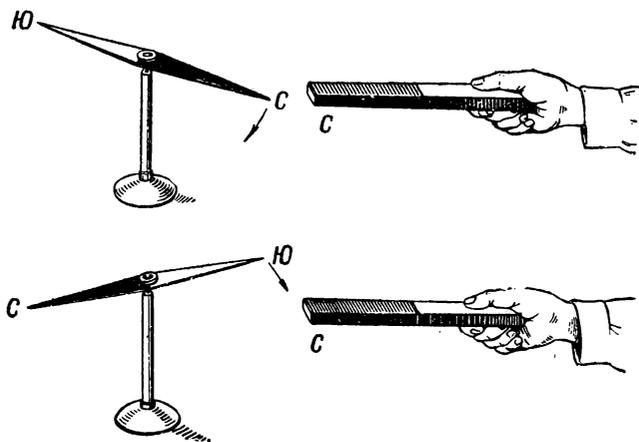


Рис. 56. Взаимодействие полюсов магнита

Ю или S. На свойстве магнитов поворачиваться в определенном направлении основано устройство компаса.

#### Взаимодействие полюсов магнита

Если к магнитной стрелке, укрепленной на острие (рис. 56), поднести постоянный магнит, то северный ее конец начнет отталкиваться от северного полюса магнита, а южный — притягиваться к нему, т. е. взаимодействие полюсов магнита таково: **одноименные полюсы взаимно отталкиваются, разноименные — притягиваются.**

Сила, с которой один магнит действует на другой, называется **магнитной силой**. Магнитная сила имеет в каждой точке пространства определенное направление и величину.

Сила взаимодействия между двумя магнитными полюсами прямо пропорциональна магнитным массам, заключенным в полюсах, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (24)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — магнитные массы одного и другого полюсов;  
 $r$  — расстояние между полюсами магнитов.

Из этой формулы можно определить единицу магнитной массы. Предположим, что  $m_1 = m_2 = 1$ , а  $f = 1$  дине. Тогда за единицу магнитной массы следует принять такую массу, которая действует на равную себе магнитную массу, находящуюся на расстоянии 1 см от нее в пустоте, с силой в 1 дину.

Название «магнитная масса» объясняется тем, что раньше магнитные свойства приписывали особым магнитным массам, которые якобы сосредоточены в полюсах. Название «магнитная масса» сохранилось до сих пор, несмотря на то что понятие о магнетизме как о какой-то массе противоречит современной теории. Магнитных масс в действительности не существует, и этот термин следует понимать чисто условно, как некоторую расчетную математическую величину.

Поведение магнитной стрелки объясняется тем, что земной шар является большим магнитом. Около северного географического полюса находится южный магнитный полюс Ю, а около южного географического полюса находится северный магнитный полюс С. Так как разноименные магнитные полюсы притягиваются, то магнитная стрелка компаса своим северным концом всегда устанавливается в направлении, близком к направлению географического меридиана. Это направление называется **магнитным меридианом**.

Взаимодействие магнитов (разноименные полюсы притягиваются, одноименные — отталкиваются) напоминает взаимодействие электрических зарядов (разноименные заряды притягиваются, одноименные — отталкиваются). Однако между магнитными и электрическими явлениями существует разница.

До появления электронной теории считали, что в природе существуют два вида магнетизма подобно двум видам электричества. Но попытки разделить постоянный магнит, получить в одной его части магнетизм одного знака, а в другой — противоположного ни к чему не привели. Деление каждого магнита на две части всегда дает два новых магнита (рис. 57), имеющих северный и южный полюсы. Получить отдельно северный полюс («положительную» магнитную массу) и южный («отрицательную») нельзя, в то время как положительный и отрицательный электрические заряды существуют в отдельности.

Намагничивая различным образом стальные предметы, можно получить многополюсные магниты с любым числом полюсов. Например, на рис. 58 по-

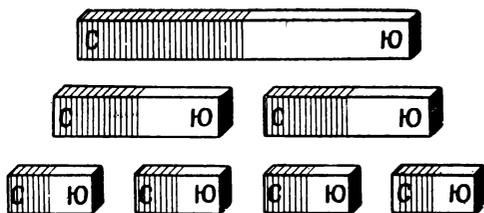


Рис. 57. При делении магнита на части получаются самостоятельные магниты

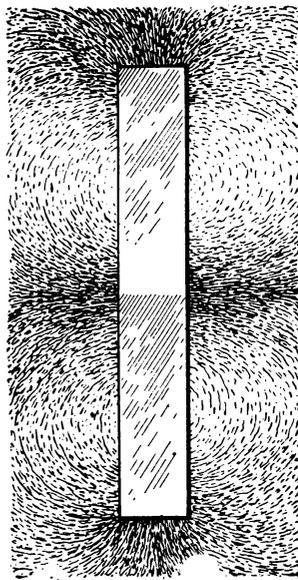


Рис. 58. Спектр намагниченной пластинки (многополюсное намагничивание)

казан спектр намагниченной пластинки, имеющей два одинаковых полюса на концах и противоположный полюс в середине.

#### Молекулярные магнитики

Ниже будет показано, что электрический ток создает магнитное поле. Вращающиеся вокруг ядра каждого атома электроны образуют так называемый элементарный кольцевой ток. Поэтому (согласно теории магнетизма, предложенной немецким физиком Вебером) **каждый элементарный кольцевой ток можно рассматривать как маленький молекулярный магнитик.** Из таких элементарных магнитиков состоят все магнитные материалы.

Когда магнитики ориентированы в одном направлении, они усиливают друг друга, создавая сильные магнитные полюсы на противоположных концах магнитного сердечника. Когда магнитики имеют разные направления, их влияние взаимно уничто-

жается и сердечник не имеет магнитных полюсов. Намагничивание куска стали сводится к ориентированию внутренних элементарных магнетиков.

У немагнитных материалов электроны внутри каждого атома движутся так, что магнитные поля электронов компенсируются. У этих материалов нет элементарных магнетиков.

## Магнитное поле

### Магнитное поле

Иногда магнитное поле определяется как пространство, в котором проявляется действие магнитных сил.

Такое определение неверно, поскольку в нем отождествляются понятия пространства и магнитного поля, тогда как магнитное поле — это особая форма материи, которая существует наравне с веществом, пространство же — это не материя, а одна из форм ее существования.

Магнитное поле представляет собой как бы продолжение магнита, т. е. оно так же материально, как и сам магнит, хотя непосредственно мы его видеть не можем.

Кроме магнитного поля, в природе существуют и другие поля. Мы ежедневно ощущаем и наблюдаем действие поля земного тяготения. Всякий предмет, брошенный вверх, падает на землю под действием этого поля. Существует так называемое электрическое поле, которое мы будем рассматривать ниже.

Подобно тому как электрическое поле приводит в движение электрические заряды, магнитное поле заставляет перемещаться все тела, обладающие магнитными свойствами.

**Для облегчения изучения свойств магнитного поля введено понятие о магнитных силовых линиях.**

### Магнитные силовые линии

Если поместить опилки в магнитное поле, то они расположатся в направлении действия магнитных сил (рис. 59). Линии, вдоль которых действуют силы в магнитном

поле, называются **магнитными силовыми линиями**.

Магнитные силовые линии не материальны. Они введены условно. Направление их вне магнита показывает путь положительной магнитной массы, проходящей в поле, отталкиваясь от северного полюса магнита и притягиваясь к южному. Внутри магнита, создающего магнитное поле, силовые линии идут от южного полюса к северному.

Направление магнитных силовых линий не меняется, когда они проходят через немагнитные материалы, такие, как воздух, бумага или дерево. Однако в магнитных веществах, подобных стали, магнитные силовые линии сильно сгущаются. На рис. 60, а, б силовые линии те же самые, как будто бы бруска дерева и нет. Этот магнит может притянуть к себе противополо-

ложный полюс даже через стену, если она немагнитная. Как показано на рис. 60, в, магнит притягивает стальной предмет, который находится за деревянным бруском.

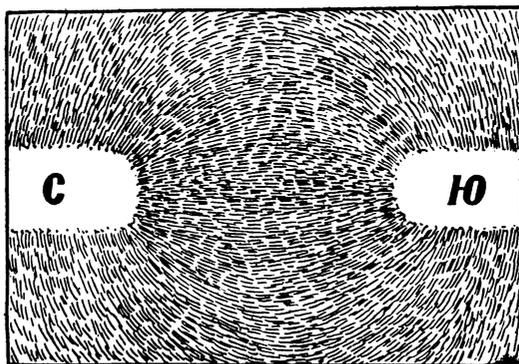


Рис. 59. Расположение опилок между разноименными полюсами магнита

Чтобы охарактеризовать магнитное поле, введено понятие о его напряженности.

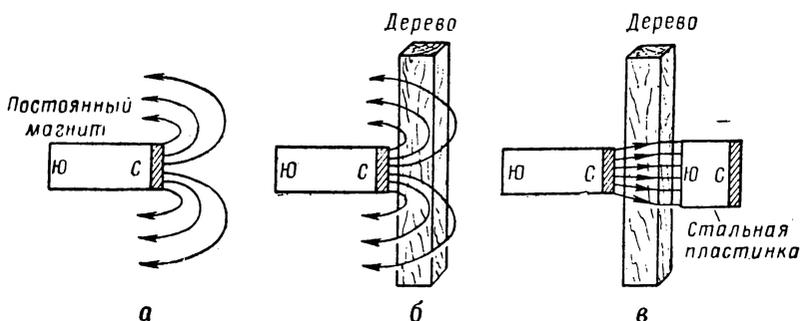


Рис. 60. Магнитное поле в воздухе, дереве и стали:  
 а — магнитное поле в воздухе; б — поле не изменяется деревянным бруском;  
 в — поле концентрируется в стальном стержне

**Напряженность магнитного поля**

Напряженностью магнитного поля в данной точке называется сила, с которой магнитное поле действует на единицу магнитной массы (единичный полюс). Другими словами, **чем сильнее магнитное поле, тем больше его напряженность, т. е. тем сильнее оно действует на магнитную стрелку.**

Магнитное поле, напряженность которого во всех точках одинакова, называется **однородным**, а поле, напряженность которого различна в разных точках, — **неоднородным**.

Электрическое влияние одного тела на другое без какого-либо контакта между ними называется **индукцией**.

Магнитная индукция

Кусок стали, внесенный в магнитное поле, сам приобретает свойства магнита. Та сторона его, в которую входят магнитные силовые линии, становится южным полюсом, а откуда они выходят — северным. Следовательно вокруг куска стали образуется

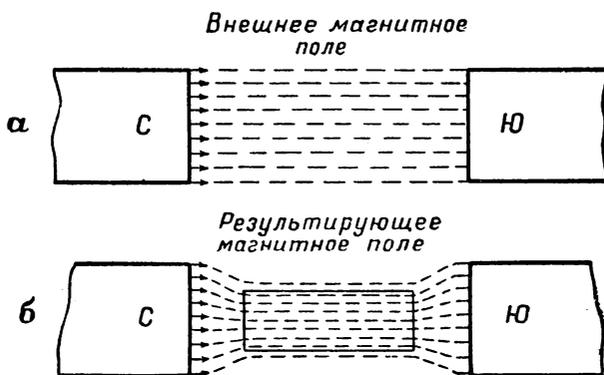


Рис. 61. Магнитное поле:

а — до внесения стального стержня; б — после внесения стального стержня

собственное магнитное поле. Его взаимодействие с внешним магнитным полем вызывает появление так называемого **результующего магнитного поля** (рис. 61).

Возбуждение собственного магнитного поля в веществе (в данном случае в стали) при внесении его в магнитное поле называется **магнитной индукцией**. Она характеризует процесс, происходящий в намагничиваемом материале (степень поворота «элементарных магнетиков»), т. е. степень намагничивания среды.

Сталь в 800 раз лучше воздуха проводит магнитный поток, «втягивая» в себя внешнее магнитное поле. Проведем следующий опыт. На стальной лист насыпем стальных опилок. Магнит, расположенный под листом, не окажет на них никакого влияния. Значит, магнитный поток замкнулся через сталь. На использовании этого свойства основано экранирование (защита) элементов радиотехнических устройств (катушек индуктивности, трансформаторов и др.) от влияния магнитной индукции.

## Постоянные магниты

### Получение постоянных магнитов

Постоянные магниты получают путем намагничивания специальных сплавов, чаще всего алнико (сплав алюминия, никеля и железа с добавлением кобальта) или кобальтовой стали. При этом создают сильное магнитное поле, чтобы сместить молекулярные магнитики в кристаллической

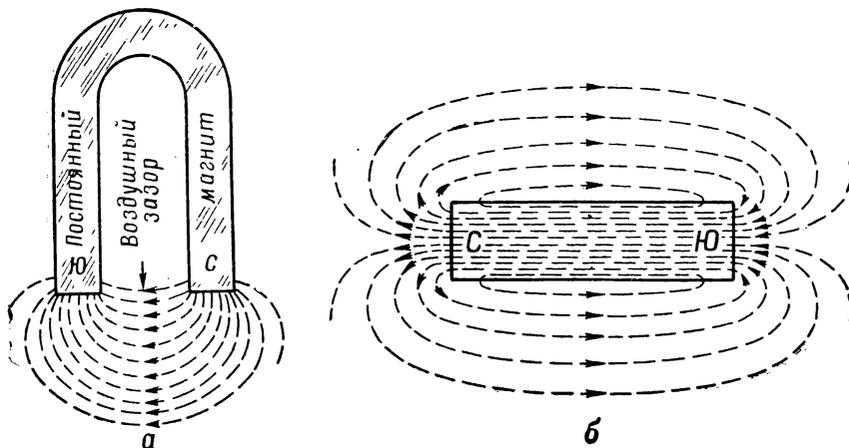


Рис. 62. Постоянные магниты:

а — подковообразный магнит имеет небольшой воздушный зазор; б — стержневой магнит имеет большое воздушное пространство между полюсами

структуре сплавов и создать сильные магнитные полюсы. Когда намагничивающее поле удаляют, молекулярные магнитики остаются в фиксированном положении — материал становится постоянным магнитом.

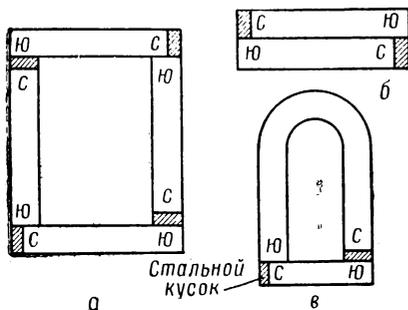


Рис. 63. Сочетание постоянных магнитов в форме замкнутых полей:

а — четыре постоянных стержневых магнита; б — два постоянных стержневых магнита; в — подковообразный магнит со стальным стержнем вместо воздушного зазора

магнитные свойства алнико, но легко разрушиться.

Постоянные магниты сохраняют свои свойства неопределенно долгое время, если их не подвергать нагреву до высокой температуры, сильным ударам и не вносить в сильное размагничивающее поле. При нагревании магнита молекулярная структура может нарушиться и он потеряет свои магнитные свойства, которые не восстанавливаются после остывания. Вибрация и удары оказывают небольшое влияние на этот металл хрупкий и может

При хранении постоянных магнитов их надо располагать так, чтобы предохранить от размагничивания.

Как показано на рис. 62, воздушное пространство между полюсами магнита составляет его воздушный зазор. Чем он меньше, тем сильнее в нем магнитное поле (для данного магнита). Подковообразный магнит по сравнению со стержневым имеет более густые магнитные силовые линии в воздушном зазоре. На рис. 63, *а* и *б* показано, как нужно располагать четыре и два постоянных магнита, чтобы предохранить их от размагничивания во время хранения. На рис. 63, *в* хранение постоянного подковообразного магнита обеспечивается при помощи стального куска.

## 2. Магнитные единицы

Для сравнения между собой различных магнитных полей и магнитных материалов и их расчета введены магнитные единицы. Они применимы к полю независимо от того, создается оно постоянным магнитом или электромагнитом.

Внешняя часть магнитного поля (определяемая числом магнитных силовых линий), направленных от северного полюса магнита, называется **магнитным потоком**. Магнитный поток численно выражается общим количеством магнитных силовых линий, проходящих через определенную площадь, и обозначается греческой буквой  $\Phi$ . Единицей потока в метрической системе единиц «сантиметр—грамм—секунда» (СГС или CGS) служит **максвелл** (по имени английского ученого Максвелла). Сокращенно обозначается *мкс*.

На рис. 64 изображен поток, равный 6 максвеллам, так как имеется шесть силовых линий, идущих к полюсу или от него.

Количественно **магнитная индукция**, или плотность магнитного потока, представляет собой число магнитных силовых линий, или максвелл, на единицу площади, расположенной перпендикулярно к направлению потока:

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

где магнитная индукция обозначается буквой  $B$ , площадь —  $S$ .

Линейной единицей стороны квадрата в метрической системе единиц служит сантиметр. Одна магнитная силовая линия (максвелл) на 1 кв. см называется гауссом — сокращенно *гс* (по имени немецкого ученого Гаусса). Это и есть единица магнитной индукции.

На рис. 64 в плоскости  $1 B = 2 гс$ , поскольку на 1 кв. см приходится две линии. Плотность потока у полюсов больше.

**Пример 40.** Поток в 10000 мкс пронизывает перпендикулярную площадь 5 см<sup>2</sup>. Какова магнитная индукция в гауссах?

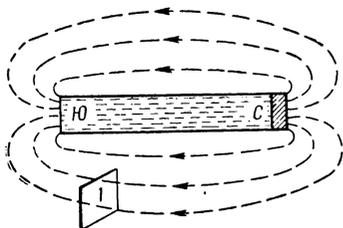
**Решение.**

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{10000 \text{ мкс}}{5 \text{ см}^2} = 2000 \frac{\text{мкс}}{\text{см}^2} = 2000 \text{ гс.}$$

**Магнитная  
проницаемость**

Способность материала концентрировать магнитное поле (магнитные силовые линии) называется **магнитной проницаемостью**.

Магнитная проницаемость среды характеризует способность различных тел ориентировать электронные орбиты атомов под действием внешнего магнитного поля. Чем больше магнитная проницаемость тела, тем сильнее оно намагничивается.



**Рис. 64.** Общий магнитный поток из шести линий равен 6 мкс. В плоскости 1 магнитная индукция равна 2 гс (2 линии на 1 см<sup>2</sup>)

Величины магнитной проницаемости для различных материалов определяются по сравнению с воздухом или вакуумом. Так как на воздух, вакуум или любое немагнитное вещество магнитное поле никакого влияния не оказывает, магнитная проницаемость их равна единице.

Магнитная проницаемость обозначается греческой буквой  $\mu$ . Типичные величины  $\mu$  для стали 100—5000, а для пермаллоя (сплава никеля и стали), изготовленного специально для получения высокой магнитной проницаемости, — значительно больше.

—

**Пример 41.** Плотность потока в катушке без сердечника 100 гс, со стальным сердечником 50000 гс. Какова магнитная проницаемость сердечника?

**Решение.**

$$\mu = \frac{50000 \text{ гс}}{100 \text{ гс}} = 500.$$

Магнитная проницаемость не имеет размерности, так как это отношение плотностей двух потоков.

**Единица напряженности магнитного поля** Напряженность магнитного поля обозначается буквой  $H$ . Измеряется она в эрстедах (по имени датского физика Эрстеда, открывшего электромагнетизм). Эрстед (э) — это напряженность такого магнитного поля, которое действует на единицу магнитной массы в данной точке поля с силой в одну дину (1/981 г).

При напряженности поля, равной одному эрстеду, на 1 см<sup>2</sup> приходится одна силовая линия.

Таким образом, на каждый квадратный сантиметр поперечного сечения поля приходится столько силовых линий, сколько эрстед имеет в данном месте напряженность магнитного поля.

Если это условие выполняется, то напряженность магнитного поля можно определять по числу магнитных силовых линий, проходящих через один квадратный сантиметр площади, перпендикулярной силовым линиям.

Дина есть исходная единица механической силы в метрической системе единиц. Сила проявляется в притяжении или отталкивании единицы массы северного полюса. Если напряженность поля притягивает или отталкивает с силой 400 дин единицу массы северного полюса, то  $H=400$  э. Напряженность поля изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от полюсов. Если  $H=400$  э на расстоянии 1 см от одного из полюсов магнита, то при расстоянии 2 см напряженность поля будет равна одной четвертой части, или 100 э.

**Ампер-витки** Когда магнитное поле создается катушкой, по которой протекает ток, то оно тем сильнее, чем больше ток и больше витков. Поэтому напряженность поля электромагнита можно измерять в ампер-витках ( $a\cdot v$ ), которые выражают произведение тока в амперах на число витков катушки:

$$\text{ампер - витки} = \omega I.$$

Катушка в 5 витков, по которой протекает ток 2 а, создает то же самое магнитное поле, что и катушка, которая имеет 10 витков при токе 1 а, поскольку число ампер-витков равно 10 в том и другом случае.

**Пример 42.** Сколько ампер-витков в катушке с 2000 витками, по которой протекает ток 5 ма?

Решение.

$$\omega I = 2000 \cdot 0,005 \text{ а} = 10 \text{ а-в.}$$

**Пример 43.** Провод в катушке имеет сопротивление 3 ом. Когда катушка подключена к батарее 6 в, то в ней протекает ток 2 а. Сколько нужно иметь витков, чтобы получить 500 а-в?

Решение.

$$\begin{aligned} \omega I &= 500 \text{ а-в;} \\ \omega &= \frac{500 \text{ а-в}}{2 \text{ а}} = 250 \text{ витков.} \end{aligned}$$

Для катушки соотношение между ампер-витками и эрстедами выражается следующей формулой:

$$H = \frac{1,26 \omega I}{\text{длина (см)}} \text{ э,} \quad (25)$$

где  $\omega I$  — ампер-витки;

1,26 — постоянный множитель.

**Пример 44.** Катушка без сердечника длиной 100 см имеет 1000 а-в. Определить напряженность магнитного поля  $H$ .

Решение. По формуле (25)

$$H = \frac{1,26 \omega I}{l \text{ см}} = \frac{1,26 \cdot 1000}{100} = 12,6 \text{ э.}$$

Катушка без сердечника, рассмотренная в примере 44, имеет напряженность магнитного поля 12,6 э по центру катушки.

Когда катушка имеет стальной сердечник,  $1,26 \omega I$  делится на длину сердечника. В этом случае напряженность поля будет одна и та же в любой точке стального сердечника.

**Пример 45.** Какова напряженность магнитного поля в стальном сердечнике длиной 10 см при 100 а-в в катушке?

Решение. По формуле (25)

$$H = \frac{1,26 \omega I}{l \text{ см}} = \frac{126}{10} = 12,6 \text{ э.}$$

Обратите внимание, что одна и та же напряженность магнитного поля 12,6 э создается катушкой без сердечника длиной 100 см, имеющей 1000 а-в, и катушкой со стальным сердечником, длина которого всего 10 см, при наличии 100 а-в.

**Соотношение между  $B$  и  $H$**

Магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны между собой следующим равенством:

$$B = \mu H, \quad (26)$$

где  $B$  — магнитная индукция в гауссах;

$H$  — напряженность магнитного поля в эрстедах;

$\mu$  — магнитная проницаемость среды — число отвлеченное, показывающее отношение магнитной проницаемости данной среды к магнитной проницаемости вакуума.

Таким образом, если известна напряженность магнитного поля  $H$ , то для определения величины магнитной индукции  $B$  необходимо знать относительную магнитную проницаемость среды  $\mu$ .

**Намагничивание тел**

В начале главы указывалось, что из некоторых материалов можно получить искусственные постоянные магниты. Намагничиванию лучше всего поддаются так называемые ферромагнитные материалы (греческое слово «феррум» означает железо; впервые магнитные свойства были обнаружены у железа). К ним относятся сталь, чугун, никель, кобальт и другие материалы, которые проводят магнитный поток значительно лучше, чем воздух.

Перейдем теперь к объяснению явления намагничивания ферромагнитных материалов. До намагничивания тело не проявляет магнитных свойств, так как элементарные магнитики расположены беспорядочно и их поля взаимно компенсируются (рис. 65, а). Однако стоит только создать внешнее магнитное поле, как элементарные магнитики начнут поворачиваться, ориентируясь в одном направлении (рис. 65, б), и кусок стали приобретет свойства магнита с явно выраженными полюсами.

Следующий простой опыт дает возможность наглядно уяснить сущность намагничивания и размагничивания тел. Возьмем стеклянную пробирку и насыплем в нее стальных опилок. Будем

считать, что пробирка с опилками представляет собой магнитное тело, а опилки — элементарные магнитики. После намагничивания опилок пробирка приобретает свойства магнита. Если поднести ее к магнитной стрелке, то стрелка отклонится. Достаточно встряхнуть пробирку несколько раз, как она потеряет свойства магнита, потому что элементарные магнитики (опилки) расположатся беспорядочно.

У ферромагнитных материалов под действием внешнего магнитного поля электроны движутся вокруг атомов так, что создаваемое ими поле внутри орбиты совпадает по направлению с внешним полем. У немагнитных тел этого не происходит. По-

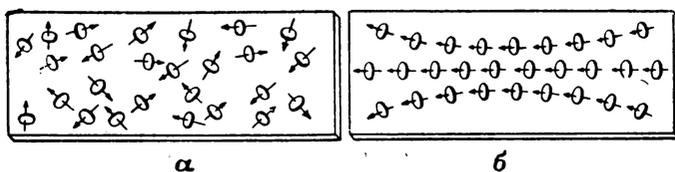


Рис. 65. Расположение элементарных магнитиков в магнитном поле:  
а — до намагничивания; б — после намагничивания

этому ферромагнитные материалы, помещенные в магнитное поле, усиливают его за счет полей ориентированных электронов.

Если прекратить намагничивание куска стали, то он частично потеряет свои магнитные свойства, а частично сохранит. Способность тел сохранять магнитные свойства после прекращения намагничивания называется **остаточным магнетизмом**. У одних материалов (мягкая отожженная сталь) остаточный магнетизм очень мал, у других (мягкая литая сталь) — несколько больше.

Существование остаточного магнетизма объясняется наличием у материалов так называемой **задерживающей силы**. Большой задерживающей силой обладает твердая литая сталь. Намагниченный кусок ее долго сохраняет магнитные свойства, оставаясь постоянным магнитом.

При использовании ферромагнитных материалов на практике очень важно знать, какова у них зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности намагничивающего поля  $H$ .

Поместим исследуемый кусок материала (сердечник) внутрь катушки и будем изменять напряженность магнитного поля  $H$ , регулируя величину проходящего по катушке тока. Тогда будет изменяться и магнитная индукция сердечника.

Проведем две взаимно перпендикулярные прямые — оси координат: горизонтальную (ось абсцисс) и вертикальную (ось ординат). Вправо от начала координат (от точки пересечения осей) будем откладывать напряженность магнитного поля, а вверх — соответствующие значения магнитной индукции. Соеди-

ним полученный ряд точек плавной кривой, которая называется **кривой намагничивания**. На рис. 66 таких кривых три. Они показывают, что при увеличении напряженности намагничивающего поля магнитная индукция вначале возрастает быстро, затем медленнее и наконец после некоторого значения  $H$  почти перестает возрастать — наступает магнитное насыщение.

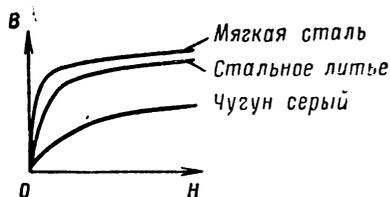


Рис. 66. Кривые намагничивания

Оно объясняется тем, что все элементарные магнитики оказываются ориентированными в направлении действия намагничивающего поля. Незначительное увеличение магнитной индукции после насыщения происходит только за счет повышения напряженности намагничивающего поля.

Магнитная проницаемость материалов до насыщения максимальна, а затем быстро уменьшается.

### 3. Магнитный гистерезис

**Явление магнитного гистерезиса заключается в том, что при изменении напряженности намагничивающего поля  $H$  происходит отставание в изменении магнитной индукции  $B$**  (слово «гистерезис» означает «запаздывание»). Гистерезис наблюдается во всех магнитных материалах. Это объясняется тем, что молекулярные магнитики недостаточно эластичны: однажды ориентированные внешним магнитным полем, они не возвращаются в первоначальное положение после удаления магнитного поля.

Проследим за изменением магнитной индукции при намагничивании стального стержня. Поместим стержень внутрь катушки и начнем его намагничивать, пропуская через катушку ток. С увеличением тока магнитная индукция сердечника будет возрастать (кривая  $oa$  на рис. 67), и при некотором значении тока  $+I_{\text{макс}}$  (при определенной величине напряженности намагничивающего поля) наступит магнитное насыщение (точка  $a$ ).

Начнем теперь уменьшать ток до нуля. Магнитная индукция тоже будет изменяться, но не по кривой  $ao$ , а по совершенно другой кривой —  $ab$ . При токе, равном нулю (напряженность поля также равна нулю), магнитная индукция сохранит некоторое значение  $ob$  (остаточный магнетизм), т. е. произойдет запаздывание в изменении магнитной индукции по сравнению с изменением напряженности намагничивающего поля.

Изменим направление тока в катушке. Тогда магнитная индукция, уменьшаясь, станет равной нулю при значении тока  $-I_1$

(минус означает, что ток проходит в другом направлении). При значении тока  $-I_{\text{макс}}$  опять наступит магнитное насыщение, но полюсы у сердечника изменятся. В случае изменения тока от  $+I_{\text{макс}}$  до  $-I_{\text{макс}}$  и опять до  $+I_{\text{макс}}$  получится кривая изменения магнитной индукции, изображенная жирной линией. Она получила название петли гистерезиса.

Мощность электрического тока, проходящего по катушке, расходуется на перемагничивание стального сердечника. Эта мощность превращается в тепло, так как при перемагничивании возникает трение элементарных магнетиков. **Количество тепла, выделяемого при перемагничивании, прямо пропорционально площади петли гистерезиса.** Чем шире петля, тем больше выделяется тепла.

При небольшой скорости изменения магнитного потока явление гистерезиса сказывается мало. Примером может служить включение и выключение электромагнита, работающего на постоянном токе, или изменение магнитного потока переменного тока, который меняет свое направление 50 раз в секунду или реже.

Чем быстрее изменяется магнитное поле, тем сильнее эффект гистерезиса. Когда  $H$  изменяется тысячи или миллионы раз в секунду, потери мощности на гистерезис значительно возрастают.

Чтобы размагнитить магнит, необходимо свести к нулю остаточную индукцию. Проще всего это сделать при помощи переменного поля, постепенно удаляя стальной сердечник из него (или удалением поля от сердечника). Петля гистерезиса при этом будет становиться все меньше и меньше и в конце концов при слабом поле петля практически исчезнет, т. е. остаточная индукция станет равна нулю. Для размагничивания обычно используется переменный ток. Если применить постоянный ток с изменением его направления, то материал перемагничивается с противоположной полярностью.

#### Ферриты

В настоящее время получила развитие группа керамических материалов, обладающих магнитными свойствами железа. Эти материалы называются **ферритами**.

Обычно их изготавливают из размельченных в порошок окисей металлов, которые затем прессуют в требуемую форму.

**Характерная особенность ферритов — высокая магнитная проницаемость.** У никель-цинкового феррита она достигает 6000. Имеются ферриты и с более высокой магнитной проницаемостью. К преимуществам ферритов относится и их высокое сопро-

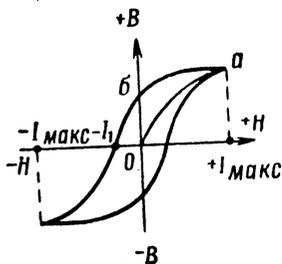


Рис. 67. Петля гистерезиса

тивление, которое может быть в миллион раз больше сопротивления металлов вследствие изоляции крупинок железа.

Ферритовые сердечники широко используются в катушках индуктивности, предназначенных для работы в цепях высоких частот. Потери мощности в этих сердечниках небольшие, так как их сопротивление очень велико.

#### 4. Электромагнетизм

Связь между магнетизмом и электричеством была открыта в 1824 г. Эрстедом, который обнаружил, что ток в проводе заставляет двигаться стрелку расположенного рядом компаса. Несколько лет спустя было обнаружено, что изменяющееся магнитное поле вызывает движение электронов — электрический ток. Это в свою очередь приводит к появлению магнитного поля, которое, изменяясь, опять создает ток. Эти электромагнитные явления легли в основу практической электротехники.

Магнитное поле вокруг проводника с током

Если пропустить электрический ток по проводнику, то в перпендикулярной ему плоскости возникнет круговое магнитное поле. Действие его легко обнаружить.

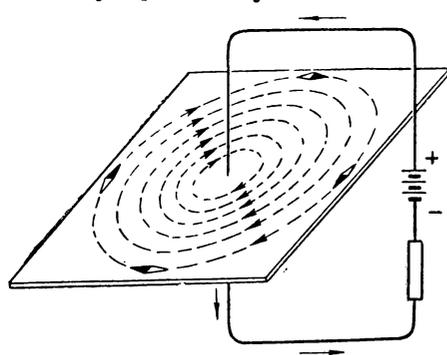


Рис. 68. Магнитное поле вокруг проводника с током

Расположим вокруг проводника несколько магнитных стрелок (рис. 68). Когда в проводнике тока нет, все стрелки направлены на север. Включим ток — и образовавшееся магнитное поле, если оно сильнее поля земли, повернет все стрелки по окружности. Изменим направление тока, поменяем местами концы проводника на зажимах источника — и магнитные стрелки повернутся на  $180^\circ$ .

Таким образом, направление магнитных силовых линий (направление поля) вокруг проводника с током зависит от направления тока в проводнике.

Магнитное поле, образованное током, притягивает стальные опилки к проводнику (рис. 69).

**Направление магнитных силовых линий вокруг проводника с током определяется по правилу буравчика:** если буравчик ввинчивать по направлению тока, то рукоятка его будет вращаться по направлению магнитных силовых линий (рис. 70).

Условились обозначать ток, идущий от нас (если смотреть на поперечное сечение проводника), знаком «+» (хвост стрелки), а ток, идущий к нам, знаком «•» (острие стрелки).

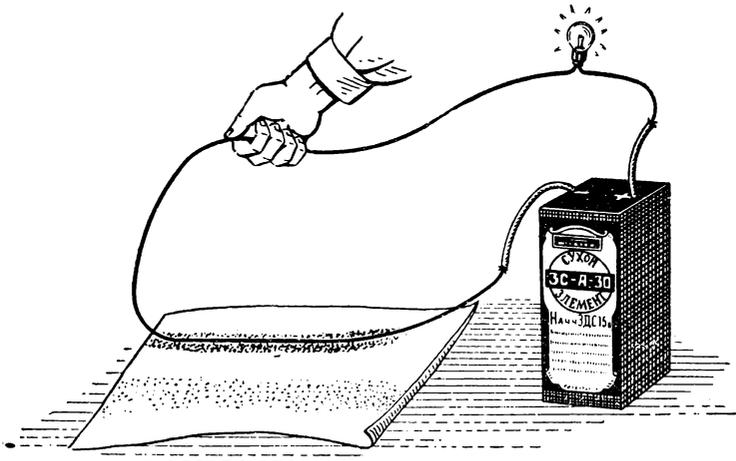


Рис. 69. Стальные опилки притягиваются магнитным полем проводника с током

Когда магнитные силовые линии двух полей действуют в одном направлении, поля складываются, создавая более сильное поле. И наоборот, когда магнитные силовые линии двух полей действуют в противоположных направлениях, поля вычитаются, в результате получается более слабое поле.

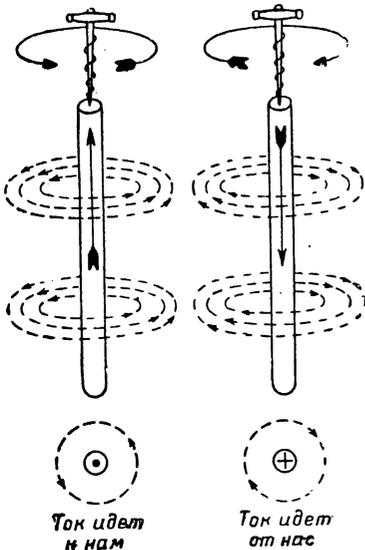


Рис. 70. Определение направления магнитных силовых линий по праву буравчика

Свернем теперь проводник в виде витка и пропустим по нему ток. Воспользовавшись правилом буравчика для различных частей витка, установим, что силовые линии образовавшегося магнитного поля с одной стороны входят в плоскость витка, а с другой — выходят из нее (рис. 71). Поле внутри витка более густое, чем снаружи, потому что линии сильнее концентрируются в небольшом пространстве. Кроме того, внутри витка все они направлены в одну сторону. Это приближает поле витка по его

действию к полю стержневого магнита с противоположными полюсами на противоположных поверхностях витка.

### Соленоиды

Если намотать в виде спирали или катушки ряд витков и пропустить по ним ток, то магнитные поля каждого из них образуют одно общее поле (рис. 72). Магнитные силовые линии между соседними витками будут направлены в противоположные стороны.

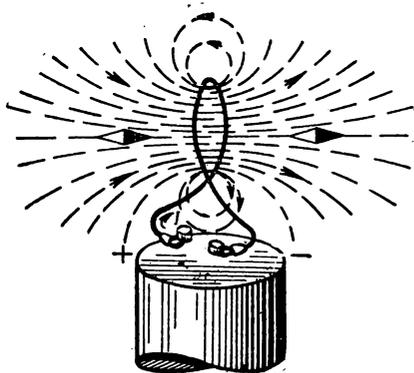


Рис. 71. Магнитные полюсы витка с током

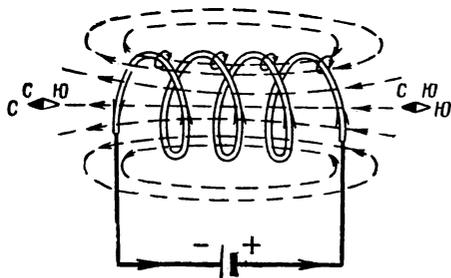


Рис. 72. Магнитное поле катушки

Поэтому часть силовых линий (а именно те, которые не «помещаются» между витками) замкнется вокруг катушки. Такая катушка называется **соленоидом**. Длина идеального соленоида намного больше его диаметра.

Магнитное поле соленоида напоминает поле прямого магнита. Соленоид, так же как и магнит, имеет северный и южный полюсы. В этом легко убедиться, если соленоид свободно подвесить и пропустить через него ток: катушка одним концом повернется на север, а другим — на юг.

Северный и южный полюсы соленоида (иначе говоря, направление силовых линий) определяются по правилу правой руки (рис. 73): если правую руку наложить ладонью на соленоид так, чтобы согнутые пальцы показывали направление тока, то отогнутый большой палец покажет северный полюс соленоида.

Величина магнитного потока зависит от числа витков в катушке и от тока, проходящего по ней. Чем больше витков и чем сильнее ток, тем больше магнитный поток.

Если поднести к концу соленоида стальную пластинку, то она начнет втягиваться внутрь него до тех пор, пока их середины не совпадут (рис. 74). Как только пластинка попадает в магнитное поле соленоида, она намагничивается; наиболее удаленный от соленоида конец ее приобретает северную полярность, а ближний — южную. Если пластинку поднести к другому концу соленоида, картина изменится. Таким образом, соленоид и пластин-

ка сближаются разноименными полюсами. Это сближение прекращается после совмещения нейтральных линий соленоида и пластинки, поскольку дальнейшее втягивание пластинки невозможно, так как одноименные полюсы взаимно отталкиваются.

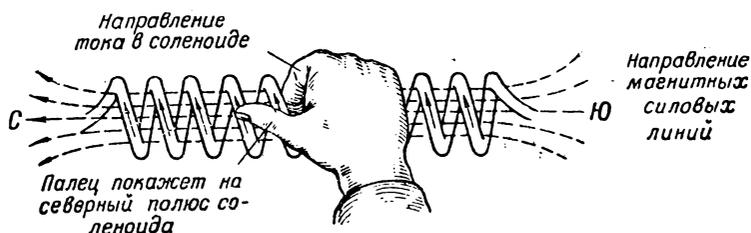


Рис. 73. Определение полюсов соленоида по правилу правой руки

Сила втягивания зависит от величины магнитного потока. Способность катушки втягивать в себя ферромагнитные предметы широко используется в электрических приборах.

#### Электромагниты

Свойство катушки создавать магнитное поле при прохождении по ней электрического тока используется в электромагните, который представляет собой катушку со стальным сердечником (рис. 75).

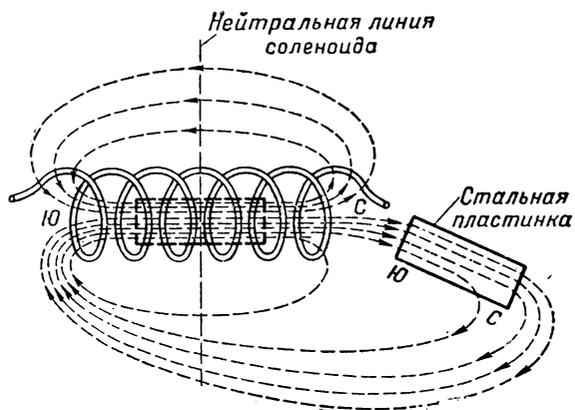


Рис. 74. Втягивание соленоидом стальной пластинки

Электромагнит подобен катушке без стального сердечника: так же направлены магнитные силовые линии внутри сердечника, по правилу правой руки определяются полюсы электромагнита. Однако магнитное действие электромагнита сильнее,

поскольку сопротивление магнитному потоку стального сердечника значительно меньше, чем воздуха, вследствие чего магнитный поток в электромагните при том же токе значительно больше, чем в обычной катушке.

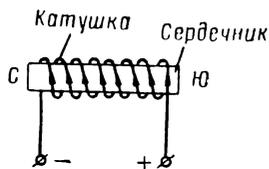


Рис. 75. Стержневой электромагнит

В качестве сердечника для электромагнита используется специальная сталь, а обмоткой служит медная изолированная проволока, как правило, намотанная на каркас в несколько слоев.

Электромагниты бывают самых разнообразных форм и размеров, двухполюсные и многополюсные, с внешними и внутренними полюсами (рис. 76). Они широко применяются в радиотехнике, телефонии, телеграфии, в электрических машинах, подъемных механизмах и т. д.

**Взаимодействие магнитных полей**

Если взять два проводника, по которым проходит электрический ток, и расположить их вблизи один от другого, то они будут взаимодействовать (притягиваться или отталкиваться).

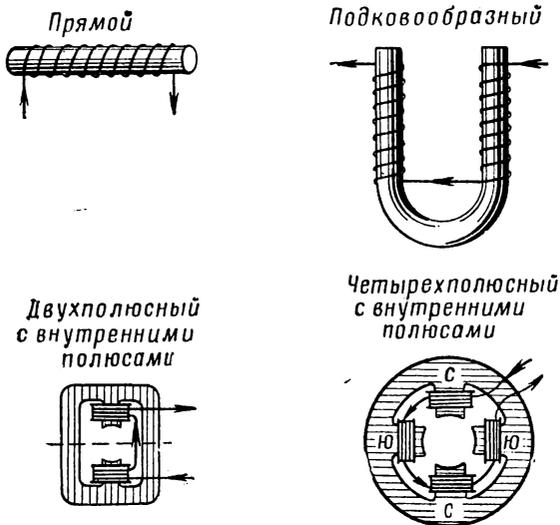


Рис. 76. Электромагниты с различной формой сердечника

Когда направление тока в обоих проводниках совпадает, они притягиваются (рис. 77, а), когда нет — отталкиваются (рис. 77, б).

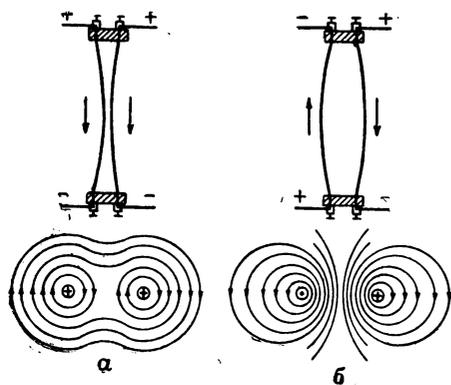
Движение проводников вызвано силами возникающих вокруг них магнитных полей: проводники движутся от более сильного

поля к более слабому. Одноименные полюсы магнита имеют поля в одном направлении — образуется более сильное поле.

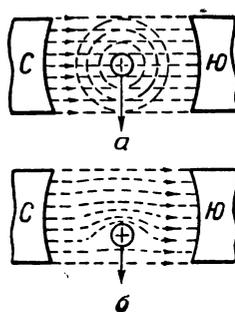
Между разноименными полюсами поле слабее, так как противоположные поля уничтожаются. В этом случае магниты притягиваются, двигаясь в направлении слабого поля. Сильное поле движется к слабому, стремясь выравнять напряженность поля.

**Проводник с током в магнитном поле**

Если в магнитное поле поместить проводник так, как показано на рис. 78, и пропустить по нему ток, то в результате взаимодействия внешнего магнитного поля с магнитным полем тока, созданным вокруг проводника, произойдет выталкивание проводника за пределы внешнего магнитного поля.



**Рис. 77.** Взаимодействие проводников:  
а — при одном и том же направлении тока в них; б — при разных направлениях тока



**Рис. 78.** Выталкивание проводника с током из магнитного поля

С одной стороны проводника будет наблюдаться сгущение магнитных линий, с противоположной стороны — разрежение. Выталкивание проводника произойдет в сторону разрежения.

Направление выталкивания проводника зависит от направления силовых линий внешнего магнитного поля и от направления тока в проводнике и определяется **по правилу левой руки**. Если левую руку (рис. 79) расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление выталкивания проводника.

Посмотрим, что получится, если вместо проводника поместить в магнитное поле виток с током. Оказывается, выталкивания витка из магнитного поля не произойдет. Если виток был помещен в магнитное поле так, как это показано на рис. 80 слева,

то верхняя сторона его будет выталкиваться вправо, а нижняя — влево. Под действием двух сил виток повернется и займет положение, показанное на рис. 80 справа. В этом положении

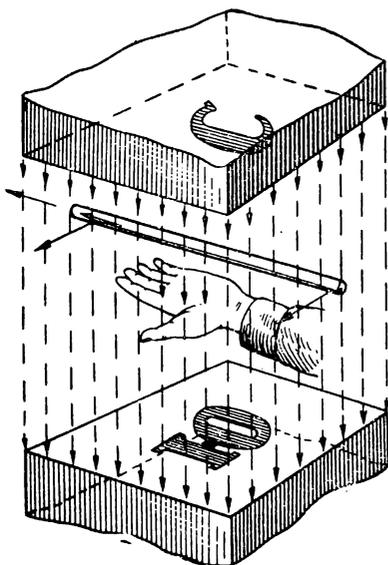


Рис. 79. Определение направления выталкивания проводника с током магнитным потоком по правилу левой руки

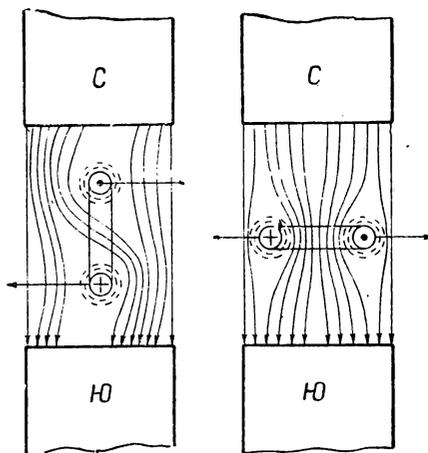


Рис. 80. Рамка с током в магнитном поле

произойдет уравнивание сил и виток останется неподвижным. **Направление вращения витка определяется тоже по правилу левой руки.**

### Электромагнитная индукция

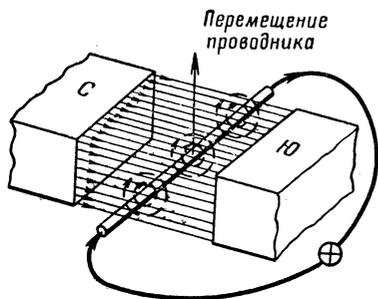
Если в магнитное поле поместить проводник и перемещать его так, чтобы он пересекал магнитный поток, то в проводнике возникнет электродвижущая сила. Это явление называется **электромагнитной индукцией** (электромагнитным наведением или влиянием), а э. д. с., возникшая в проводнике, — **индуцированной э. д. с.** Если составить замкнутую цепь с проводником, в котором наводится э. д. с., то по цепи будет протекать индуцированный электрический ток (рис. 81).

Как движение электронов создает магнитное поле, точно так же магнитное поле, пересекая проводник, вызывает направленное движение свободных электронов в проводнике, т. е. ток.

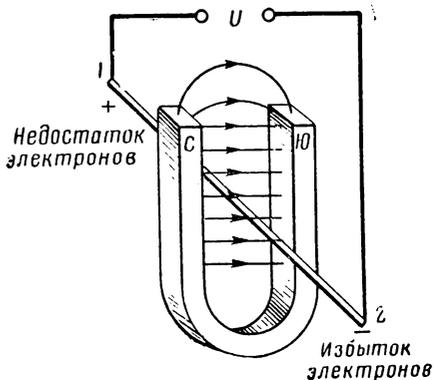
Ни один вид энергии не может быть получен без затраты какого-либо другого вида энергии. Например, если магнит ле-

жит около проводника, то в проводнике никакого тока не будет. Он возникает только при перемещении магнита около проводника или проводника около магнита. В этом случае затрачиваемая механическая энергия превращается в электрическую.

Рассмотрим случай пересечения проводника **Индуктированная э. д. с.** магнитным потоком (рис. 82) при разомкнутой цепи. При движении магнита вниз магнитный поток пересекает проводник и вынуждает свободные электроны двигаться. При разомкнутой цепи электроны смещаются и создают противоположные электрические заряды на двух открытых концах проводника. В данном случае избыток элект-



**Рис. 81.** При пересечении магнитного потока проводником в нем индуктируется э. д. с.



**Рис. 82.** На зажимах разомкнутого проводника при пересечении им магнитного поля возникает э. д. с.

тронов наблюдается в точке 2, а недостаток — в точке 1. В результате получается разность потенциалов на двух концах, созданная разделением электрических зарядов в проводнике.

Электродвижущая сила, вызванная работой движения магнитного потока, создает разность потенциалов. Э. д. с. создается только при движении магнитного потока, который пересекает проводник. Как только движение магнитного потока прекратится, в проводнике произойдет выравнивание разделенных зарядов.

Индуктированную э. д. с. можно получить не только путем перемещения магнитного поля; она будет возникать и при пересечении магнитного поля проводником. Если подключить к катушке чувствительный измерительный прибор, взять обычный постоянный магнит и вдвигать его в катушку и выдвигать, то прибор покажет наличие тока в цепи (рис. 83). Если вместо постоянного магнита взять другую катушку, по которой пропустить ток, и тоже вдвигать и выдвигать ее, то в первой катушке появится индуктированная э. д. с. и прибор покажет наличие тока в цепи (рис. 84). Наконец, индуктированную э. д. с. можно

получить, если в первую катушку вставить вторую и при помощи реостата изменять величину тока, проходящего по ней (рис. 85).

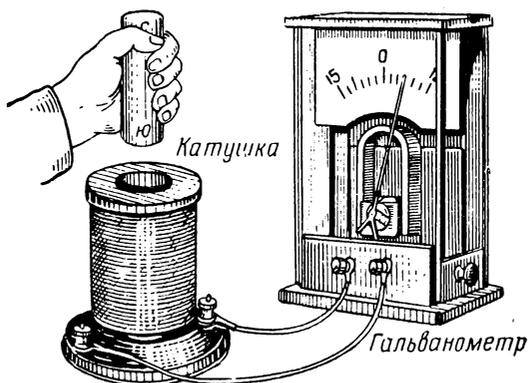


Рис. 83. При движении постоянного магнита в катушке возникает э. д. с.

**Направление индуктированной э. д. с. определяется по правилу правой руки.** Если правую руку расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а отогнутый больш-

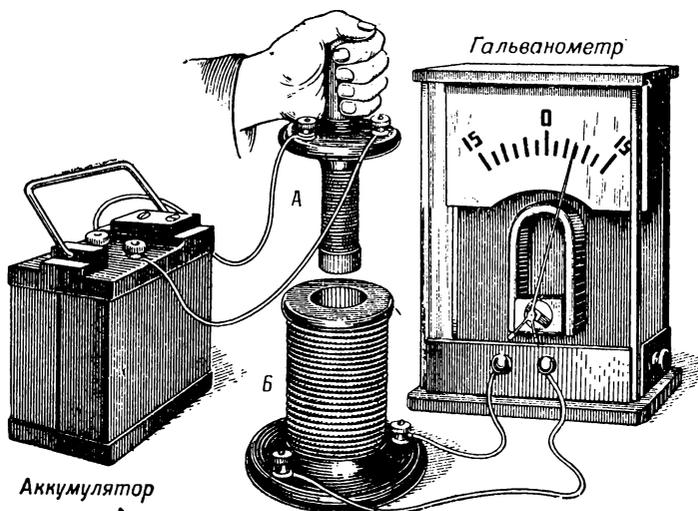


Рис. 84. При движении катушки А с током в катушке Б возникает э. д. с.

шой палец показывал направление движения проводника, то вытянутые остальные пальцы укажут направление индуктированной э. д. с. (рис. 86).

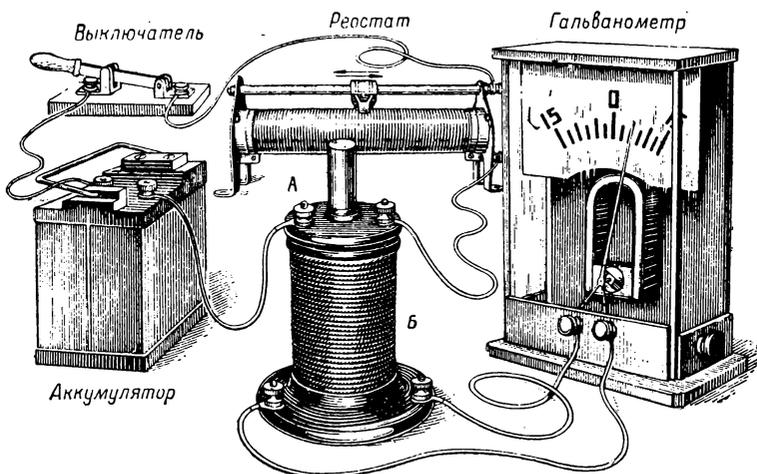


Рис. 85. При изменении тока в катушке А возникает э. д. с. в катушке Б

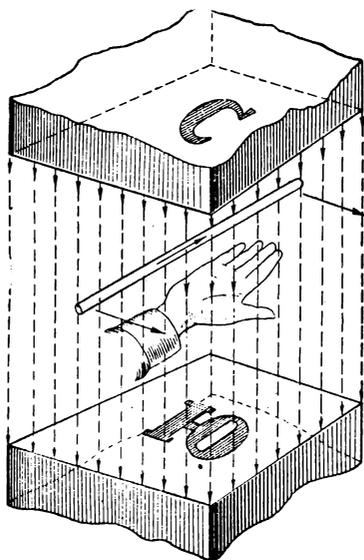


Рис. 86. Определение направления индуктированной э. д. с. по правилу правой руки

Большое применение в электротехнике получило правило, открытое русским ученым Э. Х. Ленцем: **направление индуктированного тока всегда таково, что он противодействует причине, вызвавшей его** (например, движению проводника).

Рассмотрим индуктируемое напряжение на зажимах катушки. При отключенной катушке (рис. 87, а) индуктированная э. д. с. увеличивается с увеличением числа витков. Каждый виток, пересекаемый магнитным потоком, добавляет напряжение к общему индуктированному напряжению, поскольку они все вынуждают свободные электроны накапливаться на отрицательном конце катушки с недостатком электронов на положительном конце. Полярность индуктированной э. д. с. определяется на-

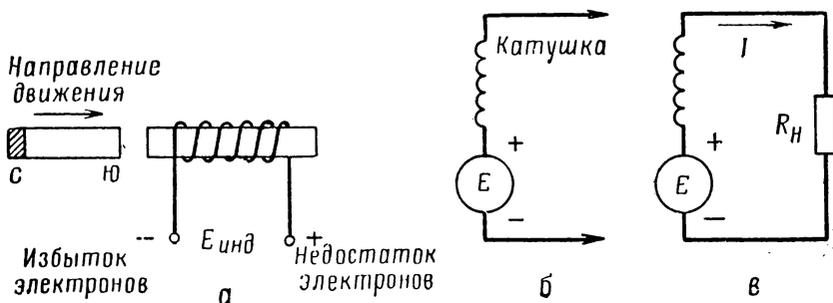


Рис. 87. Э. д. с., индуктируемая на зажимах катушки при пересечении ее витков магнитным потоком:

а — движение магнитного потока генерирует э. д. с. на зажимах катушки; б — эквивалентная цепь; в — индуктируемая э. д. с. представляет источник, который может создавать ток во внешней нагрузке, подключенной к зажимам катушки

правлением индуктированного тока. Конец проводника, где электроны накапливаются, представляет собой отрицательный зажим, а противоположный конец, с недостатком электронов, — положительный.

Общая э. д. с. на зажимах катушки равна сумме э. д. с. витков, так как все витки соединены последовательно. На рис. 87, б изображена эквивалентная цепь, где индуктированная э. д. с. показана как отдельный источник.

Источник э. д. с.  $E$  может создать ток во внешней нагрузке, подключенной к положительному и отрицательному зажимам (рис. 87, в). Например, индуктированное напряжение 12 в при сопротивлении нагрузки 6 ом создает ток 2 а, который протекает через эквивалентный источник, катушку и сопротивление нагрузки.

Величина индуктированной э. д. с. зависит:

1. От величины потока. Чем больше поток, пересекающий проводник, тем больше индуктированная э. д. с.
2. От скорости пересечения. Чем быстрее поток пересекает проводник, тем выше индуктированная э. д. с. Когда поток дви-

жется с большей скоростью, проводник может пересечь больше силовых линий за определенное время.

3. От числа витков. Чем больше витков в катушке, тем больше ее индуктированная э. д. с.

Индуктированную э. д. с. можно подсчитать по формуле

$$E_{\text{инд}} = \frac{\omega\Phi}{T \cdot 10^8} \quad (\text{в}), \quad (27)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток в максвеллах, или число силовых линий;

$\omega$  — число витков;

$T$  — время в секундах;

$10^8$  — коэффициент для перевода индуктированной э. д. с. в вольты. Например, если катушка в 100 витков пересекается потоком 1 млн. ( $10^6$ ) силовых линий или максвелл за 1 сек, то индуктированная э. д. с. равна

$$\frac{100 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8} = 1 \text{ в.}$$

### *Краткие выводы*

1. Магнитом называется металлический предмет, обладающий свойством притягивать стальные тела.

2. Открытые концы магнита, соприкасающиеся с немагнитной средой, образуют полюсы, которые имеют противоположную полярность: полюс, направленный на север (при свободном вращении магнита), называется северным, на юг — южным.

3. Разноименные полюсы магнита притягиваются, одноименные — отталкиваются.

4. Магнит имеет невидимое магнитное поле, которое условно изображается магнитными силовыми линиями. Направлены они от северного полюса к южному вне магнита и от южного к северному внутри его. Ближе к полюсам, где поле сильнее, магнитные силовые линии плотнее, дальше от полюсов они менее густые.

5. Магнит притягивает ферромагнитные материалы, потому что магнитное поле намагничивает их путем индукции. Ближайшие полюсы магнита и намагничиваемого им материала всегда имеют противоположную полярность.

6. Магнитный материал концентрирует в себе магнитное поле (магнитные силовые линии). Немагнитный материал не влияет на магнитное поле.

7. Постоянные магниты изготавливаются из специальных магнитных материалов, которые сохраняют остаточный магнетизм длительное время.

## 8. Магнитные единицы и их определение:

Название	Что означает	Условное обозначение	Единица измерения	Примечание
Магнитный поток	Все магнитные силовые линии, пронизывающие данный контур	$\Phi$	$1 \text{ мкс} = 1 \text{ силовой линии}$	1 килолиния = 1000 линиям
Магнитная проницаемость	Коэффициент пропорциональности магнитного потока в материале по сравнению с воздухом	$\mu$	Нет	$\mu$ воздуха или вакуума равно единице
Напряженность магнитного поля, или намагничивающая сила	Сила на сантиметр пути потока	$H$	$1 \text{ э} = \frac{1,26 \text{ а-в}}{\text{см}}$	Соответствует вольту на 1 см длины
Магнитная индукция	Магнитные силовые линии на единицу площади: $B = \mu H$	$B$	$1 \text{ гс} = 1 \frac{\text{линии}}{\text{см}^2}$	

9. Кривая намагничивания (рис. 66) показывает зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ . Каждый магнитный материал имеет свою кривую намагничивания.

10. Магнитная проницаемость ( $\mu$ ) выражает способность магнитного материала концентрировать магнитное поле. Чем больше  $\mu$ , тем больше магнитная индукция, поскольку  $B = \mu H$ .

11. Насыщение в магнитном материале характеризуется тем, что увеличение напряженности поля вызывает незначительное увеличение магнитной индукции. При насыщении происходит резкое уменьшение магнитной проницаемости.

12. Петля гистерезиса представляет собой участок величин  $B-H$  за полный цикл намагничивания и размагничивания. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше потери на гистерезис.

13. Ферриты являются керамическими материалами. Они имеют высокую магнитную проницаемость и в то же время служат изоляторами для электрического тока.

14. Ток, протекающий по прямому проводнику, создает замкнутое магнитное поле, силовые линии которого представляют собой окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Направление силовых линий определяется по правилу буравчика.

15. Два поля в одной и той же плоскости, созданные током или постоянным магнитом, складываются, образуя более сильное поле, если направление магнитных силовых линий совпадает.

И наоборот, поля вычитаются, образуя более слабое поле, если магнитные силовые линии направлены в противоположные стороны.

16. Соленоид — это катушка. Соленоид имеет результирующее электромагнитное поле подобно стержневому магниту с северным и южным полюсами на противоположных концах. Полярность соленоида определяется по правилу правой руки.

17. Движущийся магнитный поток, пересекая проводник, индуцирует в нем э. д. с. Непременное условие этого — относительное движение потока и проводника. Электромагнитная индукция увеличивается, если вместо прямого проводника используется катушка.

18. Индуцируемая э. д. с. вызывает разделение зарядов в проводнике, т. е. создает разность потенциалов между разделенными зарядами. В этом случае проводник является источником индуцируемой э. д. с., которая может перемещать электроны через внешнюю цепь.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Поток силовых линий вокруг магнита направлен:  
а — от южного полюса к северному; б — от северного полюса к южному; в — равными порциями от одного полюса к другому; г — только от одного магнита к другому.
2. Вещество, которое имеет большую задерживающую силу, используется для изготовления:  
а — электромагнитов; б — постоянных магнитов; в — временных магнитов; г — не используется.
3. Магнитные полюсы притягиваются в том случае, если:  
а — они имеют одну и ту же полярность; б — противоположную полярность; в — нет воздушного промежутка между полюсами; г — они имеют одинаковые размеры.
4. Магнит притягивает гвоздь вследствие:  
а — того, что создает заряд на гвозде; б — явления магнитной индукции; в — падения магнитного поля; г — создания молекулярных магнетиков в воздухе вокруг гвоздя.
5. Магнитная индукция наводит:  
а — полюсы, противоположные полюсам первичного поля; б — полюсы той же полярности; в — два северных полюса; г — магнитное поле, но не полюсы.
6. Если стальной сердечник помещен в магнитное поле, то:  
а — магнитное поле меньше концентрируется в сердечнике; б — сердечник не влияет на магнитное поле; в — сердечник так же влияет на магнитное поле, как и воздух; г — сердечник концентрирует магнитное поле.
7. Поток 4000 силовых линий, пронизывающий площадь  $4 \text{ см}^2$ , равен магнитной индукции:  
а — 1000 гс; б — 2000 гс; в — 4000 гс; г — 16 000 гс.
8. Ферритовый сердечник имеет магнитную индукцию 5000 гс по сравнению с 10 гс в воздухе. Магнитная проницаемость этого феррита:  
а — 100; б — 500; в — 5000; г — 50 000.
9. Ток 4 а, протекающий через катушку с 25 витками, образует:  
а — 2 а-в; б — 12,5 а-в; в — 25 а-в; г — 100 а-в.
10. Потери на гистерезис в магнитном сердечнике:  
а — увеличиваются с повышением частоты; б — уменьшаются с повышением частоты; в — остаются те же самые независимо от частоты; г — максимальны при постоянном токе.

11. Если виток провода пересекает магнитные силовые линии, то:  
а — ничего не произойдет; б — в проводе индуцируется ток, магнитное поле которого направлено противоположно внешнему магнитному полю; в — в проводе индуцируется ток, магнитное поле которого совпадает с внешним полем; г — магнитные поля не взаимодействуют.

12. Виток провода пересекает магнитные силовые линии. Если скорость пересечения возрастает, то:

а — индуцируемая э. д. с. увеличивается; б — индуцируемая э. д. с. уменьшается; в — индуцируемая э. д. с. остается прежней; г — за единицу времени пересекается меньше магнитных силовых линий.

13. В проводнике, проходящем перпендикулярно плоскости листа, ток протекает сверху вниз. Проводник:

а — не имеет магнитного поля; б — имеет магнитное поле, направленное по часовой стрелке в плоскости листа; в — имеет магнитное поле, направленное против часовой стрелки в плоскости листа; г — имеет магнитное поле, направленное против часовой стрелки в плоскости, перпендикулярной плоскости листа.

14. При наличии двух магнитных полей поле:

а — сильнее там, где магнитные силовые линии совпадают по направлению; б — сильнее там, где магнитные силовые линии имеют противоположное направление; в — имеет ту же напряженность, как и для одного магнита; г — слабее там, где магнитные силовые линии совпадают по направлению.

15. Соленоид представляет собой катушку, которая:

а — действует, как стержневой магнит, только тогда, когда в проводнике нет тока; б — действует, как стержневой магнит, при наличии тока в катушке; в — подобна круглому магниту, так как нет воздушного зазора; г — действует, как стержневой магнит, если она имеет стальной сердечник.

16. Если переключить батарею (рис. 72), то:

а — северный и южный полюсы у соленоида не изменятся; б — северный полюс будет слабее, чем южный; в — направление тока не изменится, изменятся лишь магнитные полюсы; г — направление тока и магнитные полюсы изменятся.

17. Если поменять магнитные полюсы (рис. 78), то источник механической энергии будет выталкивать проводник:

а — вверх; б — вниз; в — влево; г — вправо.

18. Если вместо проводника перемещается вверх магнит (рис. 82), то:

а — индуцируемый ток течет в том же направлении; б — индуцируемый ток течет в противоположном направлении; в — ток не индуцируется; г — работа не затрачивается.

19. Если изменить направление тока в витке (рис. 80), то:

а — виток вращаться не может; б — полюсы внешнего поля изменятся; в — виток будет вращаться в том же направлении; г — виток будет поворачиваться в противоположном направлении.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Объясните, почему постоянный магнит может притягивать стальной гвоздь.

а) Почему любой конец магнита притягивает гвоздь? б) Почему магнит может притягивать гвоздь через лист бумаги?

2. Назовите единицы и условные обозначения для следующих понятий: поток, магнитная индукция, напряженность магнитного поля.

3. Что такое магнитная проницаемость? Почему нет единиц измерения для магнитной проницаемости?

4. Объясните коротко, что означает насыщенный стальной сердечник.

5. По катушке, состоящей из 80 витков, протекает ток, равный 100 мА. Определите число ампер-витков. Если число витков увеличить до 100, какой необходим ток, чтобы получить те же самые ампер-витки?

6. Катушка со стальным сердечником имеет длину 20 см и число витков 1000. По ней протекает ток, равный 100 мА.

а) Какова напряженность магнитного поля в сердечнике в эрстедах?

б) Если магнитная проницаемость стального сердечника равна 200, какова магнитная индукция в гауссах в сердечнике?

7. Объясните способ намагничивания стального сердечника. Как можно его размагнитить?

8. Изложите правило для определения магнитной полярности соленоида.

а) Как можно изменить полярность соленоида? б) Почему нет магнитных полюсов, когда нет тока в соленоиде?

9. Укажите три пути повышения величины индуцируемой э. д. с. в катушке.

10. Магнитный поток в 900 мкс пересекает катушку с 1000 витками за 1 мксек. Какое напряжение индуцируется в катушке?

11. Катушка имеет 4000 витков. Каждый виток имеет среднюю длину 20 см и толщину провода 0,2 мм. Напряжение на зажимах катушки 10 в; удельное сопротивление провода 0,0175.

Определите: а) общую длину провода; б) диаметр катушки; в) сопротивление катушки; г) величину тока; д) число ампер-витков.

12. Имеются два одинаковых металлических стержня. Один из них магнит, а другой — нет. Как определить магнит, не прибегая к посторонним предметам?



В начале книги мы познакомились с постоянным электрическим током, т. е. таким, который протекает по цепи в одном направлении и с течением времени не изменяет своей величины.

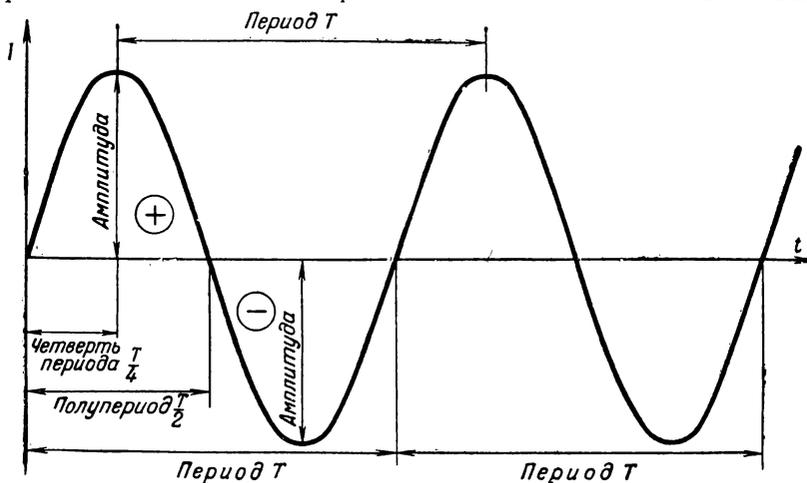


Рис. 88. Графическое изображение синусоидального переменного тока

Величину его можно менять путем изменения сопротивления цепи. Постоянный ток создается в цепи источниками, которые имеют постоянную полярность э. д. с. на зажимах. **Переменный ток в отличие от постоянного изменяется по величине и направлению.** Особенно важно то, что он, непрерывно меняясь по величине, создает переменное магнитное поле.

Синусоидальный ток

Большое распространение получил **периодический синусоидальный переменный ток**, называемый так потому, что он изменяется по закону кривой — «синусоиды», причем изменения его повторяются через равные промежутки времени. На рис. 88 приведено

графическое изображение синусоидального переменного тока. Ток, протекающий по проводнику в одном направлении, отложен над горизонтальной линией  $ot$ , изображающей время, а ток, протекающий в обратном направлении, — под ней. **Верхние полу-периоды принято считать положительными, а нижние — отрицательными.**

## 1. Параметры переменного тока

Постоянные величины, которые определяют характер изменения переменного тока, называются его **параметрами**.

К ним относятся **период, частота и амплитуда**.

**Период** — время, в течение которого происходит полный цикл изменений тока, после чего изменения повторяются, называется **периодом**. Период обозначается буквой  $T$  (рис. 88) и измеряется в секундах. Период еще можно определить как время одного полного колебания тока, исходя из того, что переменный ток представляет собой колебания электронов в проводе.

Период измеряется очень малыми долями секунды, особенно для переменных токов, применяемых в радиотехнике. Для характеристики переменных токов чаще пользуются другим параметром — частотой.

**Частота** — **числом периодов в одну секунду** или число полных колебаний тока в одну секунду.

Частота тока обозначается буквой  $f$ . Чтобы узнать, сколько колебаний тока произойдет за одну секунду, нужно 1 *сек* разделить на время одного колебания, т. е.

$$f = \frac{1}{T}. \quad (28)$$

Таким образом, **частота — это величина, обратная периоду**.

Частота измеряется в герцах (обозначается  $гц$  или  $Hz$ ). Частота переменного тока равна 1  $гц$ , если в секунду происходит одно колебание.

В радиотехнике приходится иметь дело с переменными токами высокой частоты, поэтому для удобства используется единица частоты, в 1000 раз бóльшая одного герца. Эта единица называется килогерцем ( $кгц$ ):

$$1 \text{ кгц} = 10^3 \text{ гц}.$$

В технике ультракоротких волн и сверхвысоких частот используются еще бóльшие единицы частоты — мегагерц ( $Мгц$ ) и гигагерц ( $Ггц$ ):

$$1 \text{ Мгц} = 10^3 \text{ кгц} = 10^6 \text{ гц};$$

$$1 \text{ Ггц} = 10^3 \text{ Мгц} = 10^6 \text{ кгц} = 10^9 \text{ гц}.$$

Амплитуда

**Амплитудой** тока называется наибольшее (максимальное) значение тока за время одного периода. За один период ток дважды проходит наибольшее ( $I_m$ ) значение: один раз при изменении в положительном направлении, другой — в отрицательном.

**Мгновенным значением** переменного тока называется значение тока для данного момента времени.

## 2. Генератор переменного напряжения

Принцип работы

Электрические машины, преобразующие механическую энергию в электрическую, называются **генераторами**.

Действие электрического генератора основано на известном нам явлении электромагнитной индукции.

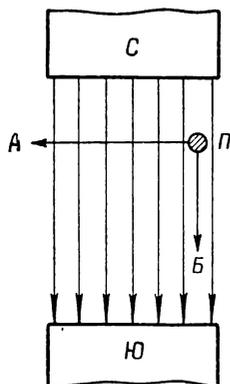


Рис. 89. Движение проводника в магнитном поле

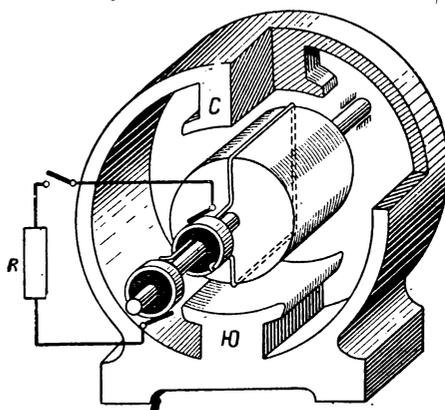


Рис. 90. Схема устройства генератора переменного тока

На рис. 89 изображен проводник  $П$ , идущий от нас за плоскость чертежа. При движении этого проводника в магнитном поле в направлении  $A$  в нем индуцируется наибольшая э. д. с.; при движении в направлении  $B$  э. д. с. не индуцируется, так как в первом случае проводник пересекает магнитный поток под прямым углом, во втором случае он его не пересекает, а как бы «скользит» вдоль него. Если угол, под которым проводник пересекает магнитный поток, изменяется от  $90^\circ$  до нуля, то индуцируемая э. д. с. тоже меняется от какого-то наибольшего значения до нуля.

В электрических машинах для получения переменного тока используется круговое движение проводника в магнитном поле.

На рис. 90 показан проводник, изогнутый в виде рамки, которая может вращаться вокруг оси. При вращении этой рамки

в магнитном поле в ней индуцируется э. д. с., величина которой изменяется по синусоидальному закону. Если рамку соединить с внешней цепью, то по ней потечет переменный синусоидальный ток.

Для соединения вращающейся рамки с неподвижной цепью служат два взаимно изолированных медных контактных кольца, насаженные на вал. Один конец рамки соединяют с одним кольцом, другой — с другим. При вращении рамки по кольцам скользят неподвижные щетки, к которым подключается внешняя цепь.

В рамке, находящейся в положении, изображенном на рис. 91, а, э. д. с. не индуцируется. Она возникает в проводни-

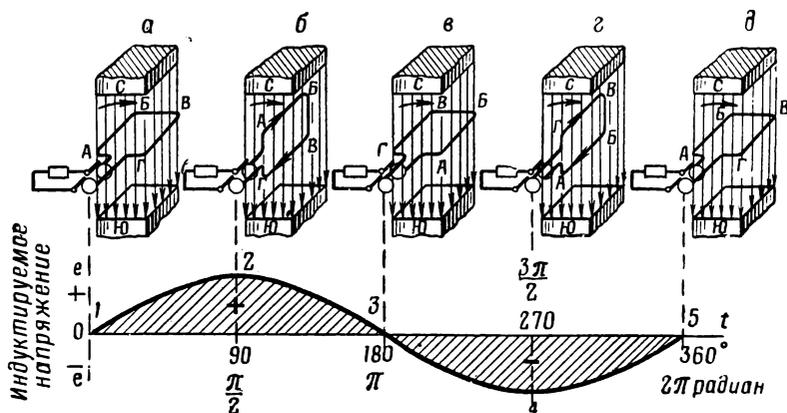


Рис. 91. Получение синусоидального переменного тока (вверху ряд последовательных положений рамки, внизу график изменения э. д. с.)

ках  $AB$  и  $BГ$  при вращении рамки по часовой стрелке. При прохождении проводника  $AB$  под северным, а  $BГ$  — под южным полюсом (рис. 91, б) э. д. с. достигает наибольшей величины. При дальнейшем вращении рамки э. д. с. уменьшается и становится равной нулю (рис. 91, в). Затем направление ее меняется, э. д. с. опять возрастает до наибольшего значения (рис. 91, г) и снова уменьшается до нуля (рис. 91, д). На этом заканчивается полный цикл ее изменения. В дальнейшем процесс индуктирования э. д. с. повторяется.

Направление э. д. с. определяется по правилу правой руки. В общей цепи э. д. с. совпадают по направлению. В первую половину периода э. д. с. в проводнике  $AB$  направлена от нас, а в проводнике  $BГ$  — на нас, во вторую половину — наоборот.

В двух положениях за один оборот рамка не пересекает магнитного поля (рис. 91, а и в). В проводниках  $BB$  и  $AG$  э. д. с. не индуцируется, так как они не пересекают магнитного поля.

Синусоидальную кривую обычно строят следующим образом: по горизонтальной оси откладывают время или угол поворота

рамки, а по вертикальной — э. д. с. или ток. Положительная часть синусоиды соответствует одному направлению э. д. с. в проводниках, отрицательная — другому.

С нулевого значения  $I$  начинает индуцироваться положительная полуволна напряжения, а с нулевого значения  $\mathcal{E}$  — отрицательная.

Изменение переменного тока в цепи происходит по синусоидальной волне, которая по форме точно соответствует синусоидальной волне переменного напряжения. Но только по форме: относительные величины тока и напряжения сравнивать нельзя, потому что это разные физические понятия.

Очень важно, что отрицательная полуволна приложенного к цепи напряжения образует ток с той же эффективностью, что и положительная полуволна: нить лампы нагревается одинаково. Меняется лишь направление тока, которое не влияет на нагревание нити, поскольку в том и другом случае электроны преодолевают одно и то же сопротивление, которое рассеивает мощность  $I^2R$ .

**Измерение угла поворота рамки.** Так как период соответствует вращению рамки по окружности, его выражают в углах, измеряемых градусами или радианами. Полный период равен  $360^\circ$ , половина периода —  $180^\circ$ , четверть периода —  $90^\circ$ . Проводник  $AB$  вращается по часовой стрелке от  $0$  до  $90^\circ$  и затем до  $180^\circ$  за одну половину периода, а за вторую половину проходит от  $180$  до  $360^\circ$ .

Для расчетов удобнее измерять угол поворота рамки в радианах. **Радян** (рис. 92) есть угол, дуга которого равна радиусу  $r$  окружности (или  $57,3^\circ$ ). Так как длина окружности  $2\pi r$ , период равен  $2\pi$  радиан ( $\pi = 3,14$ ), или  $360^\circ = 2\pi$ ,  $180^\circ = \pi$ ,  $90^\circ = \pi/2$  и  $270^\circ = 3\pi/2$  радиан.

Рассмотрим построение синусоидальной кривой, по закону которой изменяется переменный ток.

#### Построение синусоиды

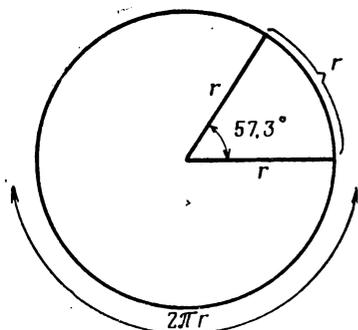
На рис. 93 изображен вектор  $OA$  (вектором называется величина, имеющая определенное числовое значение и направление). Пусть вектор вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью (за равные промежутки времени поворачивается на один и тот же угол). За период конец вектора опишет окружность.

Проведем из центра окружности две взаимно перпендикулярные линии: ось абсцисс  $Ox$  (горизонтальная линия) и ось ординат  $Oy$  (вертикальная линия). Если опустить из точки  $A$  перпендикуляр на ось ординат, то получим отрезок  $Oa$ , который называется проекцией вектора  $OA$ . При вращении вектора величина его проекции будет все время меняться от нуля до максимального значения (проекция равна вектору) и опять до нуля в положительном направлении (вверх); то же самое изменение последует в отрицательном направлении (вниз).

Для изучения характера этого изменения построим кривую, его изображающую. По оси абсцисс будем откладывать время, а по оси ординат — проекцию вектора  $OA$ .

Начнем построение кривой с того момента, когда вектор находится в положении  $OA_1$  (рис. 94, а). В этом случае проекция его на ось ординат равна нулю, а соответствующая точка кривой —  $K_1$ .

Через некоторый промежуток времени  $t_2$  вектор займет положение  $OA_2$  (рис. 94, б). Отложим на оси времени (на оси абсцисс) время  $t_2$ , восстановим перпендикуляр из этой точки и



Длина окружности

Рис. 92. Один радиан равен углу  $57,3^\circ$ . Полная окружность составляет  $2\pi$  радиан

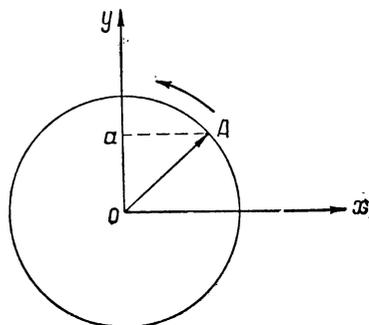


Рис. 93. Обозначение направления и величины при помощи вектора

отложим на нем проекцию вектора, которая в данном случае равна его величине. Получим точку  $K_2$ . Если аналогичным образом построить точки, соответствующие промежуточным положениям вектора  $OA$ , и соединить их, то получится плавная кривая  $K_1K_2$ .

Через промежуток времени  $t_3$  вектор займет положение  $OA_3$  (рис. 94, в); его проекция на ось ординат будет равна нулю, и соответствующая точка кривой  $K_3$  окажется на оси времени.

Через время  $t_4$  вектор займет положение  $OA_4$  (рис. 94, г); его проекция опять будет равна величине вектора, и соответствующая точка кривой окажется в положении  $K_4$ . Наконец, через время  $t_5$  вектор возвратится в исходное положение  $OA_1$  (рис. 94, д), где его проекция снова равна нулю, а точка  $K_5$  находится на оси времени.

Итак, вектор  $OA$  совершил полный оборот ( $360^\circ$ ) за время  $t_5 - t_1$ . Разность  $t_5 - t_1$  соответствует периоду колебаний  $T$ , потому что после точки  $K_5$  кривая будет изменяться точно так же, как от точки  $K_1$  до точки  $K_5$ . Кривая, изображенная на рис. 94, д, называется **синусоидой**. Она характеризует закон изменения величины проекции вращающегося вектора на ось  $y$ .

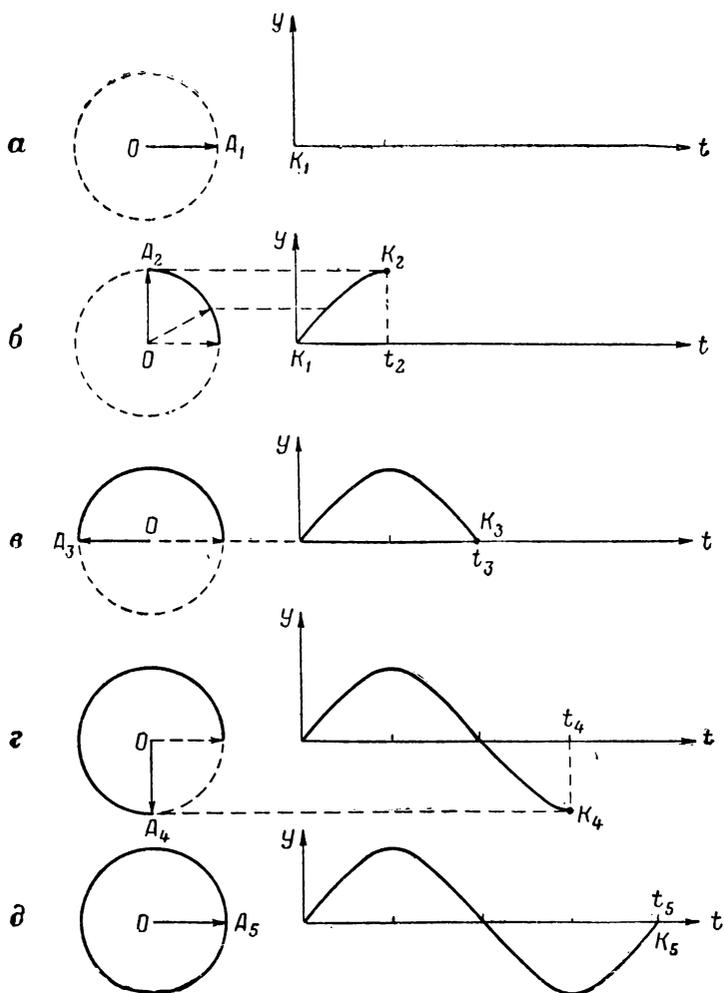


Рис. 94. Построение синусоиды

Выразив угол  $360^\circ$  в радианах ( $360^\circ = 2\pi$ ), получим угловую скорость вектора

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

Заменив  $T$  его значением  $\frac{1}{f}$ , получим круговую частоту

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

### Фаза

Угол поворота вектора относительно его начального положения в любой момент времени называется **фазой**. Фаза определяет мгновенное значение тока (или э. д. с.) и его направление в цепи: она показывает, возрастает ток или убывает.

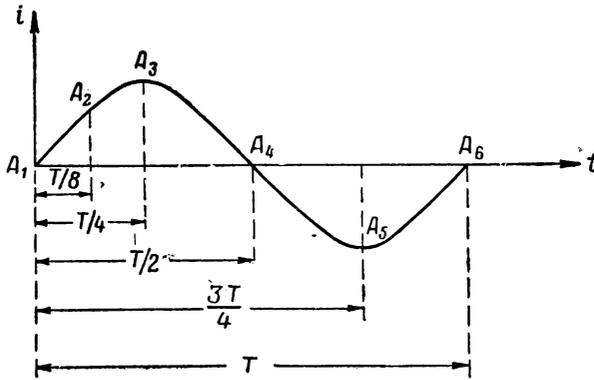


Рис. 95. Кривая синусоидального тока

Таким образом, **фазой** или **фазовым углом** называется угол, определяющий мгновенное значение тока (э. д. с., напряжения) в данный момент времени.

В физике фазой колебания называется всякое положение тела, совершающего периодические колебания. При колебании положение тела, т. е. его фаза, непрерывно изменяется.

На рис. 95 изображена кривая синусоидального изменения переменного тока. Точке  $A_1$ , находящейся на синусоиде, соответствует фазовый угол, равный нулю. Точкам  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$  и  $A_6$  соответствуют фазовые углы  $\frac{T}{8} = 45^\circ$ ,  $\frac{T}{4} = 90^\circ$ ,  $\frac{T}{2} = 180^\circ$ ,  $\frac{3T}{4} = 270^\circ$  и  $T = 360^\circ$ . Для удобства отсчета за начальную фазу принимается фаза нулевых или амплитудных (максимальных) значений.

На рис. 96 показаны кривые переменных токов  $i_1$  и  $i_2$ , совпадающих по фазе. Как принято говорить, сдвиг фаз между ними равен нулю, т. е. они одновременно проходят через нуль, одно-

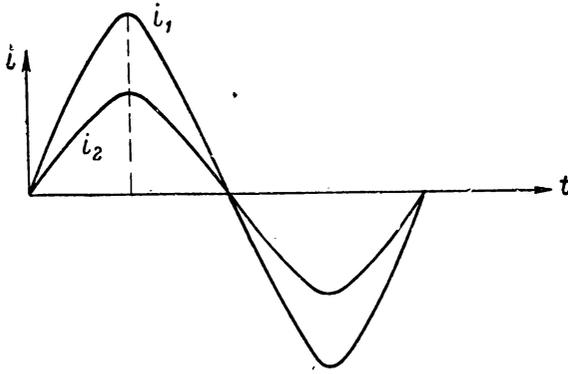


Рис. 96. Кривые двух синусоидальных токов, совпадающих по фазе

временно возрастают до наибольшего значения и уменьшаются до нуля и т. д.

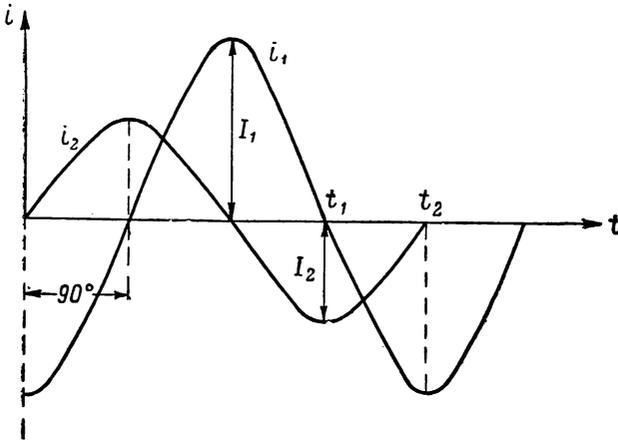


Рис. 97. Кривые двух синусоидальных токов, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$

На рис. 97 изображены кривые переменных токов  $i_1$  и  $i_2$ , сдвинутых по фазе. Ток  $i_2$  изменяется раньше тока  $i_1$ . Например, ток  $i_2$  имеет наибольшее отрицательное значение в момент  $t_1$ , а ток  $i_1$  — лишь в момент  $t_2$ , т. е. через четверть периода.

Следовательно, ток  $i_1$  отстает по фазе от тока  $i_2$  на  $90^\circ$ , или, другими словами, ток  $i_2$  опережает по фазе ток  $i_1$  на  $90^\circ$  (угол сдвига фаз обозначается обычно греческой буквой  $\varphi$ ).

Очень часто сдвиг фаз изображают векторами. На рис. 98 вектор  $I_1$  в некотором масштабе изображает действующее значение тока  $i_1$ , показанного на рис. 97, а вектор  $I_2$  — тока  $i_2$ . Поскольку ток  $i_1$  отстает по фазе от тока  $i_2$  на  $90^\circ$ , вектор  $I_1$  отложен под углом  $90^\circ$  к вектору  $I_2$  в сторону отставания.

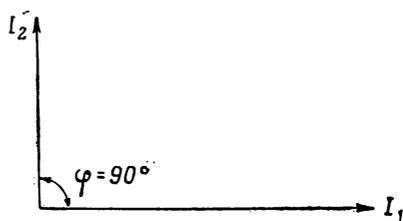


Рис. 98. Векторное изображение двух синусоидальных токов, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$

Стороной отставания условно принято считать направление движения часовой стрелки, стороной опережения — направление против движения часовой стрелки.

#### Синусоидальное напряжение

Форма волны напряжения, создаваемого на зажимах рамки при ее круговом вращении, синусоидальная. Индуктируемая э. д. с. максимальна при вертикальном положении рамки ( $\varphi = 90^\circ$ ). Она пропорциональна синусу угла поворота рамки для всего периода  $360^\circ$ .

В табл. 5 приведены числовые величины синуса некоторых углов, чтобы проиллюстрировать характерные особенности синусоидальной волны напряжения.

Таблица 5

Угол поворота рамки в градусах	Синус	Напряжение на зажимах витка
0	0	Ноль
30	0,5	50% максимальной величины
45	0,707	70,7% " "
60	0,866	86,6% " "
90	1	Положительная максимальная величина
180	0	Ноль
270	-1	Отрицательная максимальная величина
360	0	Ноль

Обратите внимание, что синусоидальная волна достигает половины своей максимальной величины при  $30^\circ$ , которые состав-

ляют  $1/3$  от  $90^\circ$ . Это означает, что синусоидальная волна вблизи от горизонтальной оси изменяется более резко, чем вдали от нее.

Мгновенное значение э. д. с. синусоидальной волны для любого угла вращения рамки определяется по формуле

$$e = E_m \sin \varphi (\theta), \quad (29)$$

где  $E_m$  — величина максимальной э. д. с.;

$\varphi$  — угол, при котором определяется мгновенная э. д. с.

**Пример 46.** Синусоидальная волна напряжения изменяется от нуля до максимальной величины, равной 100 в. Определить величину напряжения для 30, 45, 90 и  $270^\circ$ .

**Решение.** Согласно формуле (29) для  $30^\circ$

$$U = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ в};$$

для  $45^\circ$

$$U = 100 \cdot 0,707 = 70,7 \text{ в};$$

для  $90^\circ$

$$U = 100 \cdot 1 = 100 \text{ в};$$

для  $270^\circ$

$$U = 100 \cdot (-1) = -100 \text{ в}.$$

Как видно, напряжение при  $270^\circ$  то же самое, что и при  $90^\circ$ , но противоположной полярности ( $-100$  в).

### 3. Измерение переменного тока

Переменный ток, проходя по цепи, все время меняется по величине и направлению. Действующее значение Определять его мгновенные значения (т. е. величину тока в любой момент времени) измерительными приборами нельзя, потому что стрелка прибора не успевает следовать за быстрыми изменениями тока. Поэтому переменный ток измеряют, сравнивая его действие с действием постоянного тока. Это возможно потому, что всякое измерение есть сравнение одной величины с другой, условно принятой за единицу.

Действующим (или эффективным) значением переменного тока принято считать такой постоянный ток, который, проходя через одно и то же сопротивление в один и тот же промежуток времени, производит одинаковое с переменным током тепловое действие.

Действующее (или среднеквадратичное) значение переменного тока в  $\sqrt{2}=1,41$  раза меньше амплитудного значения (это справедливо только для синусоидальных токов), т. е.

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx \frac{I_m}{1,41}, \quad (30)$$

где  $I_d$  — действующее значение переменного тока<sup>1</sup>;  
 $I_m$  — амплитудное значение переменного тока.

**Пример 47.** Определить действующее значение переменного тока, если амплитуда тока  $I_m=28,2$  а.

**Решение.** По формуле (30)

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{28,2}{1,41} = 20 \text{ а.}$$

Точно так же определяется и действующее значение напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (31)$$

**Пример 48.** Действующее значение напряжения переменного тока равно 120 в. Определить амплитудное значение напряжения.

**Решение.** По формуле (31)

$$U_m = U\sqrt{2} = 120 \cdot 1,41 = 169,2 \text{ в.}$$

Чаще всего технические приборы, включаемые в цепь для измерения переменного тока, показывают его действующие значения.

Действующее значение широко используется для оценки синусоидальной волны напряжения или тока. Оно представляет собой величину синусоидальной волны при  $45^\circ$  и составляет 70,7% амплитудного значения.

Действующее значение = 0,707 × амплитудное значение.

Коэффициент 0,707 для среднеквадратичного значения получается, если синусы всех углов в полупериоде возвести в квадрат, сложить эти величины, сумму разделить на их число и из полученной величины извлечь квадратный корень.

При амплитуде напряжения 170 в действующее значение равно  $0,707 \cdot 170 \approx 120$  в. Это напряжение осветительной электрической сети, которое всегда выражается в действующем значении.

Переменное напряжение со среднеквадратичной величиной 120 в накалит электрическую лампочку до такой же степени,

<sup>1</sup> Обычно индекс «д» у действующего значения переменного тока или напряжения не пишется. Амплитудное значение тока (напряжения) обозначают  $I_m$ ,  $I_{\max}$  или  $I_{\max}$  ( $U_m$ ,  $U_{\max}$  или  $U_{\max}$ ).

как и напряжение 120 в постоянного тока. Исходя из этого, среднеквадратичную величину напряжения называют действующим напряжением.

**Амплитудное значение** Амплитудное значение тока (напряжения) также служит для оценки его синусоидальной волны. Зная амплитудное значение, можно определить действующую величину.

$$\begin{aligned} \text{Амплитудное значение} &= \frac{1}{0,707} \times \text{действующее значение} = \\ &= 1,414 \times \text{действующее значение.} \end{aligned}$$

**Среднее значение** Эта величина представляет собой среднеарифметическое всех углов синусоидальной волны тока (напряжения) за половину периода. Для определения среднего значения используется половина периода, так как средняя величина полного периода равна нулю и для сравнения никакого практического интереса не представляет.

Если величины тока (напряжения) синусоидальной волны для всех углов до  $180^\circ$  сложить, а затем разделить на число сложенных величин, то получится среднеарифметическое значение 0,637. Так как амплитудная величина синуса равна единице, то

$$\text{среднее значение} = 0,637 \times \text{амплитудное значение.}$$

#### 4. Низкие и высокие частоты

Все частоты переменного напряжения и тока можно разделить на два широких диапазона: низкие и высокие.

Диапазон низких частот включает в себя частоты от 16 до 18 000 гц, которые после преобразования в звуковые волны человеческое ухо воспринимает как звуки.

Чем больше частота, тем выше высота, или тон, звука; чем больше амплитуда, тем громче звук.

Однако волны переменного тока звуковой (низкой) частоты не следует путать со звуковыми волнами, которые создаются механическим путем. Электрические волны распространяются со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/сек и их можно слышать лишь после преобразования в звуковые волны, тогда как звук распространяется со скоростью 300 м/сек.

Переменный ток высокой частоты (от 18 000 гц до 30 000 Мгц) создает электромагнитные волны (радиоволны), используемые в технике связи.

## 5. Активное сопротивление

Под **активным сопротивлением** следует понимать сопротивление проводника, измеренное при переменном токе (обозначается  $r$  или  $R$ ). Сопротивление проводника при постоянном токе иногда называют омическим, а чаще всего — просто сопротивлением. При низких частотах (16—18 000  $\text{гц}$ ) переменного тока разница между активным и омическим сопротивлениями проводника очень мала и ею практически пренебрегают. При высоких частотах активное сопротивление в десятки раз больше омического. Это объясняется влиянием так называемого поверхностного эффекта.

### Поверхностный эффект

**Поверхностный эффект выражается в неравномерном распределении переменного тока по сечению проводника.** Это явление часто называют скин-эффектом (от английского слова «skin» — кожа), поскольку переменный ток высокой частоты практически протекает по поверхности («коже») проводника. В центре проводника плотность тока мала, а по мере приближения к поверхности возрастает. В силу этого полезное сечение проводника для переменного тока как бы уменьшается и сопротивление его увеличивается.

Заметное проявление на высоких частотах поверхностного эффекта позволяет применять в радиоаппаратуре катушки индуктивности, изготовленные не из сплошного провода, а из трубок.

Рассмотрим физическую сторону этого явления. На рис. 99 изображено поперечное сечение проводника с внешним и внутренним магнитными полями в момент, когда ток протекает от нас.

Предположим, проводник состоит из множества тонких проводящих нитей. Выделим две такие нити: у поверхности проводника  $1$  и около центра  $2$ .

Поскольку при изменении тока, протекающего по проводнику, одновременно изменяется и магнитный поток, следовательно, в проводнике индуцируется э. д. с., противодействующая изменению тока (правило Ленца).

При увеличении тока магнитный поток возрастает подобно тому, как расходятся концентрические волны от камня, брошенного в пруд. При этом нить  $1$  пересекает только наружный маг-

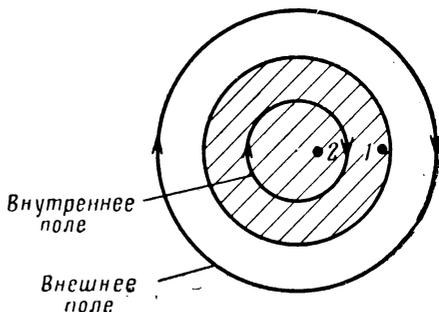


Рис. 99. Магнитное поле одиночного проводника с током

нитный поток, а нить 2 — весь магнитный поток. То же самое происходит и при уменьшении тока, когда магнитный поток «стягивается» к центру проводника.

Следовательно, величина индуктированной э. д. с. больше в центре, чем на поверхности. Отсюда противодействие для тока в центре проводника больше, а значит, величина тока в нити 1 больше, чем в нити 2.

Чем выше частота тока, тем сильнее противодействие индуктированной э. д. с., поскольку она возрастает.

В стальных проводах при прочих равных условиях внутреннее магнитное поле больше, чем в медных, поэтому поверхностный эффект проявляется сильнее.

## 6. Генератор постоянного напряжения

Современные электрические машины переменного тока имеют самое разнообразное устройство. Но принцип их работы один и тот же. Каждая электрическая машина должна иметь:

1. Магнитную систему, предназначенную для создания магнитного поля. Обычно вместо постоянных магнитов применяются электромагниты, так как с их помощью при меньших размерах можно получить значительно большую напряженность поля, чем от постоянных магнитов.

2. Вращающуюся часть — якорь с проводниками; при вращении якоря в проводниках индуктируется э. д. с.

Чтобы получить электрический генератор, создающий во внешней цепи постоянный ток, необходимо контактные кольца заменить особым приспособлением — **коллектором**. Такая электрическая машина называется **генератором постоянного тока**.

Из рис. 91 видно, что за один оборот рамки проводники *АБ* и *ВГ* дважды пересекают магнитное поле. В момент, когда рамка проходит нейтральное положение (рис. 91, *в*), направление э. д. с. в проводниках *АБ* и *ВГ* меняется. Чтобы получить постоянное направление тока во внешней цепи, необходимо в этот момент переключить концы рамки к проводам внешней цепи. Роль автоматического переключателя концов рамки и выполняет коллектор.

На рис. 100 изображен простейший коллектор, который состоит из двух полуколец, изолированных между собой и от вала. К одному полукольцу присоединяется один конец рамки (витка), к другому — другой. По полукольцам при вращении скользят неподвижные щетки  $\text{Щ}_1$  и  $\text{Щ}_2$ . При вращении рамки по часовой стрелке в проводнике *АБ* (рис. 100, *а*), когда он проходит около северного полюса, индуктируется э. д. с., направленная от *А* к *Б*. В это время проводник *ВГ* проходит около южного полюса и в нем индуктируется э. д. с., направленная от *В* к *Г*. Обе эти э. д. с. складываются и создают ток во

внешней цепи, направленный от щетки  $\mathcal{C}_1$  через нагрузку к щетке  $\mathcal{C}_2$ .

По мере вращения рамки наводимая в ней э. д. с. уменьшается. В момент, когда рамка займет вертикальное положение, э. д. с. будет равна нулю. Щетки при этом находятся на изолирующих прокладках, которые разделяют полуколья. Из рис. 100, б видно, что при дальнейшем вращении рамки проводник  $ВГ$  будет проходить около северного полюса, а проводник  $АБ$  — около южного. Следовательно, проводники поменялись

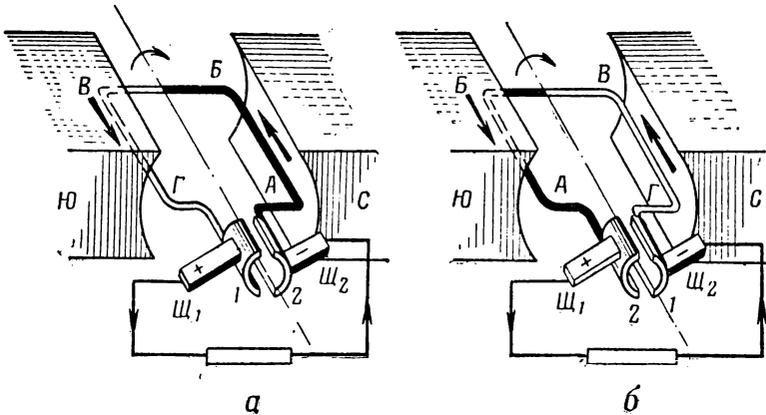


Рис. 100. Принцип преобразования переменного тока в постоянный при помощи коллектора:

а — исходное положение рамки; б — положение рамки после поворота на  $180^\circ$

местами и направление э. д. с. в рамке изменилось. Казалось бы, направление тока во внешней цепи тоже должно измениться, но благодаря коллектору этого не происходит. При повороте рамки повернулись и полуколья. Щетка  $\mathcal{C}_1$  скользит теперь по полуколью 2, а щетка  $\mathcal{C}_2$  — по полуколью 1. Вследствие этого ток во внешней цепи не изменяет своего направления и по-прежнему проходит от щетки  $\mathcal{C}_1$  через нагрузку к щетке  $\mathcal{C}_2$ .

Так как величина индуцируемой э. д. с. в рамке меняется, то меняется и величина тока в цепи.

Изменение тока в зависимости от положения рамки можно изобразить кривой, приведенной на рис. 101.

В электрических генераторах, применяемых для практических целей, вместо рамки используется катушка, состоящая из большого числа витков (рис. 102). Эти витки наматываются на стальной цилиндр, который вращается между полюсами магнита. Все это приводит к тому, что э. д. с. такой машины резко возрастает.

Стальной цилиндр вместе с намотанными витками называется **якорем**.

Если в машине используется одна катушка, то хотя напряжение на зажимах, а следовательно, и ток в цепи получаются постоянными по направлению, их величины меняются, или, как принято говорить, пульсируют в широких пределах — от нуля до какого-то наибольшего значения и снова до нуля (рис. 101). Для уменьшения пульсаций тока в цепи на стальной цилиндр

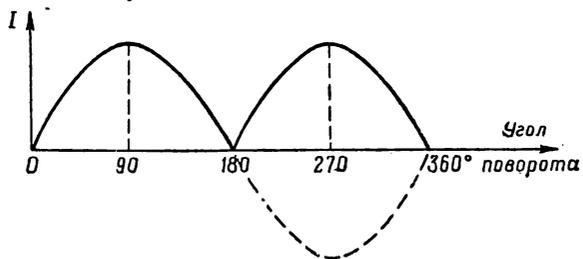


Рис. 101. Кривая тока, выпрямленного при помощи коллектора

наматывают несколько катушек, взаимно смещенных на определенный угол.

На рис. 103 схематически изображен якорь с двумя катушками (1—1 и 2—2), смещенными на 90°. В данном случае коллектор состоит не из двух полуколец, а из четырех пластин

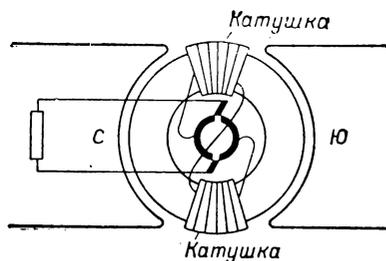


Рис. 102. Принцип устройства однокатушечного генератора постоянного тока

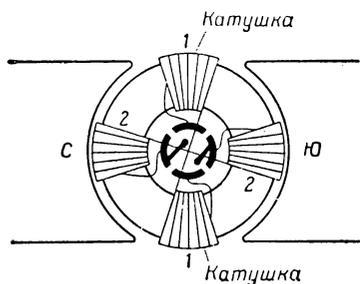


Рис. 103. Принцип устройства двухкатушечного генератора постоянного тока

(сегментов), изолированных между собой и от вала. По этим пластинам скользят при вращении якоря неподвижные щетки. К каждой пластине присоединяются концы катушек. Кривая изменения э. д. с. на зажимах щеток для этого случая показана на рис. 104.

Если сравнить кривые, изображенные на рис. 101 и 104, то видно, что во втором случае пульсация э. д. с. (а значит, и тока в цепи) меньше, чем в первом. При большем числе катушек, намотанных на якоре, можно получить еще менее пульсирующую э. д. с.

Для повышения напряжения на зажимах щеток необходимо катушки соединить в одну обмотку так, чтобы все катушки, намотанные на якорь, участвовали одновременно в создании э. д. с. Такие обмотки обычно используют в электрических генераторах промышленных типов.

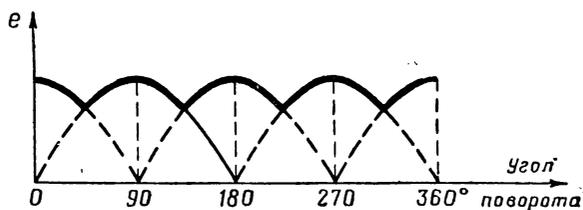


Рис. 104. Кривая изменения э. д. с. на зажимах двухкатушечного генератора

## 7. Принцип работы электродвигателя постоянного тока

**Электродвигателем** называется машина, преобразующая электрическую энергию в механическую.

Электрическая машина постоянного тока — **обратимая**. Это означает, что она без изменения конструкции может работать как в качестве генератора, так и в качестве электродвигателя.

Впервые принцип обратимости электрических машин был установлен академиками Э. Х. Ленцем и Б. С. Якоби. Если якорь машины постоянного тока вращать при помощи двигателя, то она будет работать как генератор. Если же по обмотке якоря пропустить постоянный ток от какого-либо источника, то машина будет работать как двигатель, преобразуя электрическую энергию в механическую.

Работа электродвигателя основана на явлении взаимодействия проводника, по которому проходит электрический ток, с магнитным полем. При этом возникает механическая сила, которая в зависимости от направления магнитного поля и тока в проводнике заставляет последний перемещаться в ту или иную сторону.

Проводники обмотки укреплены на якоре. В результате взаимодействия магнитного поля с обмоткой, подключенной к источнику электрического тока, якорь начинает вращаться. Направление вращения определяется по правилу левой руки.

На рис. 105 показано взаимодействие магнитных полей полюсов и проводов якоря. На рис. 105, *а* изображено магнитное поле полюсов, на рис. 105, *б* — магнитное поле одного витка. В результате взаимодействия этих полей виток *1* вместе с коллектором начнет вращаться по направлению часовой стрелки (рис. 105, *в*). Когда он займет положение, изображенное на рис. 105, *г*, пара пластин коллектора (к которым присоединен

этот виток) выйдет из-под щеток и ток перестанет проходить по этому витку, но под щетками окажется вторая пара пластин и ток пойдет теперь по витку 2. Виток 2 будет вращаться в ту же сторону, что и виток 1.

Коллектор предназначен для распределения тока по проводникам.

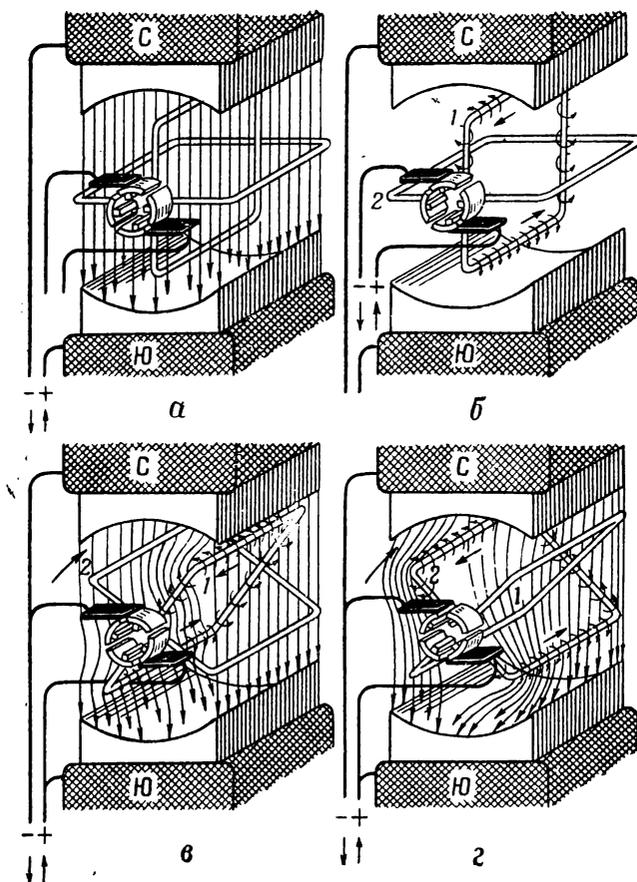


Рис. 105. Взаимодействие магнитных полей полюсов и провода якоря:

*а* — магнитное поле полюсов; *б* — магнитное поле одного витка;  
*в* — взаимодействие магнитного поля полюсов и поля витка 1;  
*г* — взаимодействие магнитного поля полюсов и поля витка 2

В проводниках, находящихся под северным полюсом магнита, ток проходит в одном направлении, а в проводниках, находящихся под южным полюсом, — в другом. Когда проводники меняются местами, направление тока в них тоже меняется.

Таким образом, если к щеткам подвести постоянный электрический ток, то якорь начнет непрерывно вращаться вокруг своей оси.

Как уже указывалось, для образования магнитного поля в электрических машинах вместо постоянных магнитов используются электромагниты. Обмотки этих электромагнитов называются **обмотками возбуждения**.

В зависимости от того, как обмотка возбуждения подключается к обмотке якоря, различают три типа генераторов и электродвигателей постоянного тока:

1. С параллельным возбуждением (шунтовые). Обмотка возбуждения подключается параллельно обмотке якоря.

2. С последовательным возбуждением (серийные). Обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря.

3. Со смешанным возбуждением (компаундные). Машина имеет две обмотки возбуждения: одна включается последовательно, а другая — параллельно обмотке якоря.

## 8. Трехфазное переменное напряжение

Среди многофазных систем переменного синусоидального тока наиболее широкое применение получила трехфазная.

**Трехфазной системой** называется совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют три электродвижущие силы одинаковой частоты, взаимно сдвинутые по фазе на угол  $120^\circ$  ( $\frac{2}{3}\pi$ ).

Генераторы переменного тока иногда называют альтернаторами.

На рис. 106 приведена принципиальная схема простейшего генератора трехфазного тока. Здесь на неподвижном стальном кольцевом сердечнике размещены три одинаковые обмотки, сдвинутые на  $120^\circ$ .

Они создают выходные напряжения, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$  (рис. 107).

Кольцеобразный сердечник с размещенными на нем обмотками является неподвижной частью генератора и называется **статором**.

Внутри статора вращается вокруг своей оси двухполюсный электромагнит, называемый **ротором** генератора. Обмотка ротора питается постоянным током от постороннего источника электрической энергии.

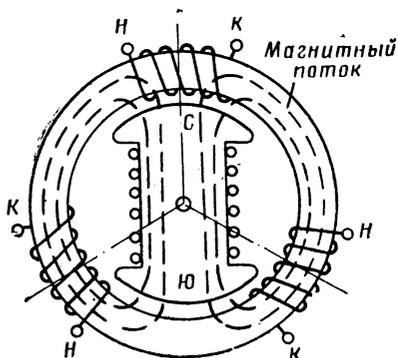


Рис. 106. Расположение обмоток трехфазного генератора

Трехфазное переменное напряжение обладает значительным преимуществом по сравнению с однофазным, так как требует меньшей затраты металла на провода при передаче одной и той же мощности. Другое весьма важное преимущество — возможность получения вращающегося магнитного поля, при помощи

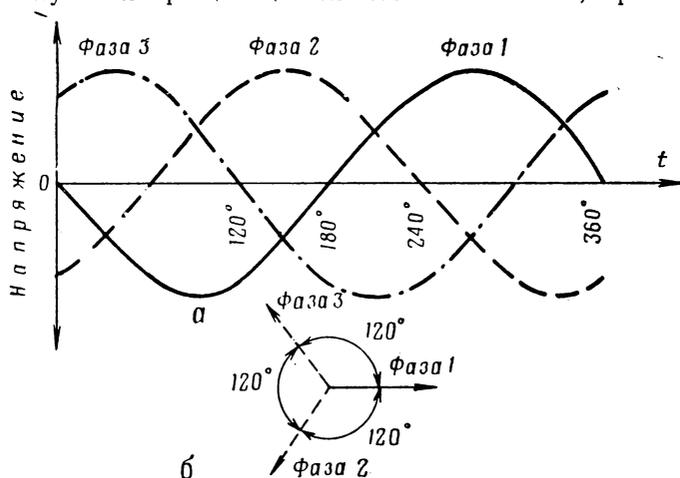


Рис. 107. Трехфазное переменное напряжение со сдвигом фаз  $120^\circ$ :  
 а — изменение синусоидального напряжения; б — векторная диаграмма

которого работают простые по конструкции и удобные в эксплуатации электрические машины.

При трехфазном переменном напряжении используются трех- или четырехпроводные соединительные линии.

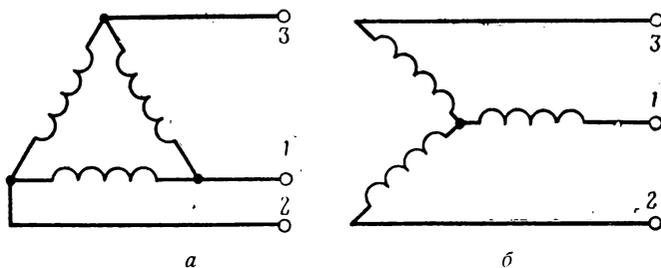


Рис. 108. Трехфазное переменное напряжение:  
 а — соединение «треугольником»; б — соединение «звездой»

Результирующее напряжение зависит от способа соединения обмоток генератора — «треугольником» или «звездой» (рис. 108). При соединении обмоток «треугольником» (рис. 108, а) напряжение на зажимах каждой пары линий равно напряжению на любой обмотке статора. Например, если обмотка каждой фазы

создает 120 в действующего напряжения, то это напряжение будет на зажимах 1—2, 2—3 и 1—3.

При соединении обмоток «звездой» (рис. 108, б) напряжение на зажимах любой пары проводов равно напряжению двух обмоток статора, соединенных последовательно со сдвигом фаз  $120^\circ$ . Поэтому векторная сумма напряжений двух обмоток на зажимах каждой линии в  $\sqrt{3}$  (1,73) раз больше напряжения выхода одной обмотки.

На рис. 109 приведено соединение «звездой» для четырехпроводной линии. В этом случае трехфазное напряжение 208 в

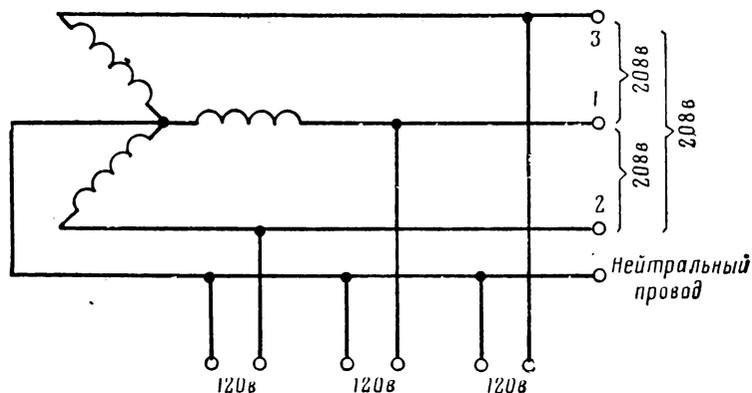


Рис. 109. Соединение «звездой» с нейтральным проводом

( $120 \cdot 1,73$ ) используется для питания асинхронных двигателей, а каждая из трех однофазных линий 120 в — для питания осветительных цепей.

## 9. Осветительная сеть

Практически все дома в Советском Союзе питаются переменным током с величиной действующего напряжения 127 или 220 в и частотой 50 гц. Это синусоидальное напряжение вырабатывается на электрических станциях и отсюда по проводам подводится к домам. Все потребители электрического тока (электрические лампочки, телевизор, утюг, электрическая плитка и т. д.) подключаются параллельно.

По тепловому воздействию мощность переменного тока напряжением 127 в эквивалентна мощности постоянного тока напряжением 127 в. Напряжение выше 220 в в домашних условиях не используется, так как увеличивается опасность поражения электрическим током. Напряжение ниже 127 в применять экономически невыгодно. При более высоком напряжении тепловые потери ( $I^2R$ ) получаются меньше, поскольку ту же самую мощность можно передать при меньшем токе.

Переменный ток по сравнению с постоянным легче «доставлять» к потребителям, потому что его практически без потерь можно изменять при помощи трансформатора. Для высоковольтных распределительных линий переменное напряжение на электрической станции повышается до сотен и тысяч киловольт, тепловые потери при этом значительно меньше, чем при 127 в. У потребителей высокое напряжение понижается до 127 или 220 в.

Наиболее подходящая частота переменного тока — 50 *гц*. Более низкие частоты требуют слишком громоздких трансформаторов и могут привести к миганию света. Слишком высокие частоты вызывают большие потери в сердечнике трансформатора на гистерезис.

В некоторых странах используется частота 60 *гц*.

### *Краткие выводы*

1. Переменное напряжение непрерывно изменяется по величине и периодически по направлению, т. е. периодически меняет свою полярность. Переменное напряжение, приложенное к сопротивлению нагрузки, создает в цепи переменный ток.

2. Время, в течение которого происходит полный цикл изменений тока, называется периодом. Период может измеряться от любой точки синусоиды до следующей точки, имеющей ту же величину и изменение в том же направлении. Один период равен  $360^\circ$ , или  $2\pi$  радиан.

3. Значение постоянного тока, проходящего через одно и то же сопротивление в один и тот же промежуток времени, что и данный переменный ток, и выделяющего равное с ним количество тепла, называется эффективным или действующим значением переменного тока.

4. Среднеквадратичное значение синусоидальной волны равно величине 0,707, умноженной на амплитудное значение. Амплитуда при  $90^\circ$  и  $270^\circ$  в периоде равна величине 1,414, умноженной на среднеквадратичное значение. Среднее значение равно величине 0,637, умноженной на амплитуду.

5. Частота равна числу периодов в секунду. Диапазон звуковых частот приблизительно равен 16—18 000 *гц*. Более высокие частоты — от 18 000 *гц* до 30 000 *Мгц* — относятся к диапазону радиоволн.

6. Время одного периода обозначается буквой  $T$ . Период и частота связаны между собой равенством  $T = \frac{1}{f}$  или  $f = \frac{1}{T}$ .

Чем выше частота  $f$ , тем меньше период  $T$ . Частота осветительной сети 50 *гц*; один период соответствует 1/50 *сек*.

7. Если две синусоидальные волны одной и той же частоты пересекают ось времени в одних и тех же точках при одном и том же направлении, эти две волны находятся в фазе.

8. Если две синусоидальные волны одной и той же частоты пересекают ось времени в различных точках или в одних и тех же точках, но при различном направлении, то эти две волны находятся не в фазе.

9. Фазовый угол (сдвиг по фазе) выражает разность во времени между двумя одинаковыми мгновенными значениями тока (напряжения) в разных периодах колебаний одной и той же частоты. Если одна синусоидальная волна максимальна, а другая равна нулю, значит, они сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Две волны с фазовым углом, равным нулю, находятся в фазе. Фазовый угол, равный  $180^\circ$ , означает, что две волны находятся в противоположной фазе. Длина вектора соответствует амплитуде, а угол поворота вектора относительно его начального положения в любой момент времени соответствует фазе. Опережение по фазе отсчитывается углами поворота против часовой стрелки.

10. Переменное напряжение, приложенное к активному сопротивлению нагрузки, создает в цепи переменный ток с той же частотой и фазой. Величина тока равна  $I = \frac{U}{R}$ .

11. Каждая электрическая машина (генератор, электродвигатель) должна иметь: якорь, полюсы для создания магнитного поля, пересекаемого витками якоря, контактные кольца (для машин переменного тока) или коллектор (для машин постоянного тока) и щетки.

12. В генераторах трехфазного напряжения каждое из напряжений сдвинуто по фазе на  $120^\circ$ . Обмотки генератора соединяются «треугольником» или «звездой».

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем разница между переменным и постоянным напряжениями?
  - а — переменное напряжение постоянно по величине;
  - б — полярность постоянного напряжения периодически меняется;
  - в — полярность переменного напряжения периодически меняется, а постоянного — нет;
  - г — переменное напряжение имеет постоянную полярность.
2. Период синусоидальной волны:
  - а — не связан с частотой;
  - б — прямо пропорционален частоте;
  - в — обратно пропорционален частоте;
  - г — не определяется.
3. Две волны всегда (в любой момент) сдвинуты по фазе, если:
  - а — их частоты различны;
  - б — их частоты одни и те же, но амплитуды меняются;
  - в — их частоты различны, но амплитуды одни и те же;
  - г — их частоты одни и те же, но колебания начинаются в разное время.
4. Один полный период переменного напряжения или тока равен:
  - а —  $180^\circ$ , или  $\frac{\pi}{2}$  радиан;
  - б —  $180^\circ$ , или  $\pi$  радиан;
  - в —  $360^\circ$ , или  $2\pi$  радиан;
  - г —  $360^\circ$ , или  $2\pi$  радиан.
5. Средняя величина одного изменения синусоидальной волны равна:
  - а —  $U_{\max} : 0,707$ ;
  - б —  $U_{\max} : 0,637$ ;
  - в —  $U_{\max} \cdot 0,637$ ;
  - г —  $U_{\max} \cdot \sqrt{2}$ .

6. Действующая (эффективная) величина синусоидальной волны определяется как:

а —  $U_{\text{макс}} : 0,707$ ; б —  $U_{\text{макс}} \cdot 0,707$ ;

в —  $U_{\text{макс}} : U_{\text{ср}}$ ; г —  $U_{\text{макс}} \cdot \sqrt{2}$ .

7.  $U_{\text{макс}}$  равно:

а —  $U_{\text{ср}} \cdot 0,637$ ; б —  $U_{\text{д}} \cdot 0,707$ ;

в —  $U_{\text{ср}} \cdot 0,707$ ; г —  $U_{\text{д}} \cdot \sqrt{2}$ .

8. Когда две волны сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , то:

а — каждая имеет свою амплитудную величину в одно и то же время;

б — каждая имеет свою минимальную величину в одно и то же время;

в — одна имеет положительную амплитуду, а другая отрицательную; г —

одна имеет максимальную величину, когда другая равна нулю.

9. Какой из следующих периодов соответствует наибольшей частоте?

а —  $1/60$  сек; б —  $1/30$  сек; в — 30 сек; г — 60 сек.

10. Переменное напряжение, действующая величина которого равна

120 в, приложено к сопротивлению 100 ом. Ток равен:

а — 1,2 а максимальной величины; б — 1,2 а действующей величины;

в — 1,7 а действующей величины; г — 1,7 а средней величины.

11. В трехфазном генераторе:

а — напряжения сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ ; б — обмотки должны быть

соединены «треугольником»; в — обмотки должны быть соединены «звездой»;

г — напряжения сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .

12. Щетки в генераторе или электродвигателе:

а — нужны только для электродвигателей переменного тока; б — изо-

лируют ротор от статора; в — соединяют ротор с внешней цепью; г — не

нужны для электродвигателей постоянного тока.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Дайте определение переменному напряжению и току.

2. Чему равен угол, измеряемый в градусах и радианах, для одного периода,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $3/4$  периода?

3. Амплитудное значение синусоидальной волны 1 в. Определите: среднюю величину, действующую величину, двойное амплитудное значение.

4. Изобразите графически две волны, частоты которых различаются в два раза.

5. Изобразите графически две синусоидальные волны и векторные диаграммы, сдвинутые по фазе на  $180$  и  $90^\circ$ .

6. Напряжение 120 в, 50 гц приложено к сопротивлению 10 ом. Какова величина действующего тока в цепи? Какова частота тока? Каков фазовый угол между током и напряжением?

7. Каково назначение якоря, поля статора, коллекторных колец и щеток в электрических машинах?



### 1. Понятие об индуктивности

Вокруг катушки, по которой протекает ток, создается магнитное поле.

**Явление самоиндукции**

Если изменять величину тока, проходящего по катушке, то будет изменяться и магнитный поток. По закону электромагнитной индукции изменение магнитного потока вызывает появление э. д. с. Следовательно, изменяющийся магнитный поток катушки будет индуцировать в ней э. д. с., которая называется **электродвижущей силой самоиндукции**.

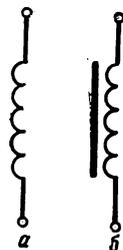
Способность проводника (катушки) индуцировать в самом себе э. д. с. при изменении величины тока, проходящего по нему, называется **самоиндукцией**.

Эта способность характеризуется индуктивностью, величина которой показывает, в какой степени проводнику свойственна самоиндукция. Длинный проводник имеет большую индуктивность, чем короткий, так как большая его длина пересекается магнитным потоком. У катушки индуктивность больше, чем у эквивалентной прямой проволоки, вследствие сгущения магнитного потока внутри витков. Еще большей индуктивностью обладает катушка со стальным сердечником в силу увеличения (индукции) в нем магнитного потока.

Условное изображение катушки индуктивности приведено на рис. 110.

**Индукция переменным током**

Индуктируемая э. д. с. создается при пересечении проводника магнитным потоком в результате движения магнитного поля или проводника. Когда ток в проводнике изменяется по амплитуде, изменение тока и связанного с ним магнитного поля равноценно движению магнитного потока.



**Рис. 110.** Условное изображение катушек индуктивности:

*a* — катушка без сердечника;  
*б* — катушка со стальным сердечником

На рис. 111 показано изменение магнитного поля, связанного с синусоидальным переменным током. Поскольку переменный ток изменяется по амплитуде и по направлению, связанное с ним магнитное поле также изменяется по величине и направлению. В точке 1 ток равен нулю, поэтому магнитного потока нет. В точке 2 ток создает некоторое поле, силовые линии которого направлены против часовой стрелки. В точке 3 ток имеет максимальную величину и максимальный магнитный поток в этом направлении. В точке 4 магнитный поток меньше, чем в точке 3, — поле убывает с уменьшением тока. В точке 5 ток и магнитный поток равны нулю.

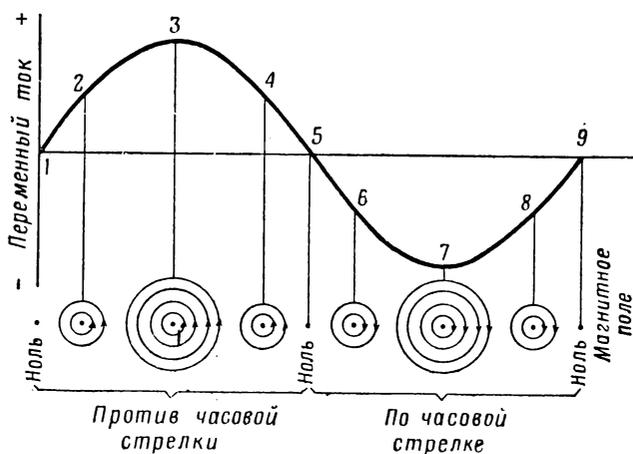


Рис. 111. Магнитное поле переменного тока непрерывно изменяется: возрастает, убывает и меняет свое направление

В следующую половину периода произойдет такое же возрастание и убывание магнитного поля, но уже по часовой стрелке, поскольку ток и магнитный поток изменят направление.

Изменяющийся магнитный поток, пересекая проводник, в котором протекает ток, индуцирует в этом проводнике э. д. с. В любом другом проводнике, помещенном в то же переменное поле, индуцируется э. д. с. независимо от того, есть в нем ток или нет.

**Обязательное условие для индуктирования э. д. с. — изменение тока, необходимое, чтобы вызвать изменение магнитного потока.** Постоянный ток даже в тысячи ампер не может создать никакой индуцируемой э. д. с., в то время как переменный ток в 1 мка индуцирует э. д. с.

Величина э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения магнитного потока и от величины индуктивности. Чем быстрее изменяется магнитный поток, тем больше э. д. с. самоин-

дукции. При размыкании цепи э. д. с. самоиндукции может достигать очень больших значений, что вызывает обгорание контактов у рубильника или пробой изоляции у включенных приборов. Это объясняется тем, что при выключении цепи ток резко падает до нуля и созданное им поле вокруг катушки исчезает практически мгновенно, вызывая резкий скачок э. д. с. самоиндукции. **Чем больше индуктивность катушки, тем больше магнитный поток и тем больше э. д. с. самоиндукции.**

Поскольку индуктивность определяет величину индуктируемой э. д. с., она играет важную роль в любой цепи переменного тока, характеризуя эту цепь наравне с сопротивлением. Одна и та же индуктивность создает меньшую индуктируемую э. д. с. при низких частотах и большую — при высоких.

В цепи постоянного тока индуктивность следует учитывать, когда ток изменяется по величине (совсем не обязательно изменять его направление), например, когда он возрастает от нуля до постоянной величины при включении и уменьшается от постоянной величины до нуля при выключении.

**Правило Ленца** Направление э. д. с. самоиндукции определяется по правилу Ленца. **Если ток в цепи увеличивается, то э. д. с. самоиндукции препятствует его возрастанию**, создавая ток, направленный против основного тока. **При уменьшении тока в цепи э. д. с. самоиндукции препятствует его убыванию**, создавая ток, совпадающий с основным током. Другими словами, ток, проходящий через катушку индуктивности, вызывает появление магнитного поля, которое в свою очередь индуктирует вторичный электрический ток. Вторичный ток всегда препятствует изменению основного тока.

Рассмотрим процесс нарастания тока в цепи с катушкой индуктивности. Как только по катушке пойдет ток, вокруг нее возникнет магнитное поле, которое вызовет появление «встречного» тока в самой катушке. Поскольку по одному проводу ток одновременно в двух противоположных направлениях течь не может, происходит ослабление включаемого тока, т. е. ток нарастает медленно, а не мгновенно устанавливается нормальным. Самоиндукцию можно условно сравнить с инерцией. Всем известно, что тяжело нагруженную вагонетку трудно привести в движение. Но если эта вагонетка движется, то ее трудно и остановить. Чем тяжелее вагонетка, тем труднее ее сдвинуть с места или остановить; точно так же, чем больше индуктивность катушки, тем труднее изменить величину проходящего через нее тока. Таким образом, как инерция замедляет изменение скорости тела, так и индукция замедляет изменение величины тока.

Следовательно, индуктивность препятствует любому изменению тока.

Поясним это на примере.

1. Как показано на рис. 112, внешний генератор с напряжением  $U$  создает изменение тока  $\Delta I$  (греческая буква  $\Delta$  — дельта — является символом изменения величины) в катушке, на зажимах которой появится э. д. с. самоиндукции  $E_L$ .

2. Индуцированная э. д. с.  $E_L$  создает ток  $I_L$ .

3. Когда ток  $\Delta I$  увеличивается (рис. 112, а), индуцированная э. д. с. имеет полярность, которая вызывает ток в противоположном направлении. В результате ток  $\Delta I$  растет медленнее.

4. Когда ток  $\Delta I$  уменьшается (рис. 112, б), индуцированная э. д. с. имеет полярность, при которой ток идет в том же направлении, что и ток генератора. Индуцированный ток препятствует уменьшению тока генератора, т. е. ток  $\Delta I$  убывает медленнее.

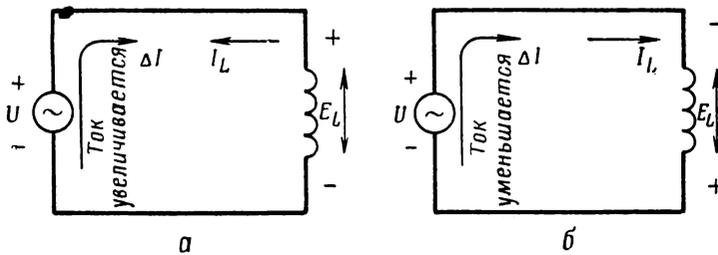


Рис. 112. Индуктивное напряжение  $E_L$  создает ток, который препятствует изменению тока  $\Delta I$ :

а —  $\Delta I$  увеличивается —  $I_L$  направлен против  $I$ ; б —  $\Delta I$  уменьшается —  $I_L$  совпадает по направлению с  $I$

Поскольку изменение тока  $\Delta I$  происходит в результате изменения генерируемого напряжения  $U$ , индуцируемая э. д. с. препятствует изменению напряжения  $U$ . Поэтому **индуцируемую э. д. с. часто называют противоэлектродвижущей силой** (или обратной э. д. с.).

В катушках с большой индуктивностью величина индуцированной э. д. с. (э. д. с. самоиндукции) может достигать очень больших значений, особенно при резком изменении тока. Большая э. д. с. самоиндукции возникает в катушке при ее включении и особенно при отключении от источника тока. При определенных условиях эта э. д. с. может привести к пробое изоляции между витками. Ток в катушке при ее отключении от источника питания называется **экстратокком размыкания**.

Как выяснено выше, способность катушки (проводника) индуцировать э. д. с. в самой себе, когда изменяется ток, оценивается ее индуктивностью (иногда можно встретить термин «коэффициент самоиндукции»). Индуктивность характеризует связь между скоростью изменения тока в цепи и возникающей при этом э. д. с. самоиндукции.

Индуктивность обозначается буквой  $L$  и измеряется в единицах генри (сокращенно  $гн$  или  $H$ ). Генри есть индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока на один ампер в одну секунду возникает э. д. с. самоиндукции в один вольт (рис. 113), т. е.

$$L = \frac{-E}{\frac{\Delta I}{T}} \text{ (генри)}, \quad (32)$$

где  $E$  — индуцируемая э. д. с. в в;  
 $\frac{\Delta I}{T}$  — изменение тока в а/сек.

Знак минус перед  $E$  показывает, что полярность индуцируемой э. д. с. противоположна полярности приложенного напряжения. При подсчете величины  $L$  полярность во внимание не принимается.

**Пример 49.** Определить индуктивность катушки, если при изменении тока от 112 до 114 а за 1 сек на ее зажимах индуцируется напряжение 10 в.

Решение. Так как изменение тока равно  $\frac{(114 - 112) \text{ а}}{1 \text{ сек}} = 2 \text{ а/сек}$ , по формуле (32)

$$L = \frac{10 \text{ в}}{2 \text{ а/сек}} = 5 \text{ гн}.$$

Индуктивность катушки возрастает при увеличении числа витков, диаметра и длины катушки и магнитной проницаемости сердечника.

Для прямой катушки без сердечника с плотно намотанными витками индуктивность увеличивается прямо пропорционально квадрату числа витков и квадрату диаметра катушки. Увеличение диаметра или числа витков в два раза вызывает возрастание индуктивности в четыре раза. Если удвоить и число витков, и диаметр катушки, индуктивность увеличится в 16 раз.

Зависимость индуктивности от длины катушки прямо пропорциональная: удвоение длины удваивает индуктивность.

В радиотехнике часто приходится иметь дело с катушками, обладающими небольшими индуктивностями. В этом случае используются единицы меньше генри:

— миллигенри (тысячная доля генри), сокращенно обозначается  $мгн$  или  $мН$ ;  $1 \text{ мгн} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ гн}$ ;

— микрогенри (миллионная часть генри), сокращенно обозначается  $мкгн$  или  $\mu H$ ;  $1 \text{ мкгн} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ гн}$ .

Катушки со стальным сердечником, используемые в цепях переменного тока 50 гц и в цепях звуковых частот, имеют индуктивность 1—25 гн.

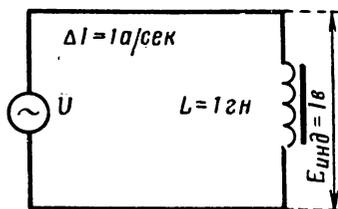


Рис. 113. Когда ток, изменяющийся со скоростью 1 а в 1 сек, индуцирует 1 в на зажимах катушки  $L$ , ее индуктивность равна 1 гн

## 2. Взаимная индукция

Когда в проводнике изменяется ток, меняющийся магнитный поток, пересекая расположенный вблизи другой проводник, индуцирует в обоих проводниках э. д. с. (рис. 114). Катушка  $L_1$  подключена к генератору, который создает переменный ток  $\Delta I$  в ее витках. Катушка  $L_2$  находится в магнитном поле катушки  $L_1$ , поэтому изменяющийся ток последней индуцирует э. д. с. на зажимах обеих катушек.

Если весь магнитный поток катушки  $L_1$  связан со всеми витками катушками  $L_2$ , то в каждом витке и той и другой индукти-

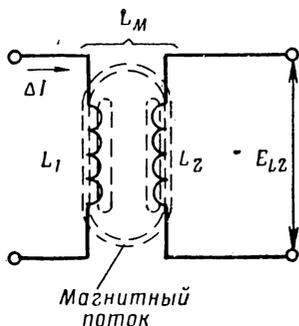


Рис. 114. Взаимная индукция  $L_M$  между катушками  $L_1$  и  $L_2$ , связанными магнитным потоком

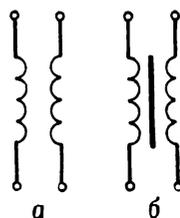


Рис. 115. Условные изображения двух катушек со взаимной индукцией: *a* — без сердечника; *б* — со стальным сердечником

руется одинаковая э. д. с. Таким образом, индуцируемая э. д. с.  $E_{L2}$  может создать ток в сопротивлении нагрузки, подключенном к катушке  $L_2$ .

Когда индуцируемая э. д. с. создает ток в катушке  $L_2$ , ее переменное магнитное поле индуцирует э. д. с. в катушке  $L_1$ . Таким образом, в катушках  $L_1$  и  $L_2$  возникает взаимная индукция: так как ток в одной из них может вызвать э. д. с. в другой.

Единицей взаимной индукции (взаимоиндукции), как и индуктивности, служит генри. Обозначается она через  $L_M$  (или  $M$ ).

**Две катушки имеют взаимную индукцию 1 гн, когда изменение тока 1 а/сек в одной катушке вызывает э. д. с. 1 в на зажимах другой.**

Условные изображения двух имеющих взаимную индукцию катушек без стального сердечника и со стальным сердечником показаны соответственно на рис. 115, *a* и *б*. Магнитные силовые линии, которые не связывают обе катушки, образуют поток утечки.

Степень взаимодействия катушек индуктивности оценивается коэффициентом связи ( $k$ ). Коэффициент связи показывает, какую часть предельной величины э. д. с., которую могла бы навести первичная катушка во вторичной, составляет фактически наведенная э. д. с. Например, если весь поток одной катушки охватывает другую, то  $k=1$ . Если только половина потока одной катушки охватывает другую, то  $k=0,5$ .

Коэффициент связи может принимать значения от нуля до единицы и часто выражается в процентах. Чем ближе одна к

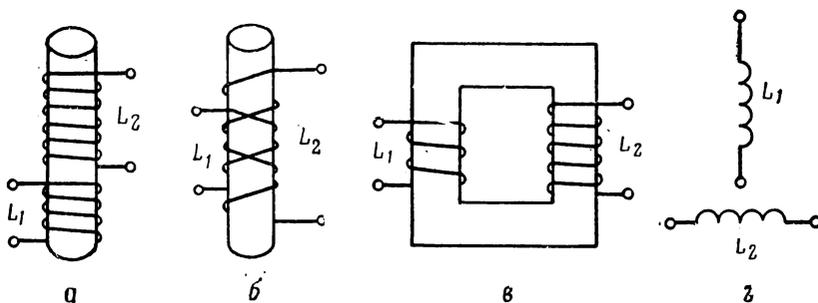


Рис. 116. Магнитная связь между двумя катушками, связанными взаимной индукцией:

*a* — катушки намотаны на каркас с воздушным сердечником,  $k \approx 0,1$ ; *b* — катушка  $L_2$  намотана на катушку  $L_1$ ,  $k \approx 0,3$ ; *v* — катушки расположены на общем стальном сердечнике,  $k \approx 1$ ; *z* — катушки без сердечников расположены взаимно перпендикулярно,  $k \approx 0$

другой размещены катушки, тем больше коэффициент связи. Величина его зависит только от взаимного расположения катушек и не зависит от количества витков в них, т. е. от их индуктивности.

На рис. 116, *a* изображены катушки  $L_1$  и  $L_2$ , намотанные на бумажный или пластмассовый каркас без стального сердечника. В этом случае  $k \approx 0,1$ . На рис. 116, *b* изображены катушки  $L_1$  и  $L_2$ , намотанные на тот же каркас одна на другую. Для этого случая  $k \approx 0,3$ . На рис. 116, *v* катушки  $L_1$  и  $L_2$  находятся на общем стальном сердечнике. Теперь  $k \approx 1$ . Коэффициент связи будет около нуля, если катушки  $L_1$  и  $L_2$  без сердечника расположить взаимно перпендикулярно (рис. 116, *z*) на определенном расстоянии одну от другой.

Чем больше величина  $k$ , тем сильнее связь, тем бо́льшая э. д. с. индуцируется во вторичной катушке. И наоборот, чем меньше  $k$ , тем слабее связь.

Катушки без сердечника, намотанные на одном каркасе, имеют коэффициент связи от 0,05 до 0,3, что соответствует 5—30% связи.

**Определение  
взаимоиндукции**

Чтобы различать пары катушек по их способности взаимно индуцировать э. д. с., введено понятие **взаимоиндукции**.

Если известны индуктивности взаимосвязанных катушек и коэффициент связи, то взаимоиנדуктивность нетрудно определить по формуле

$$L_M = k \sqrt{L_1 L_2}, \quad (33)$$

где  $L_M$  — взаимоиנדуктивность в гн;

$L_1$  и  $L_2$  — индуктивности катушек в гн;

$k$  — коэффициент связи (размерности не имеет, поскольку он представляет отношение двух величин, имеющих одну и ту же размерность).

Для случая, приведенного на рис. 116, в, когда  $L_1 = 2$  гн и  $L_2 = 8$  гн,  $k = 1$ . Тогда по формуле (33)

$$L_M = 1 \sqrt{2 \cdot 8} = \sqrt{16} = 4 \text{ гн.}$$

Это означает, что если ток в одной катушке будет изменяться со скоростью 1 а/сек, то он будет индуцировать в другой катушке э. д. с., равную 4 в.

### 3. Трансформаторы

**Трансформатором называется прибор, дающий возможность повышать или понижать напряжение в цепи переменного тока.**

Впервые выдвинул идею трансформации (т. е. изменения) напряжения переменного тока П. Н. Яблочков в 1876 г., а в 1882 г. трансформатор конструкции Яблочкова демонстрировался на электротехнической выставке в Петербурге и получил заслуженное признание.

В том же году на промышленной выставке в Москве был представлен трансформатор другого русского изобретателя, И. Ф. Усагина, имевший такой же принцип действия и отличавшийся от трансформатора Яблочкова только конструкцией.

**Работа трансформатора основана на использовании явления электромагнитной индукции.**

Простейший трансформатор (рис. 117, а) состоит из стального сердечника и двух размещенных на нем катушек (обмоток). Обмотки из изолированного провода электрически не связаны между собой. Одна из них (первичная) присоединяется к источнику переменного тока, а к другой обмотке (вторичной) подключен потребитель.

Назначение сердечника — увеличивать магнитный поток, т. е. усиливать индуктивную связь между обмотками.

Однако в трансформаторах, предназначенных для работы в цепях переменного тока высокой частоты, стальные сердечники не применяются.

Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки, создает в стальном сердечнике переменное магнитное поле, которое, пересекая витки вторичной обмотки, наводит в них э. д. с. индукции.

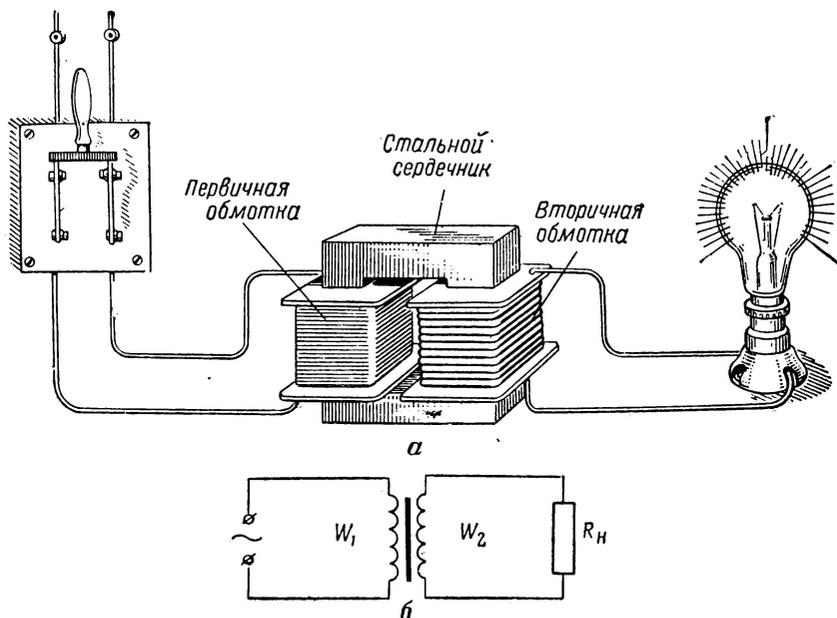


Рис. 117. Простейший трансформатор:  
а — внешний вид; б — схема

На рис. 117, б приведена схема. Первичная обмотка  $w_1$  трансформатора соединена с источником напряжения, а ко вторичной обмотке  $w_2$  подключено сопротивление нагрузки  $R_H$ . Индуцируемая э. д. с. создает ток в сопротивлении нагрузки  $R_H$ . Хотя обмотки не соединены одна с другой, мощность из первичной обмотки поступает во вторичную через магнитное поле, которое их связывает.

Трансформатор используется в том случае, когда сопротивление нагрузки  $R_H$  нельзя подключить непосредственно к зажимам генератора, т. е. когда нагрузка рассчитана на переменное напряжение больше или меньше напряжения генератора.

Переменный магнитный поток, вызванный переменным током в первичной обмотке, одновременно пересекает витки обеих об-

моток. В первичной обмотке наводится э. д. с. самоиндукции  $E_1$ , во вторичной — э. д. с. взаимной индукции  $E_2$ . Величина  $E_2$  зависит от величины магнитного потока в сердечнике, скорости его изменения и от соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток. Скорость изменения магнитного потока определяется частотой переменного тока, которая для данного тока — величина постоянная. Величина магнитного потока обусловлена главным образом напряжением, приложенным к первичной обмотке, и числом ее витков.

Следовательно, и э. д. с., возбуждаемая во вторичной обмотке трансформатора, зависит также от напряжения в первичной обмотке и от соотношения чисел витков первичной и вторичной обмоток.

**Коэффициент трансформации**

**Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки называется коэффициентом трансформации.**

$$k = \frac{w_1}{w_2}, \quad (34)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации;

$w_1$  и  $w_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток.

Если коэффициент трансформации меньше единицы, то трансформатор повышающий, если больше — понижающий.

**Отношение напряжений**

При коэффициенте связи между обмотками, равном единице, э. д. с. (напряжение), индуцируемая в каждом витке вторичной обмотки, та же самая, что и э. д. с. (напряжение) каждого витка в первичной обмотке. Поэтому отношение напряжений (точнее, электродвижущих сил, но обычно величины падения напряжения в обмотках трансформатора пренебрегают) пропорционально отношению витков:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (35)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Это равенство справедливо для трансформаторов со стальным сердечником при  $k=1$ . Поскольку трансформатор без сердечника не может иметь коэффициент связи, равный единице, его отношение напряжений больше, чем отношение витков.

В зависимости от коэффициента трансформации трансформатор может повышать или понижать напряжение. Если напряжение во вторичной обмотке больше, чем в первичной, то **трансформатор повышающий**. В его вторичной обмотке число витков больше, чем в первичной. Наоборот, если напряжение во вторичной обмотке меньше, чем в первичной, то **трансформатор понижающий**. Число витков в его вторичной обмотке меньше, чем в первичной. Каждый трансформатор может быть использован

как повышающий и как понижающий в зависимости от того, какая обмотка подключается как первичная — с большим числом витков или с меньшим.

Трансформатор не является источником энергии; он служит только для передачи энергии из одной цепи в другую. Поэтому мощность, развиваемая во вторичной обмотке, никогда не может быть больше мощности, подводимой к первичной обмотке; она всегда меньше на величину потерь в трансформаторе.

По закону Ома величина вторичного тока равна вторичному напряжению, деленному на сопротивление в цепи вторичной обмотки. Для рис. 118, когда сопротивление нагрузки  $R_H = 100$  ом (сопротивлением катушки пренебрегаем),

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{100 \text{ в}}{100 \text{ ом}} = 1 \text{ а.}$$

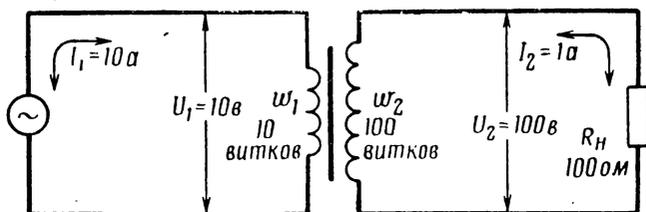


Рис. 118. Трансформатор со стальным сердечником, имеющий отношение витков 1 : 10. Ток  $I_1$  в первичной обмотке индуцирует вторичное напряжение  $U_2$ , которое создает ток в нагрузке вторичной обмотки

Мощность рассеяния в сопротивлении нагрузки, равная  $I_2^2 R_H$  или  $U_2 I_2$ , составляет 100 вт.

Мощность, затрачиваемая в сопротивлении нагрузки во вторичной обмотке, поступает от генератора, включенного в цепь первичной обмотки. Если вторичный ток удваивается (например, из-за уменьшения сопротивления нагрузки в два раза), то первичный ток также увеличится в два раза, чтобы передать требуемую мощность во вторичную цепь.

Потери в трансформаторе малы. Поэтому практически можно считать, что мощности в первичной и вторичной обмотках равны:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

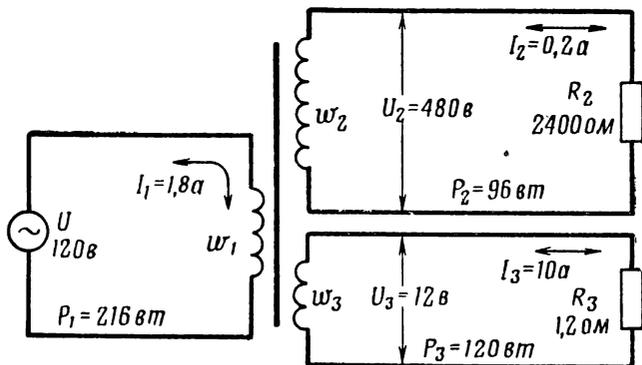
откуда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (36)$$

т. е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям.

Поскольку через обмотки высокого напряжения проходит меньший ток, они выполняются из более тонкой проволоки, чем обмотки низкого напряжения.

**Пример 50.** Трансформатор включен в сеть переменного тока с напряжением  $U_1=120$  в. Число витков первичной обмотки  $w_1=500$ , вторичной  $w_2=50$ . Ток в первичной обмотке  $I_1=0,2$  а. Определить коэффициент трансформации  $k$ , напряжение на нагрузке  $U_2$  и ток в ней  $I_2$ .



**Рис. 119.** Мощность, используемая сопротивлениями нагрузок  $R_1$  и  $R_2$  вторичных обмоток, равна мощности, поступающей от генератора, включенного в первичную обмотку

Решение. По формуле (34)

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{500}{50} = 10 \text{ (трансформатор понижающий);}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{120}{10} = 12 \text{ в;}$$

$$I_2 = I_1 k = 0,2 \cdot 10 = 2 \text{ а.}$$

#### Общая вторичная мощность

На рис. 119 приведена схема трансформатора с двумя вторичными обмотками —  $w_2$  и  $w_3$ . Вторичных обмоток может быть несколько, и, если все они находятся в одном сердечнике, коэффициент связи  $k=1$ . В каждой обмотке индуцируется своя э. д. с., зависящая от коэффициента трансформации. В цепь первичной обмотки включен источник переменного напряжения 120 в.

При коэффициенте трансформации 1:4 в обмотке  $w_2$  индуцируется э. д. с. 480 в, которая при сопротивлении нагрузки  $R_2=2400$  ом создает в цепи ток  $I_2=0,2$  а. Мощность в этой цепи  $P_2=480 \cdot 0,2=96$  вт.

Обмотка  $w_3$  понижает напряжение с отношением 10/1, т. е. на ее зажимах индуцируется э. д. с. 12 в, которая при сопротивлении нагрузки  $R_3=1,2$  ом создает в цепи ток  $I_3=10$  а. В этом

случае мощность  $P_3 = 120$  вт. Поскольку обмотки имеют отдельные выводы, напряжение и ток в них могут быть разными.

Вся мощность, расходуемая во вторичных цепях, поступает из первичной цепи. В нашем примере общая мощность вторичных цепей равна 216 вт. Следовательно, ток в первичной цепи  $I_1 = 1,8$  а:

$$\frac{P_1}{U_1} = \frac{216}{120} = 1,8.$$

### Автотрансформаторы

Автотрансформатор (рис. 120) имеет одну непрерывную обмотку с выводом 2 между выводами 1 и 3. На рис. 120, а приведена схема повышающего автотрансформатора; первичное на-

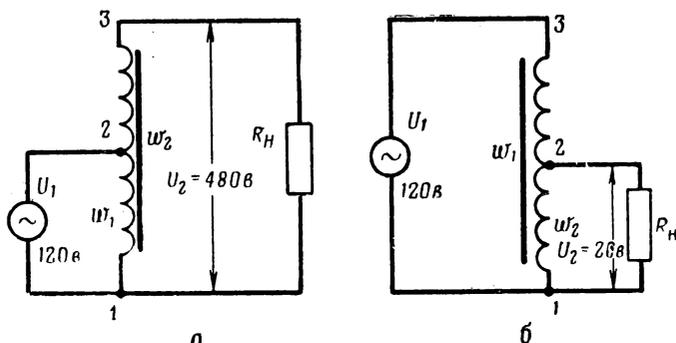


Рис. 120. Автотрансформаторы:  
а — повышающий; б — понижающий

пряжение генератора  $U_1$  подключено к части общих витков (между выводами 1 и 2), а вторичное  $U_2$  создается на зажимах всех витков (между выводами 1 и 3). Если число витков между выводами 1 и 3 равно 400, а между выводами 1 и 2 — 100, то первичный ток, протекающий между выводами 1 и 2, индуктирует одинаковое напряжение в каждом из 400 витков, потому что коэффициент связи практически равен единице для всех витков на одном стальном сердечнике. Таким образом, вторичное напряжение  $U_2 = 4 \cdot U_1 = 4 \cdot 120 = 480$  в.

На рис. 120, б приведена схема понижающего автотрансформатора: напряжение генератора подключено ко всей обмотке, а вторичное снимается с меньшего числа витков.

Обмотка, которая соединяется с источником напряжения, является первичной. Вторичная обмотка подключается к сопротивлению нагрузки.

Коэффициент трансформации и отношение напряжений подсчитываются в автотрансформаторе так же, как и в трансформаторе, имеющем изолированную вторичную обмотку.

Автотрансформатор более компактен по сравнению с трансформатором и чаще всего используется тогда, когда требуется изменить напряжение в небольших пределах. Однако автотрансформатор не изолирует сопротивление нагрузки вторичной обмотки от генератора напряжения, а это небезопасно при эксплуатации.

## Потери в трансформаторах

Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) трансформатора определяется как отношение мощности на выходе (во вторичной цепи) к мощности на входе (в первичной цепи):

$$\text{к. п. д.} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\%.$$

Например, когда  $P_{\text{вых}} = 0,5 P_{\text{вх}}$  к. п. д.  $= 0,5 \cdot 100\% = 50\%$ .

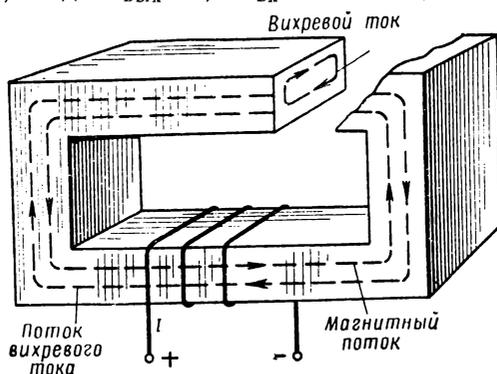


Рис. 121. Стальной сердечник в разрезе

Предположим, что потери в трансформаторе равны нулю, тогда  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$  и к. п. д. равен 100%. В действительности во всех трансформаторах есть потери в виде тепла, поэтому к. п. д. всегда несколько меньше 100%. Трансформаторы больших мощностей более экономичны, так как в них используется более толстая обмотка, которая имеет меньшее сопротивление.

**Вихревые токи**

Если металлические массы находятся в переменном магнитном поле, то в них индуцируются так называемые **вихревые (паразитные) токи**. Эти токи бесполезно расходуются, нагревая тело, в котором они возникают. В стальном сердечнике катушки индуктивности под действием переменного тока наводится напряжение, которое в свою очередь создает в сердечнике ток. Этот ток и называется вихревым, поскольку он протекает по замкну-

тым кольцам через поперечное сечение сердечника в виде вихрей (рис. 121).

Вихревые токи вызывают бесполезную трату мощности на нагревание сердечника, равную  $P=I^2R$ , где  $I$  — величина всех вихревых токов,  $R$  — сопротивление сердечника.

Будучи индуктированными, вихревые токи согласно правилу Ленца препятствуют причине, которая вызывает их: поток вихревых токов направлен против потока катушки, увеличивая ток в ней, чтобы сохранить первоначальное магнитное поле.

**Чем выше частота переменного тока в катушке индуктивности, тем больше потери от вихревых токов.**

Обычно сопротивление массивного проводника очень мало, вследствие чего вихревые токи могут достигать больших величин и вызывать сильный перегрев его, что может привести к обугливанию изоляции. Поэтому стальные сердечники трансформаторов и якоря электрических машин изготовляют не из сплошного куска стали, а из тонких листов, изолированных один от другого. Это увеличивает сопротивление, а значит, уменьшает вихревые токи.

Есть случаи, когда вихревые токи приносят пользу. Например, в металлургии их применяют для плавки металлов, в ряде измерительных приборов — для торможения подвижных частей.

На использовании вихревых токов основана работа некоторых электрических двигателей. Объясним это на примере. Возьмем свободно укрепленный на оси диск (рис. 122) из немагнитного металла (меди, алюминия и т. д.) и поместим вблизи него постоянный магнит. Если вращать магнит, то диск тоже будет вращаться в ту же сторону. Это объясняется взаимодействием магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля, созданного вихревыми токами, которые индуктируются в диске. Скорость вращения диска должна быть меньше скорости вращения постоянного магнита, иначе в диске не будут индуктироваться вихревые токи (магнитное поле не будет пересекаться диском).

#### Типы сердечников

Чтобы свести к минимуму потери от вихревых токов и в то же время сохранить высокую магнитную индукцию, сердечники делают из отдельных пластин, изолированных одна от другой, из изолированных частиц стального порошка или из ферромагнитных материалов,

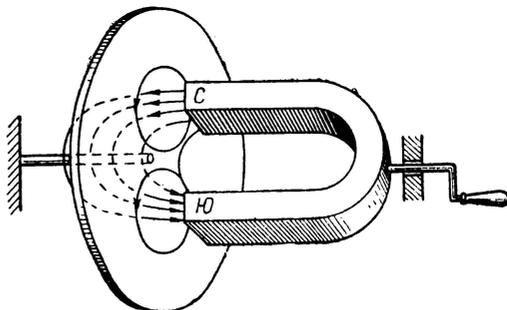


Рис. 122. Постоянный магнит и свободно укрепленный на оси диск

Сердечники первого типа — в виде пластин, изолированных очень тонким слоем окиси железа и лака, — обычно применяют в трансформаторах звуковых частот и частоты 50 *гц*. Пластины увеличивают сопротивление в поперечном сечении сердечника,

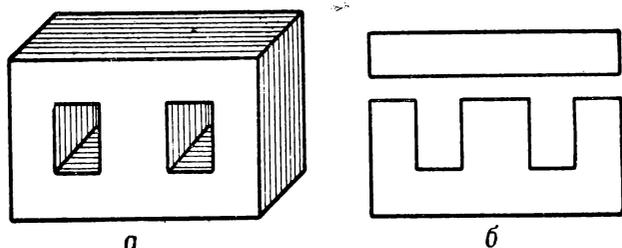


Рис. 123. Стальной сердечник из пластин:  
а — сердечник броневое типа; б — пластины

уменьшая вихревые токи, но представляют небольшое сопротивление для магнитного потока сердечника (рис. 123).

Сердечники второго типа — спрессованные из железных зерен — применяют в катушках индуктивности для радиочастот.

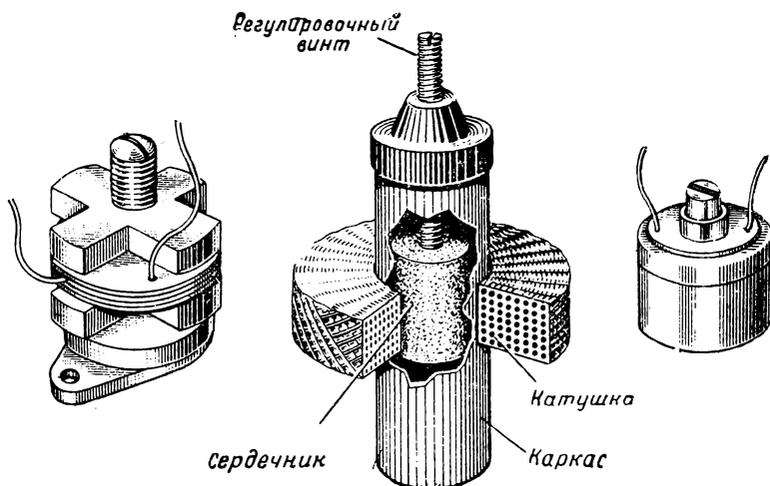


Рис. 124. Катушки индуктивности с сердечниками

Ферритовые сердечники обеспечивают высокую магнитную индукцию, оставаясь в то же время изоляторами. Поэтому их широко используют в катушках индуктивности для высоких частот. Они позволяют снизить до минимума потери на вихревые токи. На рис. 124 приведены катушки индуктивности с ферритовым сердечником. Винт сверху служит для подстройки величины индуктивности.

#### 4. Соединение катушек индуктивности

**Переменная индуктивность**

Величину индуктивности можно изменять различными способами.

На рис. 125, *а* изображена секционная катушка, индуктивность которой подбирается путем подключения к тому или иному выводу.

На рис. 125, *б* скользящий контакт катушки изменяет число используемых витков. Неиспользуемые витки соединяются накоротко, что предотвращает работу катушки в качестве автотрансформатора (такая работа нежелательна, поскольку повышающееся напряжение может вызвать дугу на зажимах витков).

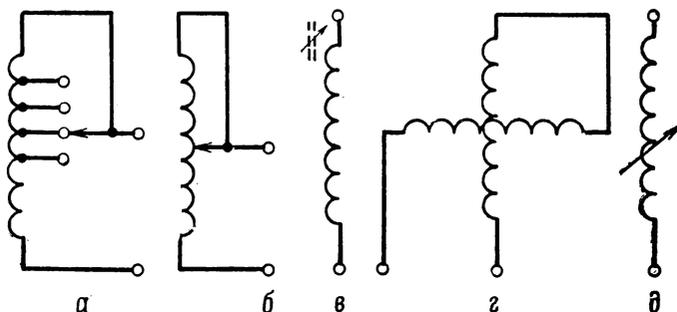


Рис. 125. Способы получения переменной индуктивности:

*а* — секционная катушка с выводами; *б* — катушка со скользящим контактом; *в* — катушка с подстраиваемым сердечником; *г* — вариометр; *д* — условное изображение катушки с переменной индуктивностью

На рис. 125, *в* показана катушка со стальным сердечником. При изменении положения сердечника меняется индуктивность катушки. Максимальная индуктивность получается тогда, когда сердечник находится полностью внутри катушки.

На рис. 125, *г* приведена схема вариометра — устройства для изменения положения одной катушки по отношению к другой. Общая индуктивность последовательно соединенных катушек меняется в зависимости от их взаимного расположения.

На рис. 125, *д* приведено условное изображение катушек с переменной индуктивностью.

**Последовательное и параллельное соединение**

**Общая индуктивность катушек, соединенных последовательно (рис. 126), равна сумме индуктивностей отдельных катушек:**

$$L_{\text{общ}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (37)$$

Эта формула справедлива, когда нет взаимной индукции между катушками.

Так как в последовательно соединенных катушках протекает один и тот же ток, общая индуктируемая э. д. с. зависит от общего числа витков.

**Пример 51.** Катушки с индуктивностями  $L_1=5$  мГн и  $L_2=10$  мГн соединены последовательно. Определить общую индуктивность.

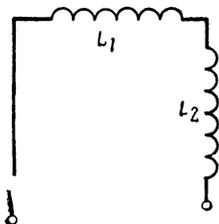
**Решение.** По формуле (37)

$$L_{\text{общ}} = L_1 + L_2 = 5 + 10 = 15 \text{ мГн.}$$

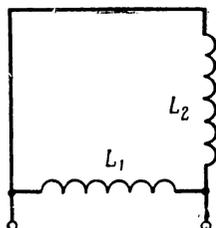
Если катушки индуктивности соединены параллельно (рис. 127), то общая индуктивность

$$\frac{1}{L_{\text{общ}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}. \quad (38)$$

Формула (38) справедлива, когда нет взаимной индукции между катушками.



**Рис. 126.** Последовательное соединение катушек индуктивности без взаимной связи



**Рис. 127.** Параллельное соединение катушек индуктивности без взаимной связи

**Пример 52.** Катушки с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  по 8 мГн соединены параллельно. Определить общую индуктивность.

**Решение.** По формуле (38)

$$\frac{1}{L_{\text{общ}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{2}{8}; \quad L_{\text{общ}} = \frac{8}{2} = 4 \text{ мГн.}$$

Рассмотрим две последовательно соединенные катушки индуктивности, которые имеют взаимную индукцию. Общая индуктивность в этом случае зависит от величины связи и от того, как включены катушки: согласованно (общий ток создает магнитное поле одного направления в обеих катушках) или несогласованно (магнитные поля катушек противоположны).

Величина связи зависит от соединения катушек и направления обмотки. Переключение любой катушки изменяет направление ее магнитного поля. На рис. 128, а две катушки с одним и тем же направлением витков соединены последовательно согласованно. Стоит переключить одну из катушек, например  $L_2$  (рис. 128, б), как получим последовательно несогласованное включение.

Общая индуктивность двух катушек, соединенных последовательно, с учетом взаимной индукции определяется по формуле

$$L_{\text{общ}} = L_1 + L_2 \pm 2L_M. \quad (39)$$

Взаимоиндукция  $L_M$  со знаком «плюс» увеличивает общую индуктивность (катушки включены последовательно согласованно), а со знаком «минус» — уменьшает ее (катушки включены последовательно несогласованно).

Последняя формула дает возможность определить коэффициент взаимной индукции двух последовательно соединенных катушек, если известна индуктивность каждой из них. Для этого нужно измерить общую индуктивность при последовательно со-

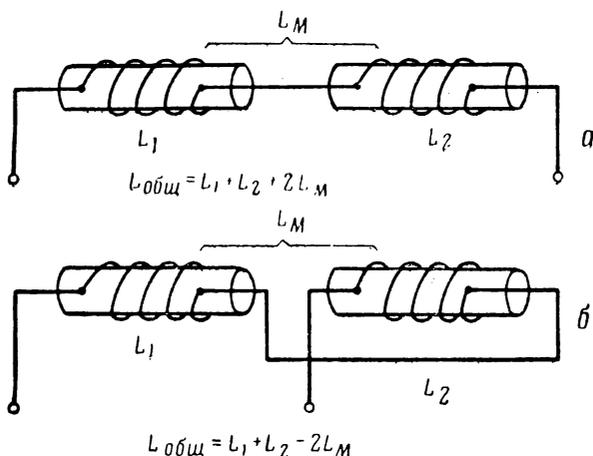


Рис. 128. Последовательное включение катушек с взаимной индукцией:  
 а — согласованное; б — несогласованное

гласованном включении. Пусть это будет  $L_{общ. согл.}$ . Затем одну из катушек надо переключить и измерить общую индуктивность при последовательно несогласованном включении катушек. Пусть это будет  $L_{общ. несогл.}$ . Тогда

$$L_M = \frac{L_{общ. согл.} - L_{общ. несогл.}}{4}. \quad (40)$$

Когда известна взаимная индуктивность  $L_M$ , коэффициент связи  $k$  можно подсчитать из формулы (33).

**Пример 53.** Имеются две катушки. Индуктивность каждой из них 250 мкГн. Общая индуктивность при последовательно согласованном включении 550 мкГн, а при последовательно несогласованном 450 мкГн. Определить взаимную индуктивность  $L_M$  и коэффициент связи  $k$ .

**Решение.** По формуле (40)

$$L_M = \frac{I_{о.с} - I_{о.н}}{4} = \frac{550 - 450}{4} = \frac{100}{4} = 25 \text{ мкГн.}$$

Из формулы (33)

$$k = \frac{L_M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{25}{\sqrt{250 \cdot 250}} = \frac{25}{250} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

**Неисправности  
в катушках**

Катушка сердечник или нет.

Другие неисправности — замыкание между витками, которое уменьшает индуктивность, замыкание между первичной и вторичной обмотками, замыкание обмотки на стальной сердечник.

При измерении сопротивления катушки один конец ее надо отключить от схемы, чтобы избежать параллельных цепей, которые могут повлиять на показание прибора.

Сопротивление катушки постоянному току равно сопротивлению провода обмотки. Катушки для радиочастот, имеющие число витков от 10 до 100, обладают индуктивностью в несколько миллигенри. Сопротивление их постоянному току — от 1 до 20 *ом*. Катушки индуктивности для звуковых частот и частот 50 *гц*, имеющие несколько сотен витков, характеризуются сопротивлением от 10 до 500 *ом*.

## 5. Индуктивное сопротивление

**Общее понятие**

Когда переменный ток протекает через катушку индуктивности, ток в цепи уменьшается по сравнению с тем, который протекал при наличии одного активного сопротивления.

Противоэлектродвижущая сила, созданная индуктивностью катушки, представляет собой ее реакцию на изменение тока. При переменном токе синусоидальной формы эта реакция выражается в уменьшении тока, создаваемого переменным напряжением. Противодействие катушки индуктивности переменному току, измеряемое в *омах*, называется **индуктивным сопротивлением** и обозначается через  $X_L$ .

Индуктивное сопротивление  $X_L$  часто называют реактивным (в отличие от активного сопротивления  $R$ ).

**Влияние индуктивного  
сопротивления**

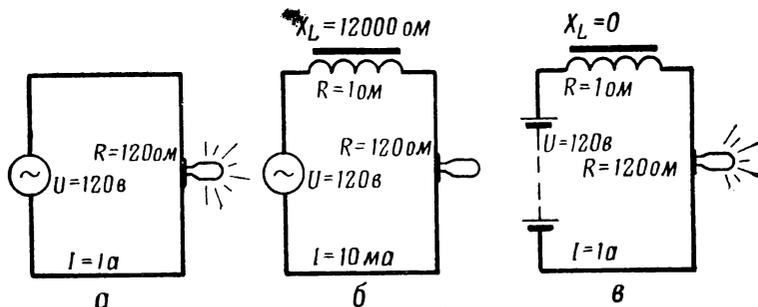
Индуктивное сопротивление катушки в цепи переменного тока ограничивает величину тока: чем оно больше, тем меньше ток.

В цепи, показанной на рис. 129, *а*, нет катушки индуктивности. Источник переменного напряжения 120 *в* создает в цепи ток 1 *а*, поскольку сопротивление лампочки равно 120 *ом*. Лампочка горит нормально.

Включим в цепь катушку индуктивности (рис. 129, *б*). Ее активное сопротивление, равное 1 *ом*, ничтожно по сравнению с сопротивлением лампочки. Реактивное же сопротивление катуш-

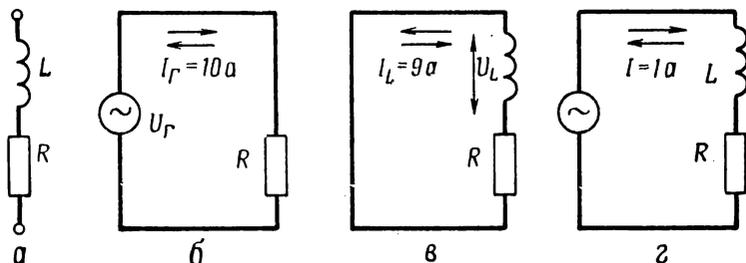
ки равно  $12\,000\text{ ом}$ . Оно теперь главным образом и определяет величину тока в цепи:  $I = \frac{120\text{ в}}{12000\text{ ом}} = 10\text{ ма}$  (сопротивлением  $1$  и  $120\text{ ом}$  пренебрегаем). При таком небольшом токе лампочка гореть не будет.

На рис. 129, *в* показана цепь с источником постоянного напряжения. Катушка не может индуктировать напряжение, по-



**Рис. 129.** Влияние индуктивного сопротивления на ток в цепи: *а* — лампа горит при переменном токе  $1\text{ а}$ ; *б* — включение индуктивного сопротивления  $12\,000\text{ ом}$  уменьшает переменный ток до  $10\text{ ма}$ , лампа не горит; *в* — при постоянном токе катушка не имеет индуктивного сопротивления, лампа горит

этому она не имеет реактивного сопротивления. Следовательно, величина постоянного тока практически та же, как если бы источник напряжения был подключен непосредственно к зажи-



**Рис. 130.** Индуктивность уменьшает величину переменного тока: *а* — катушка индуктивности с внутренним сопротивлением; *б* — ток  $I_{\Gamma}$ , созданный приложенным напряжением, при отсутствии  $L$ ; *в* — противоположный ток  $I_L$ , созданный катушкой индуктивности, при отсутствии генератора; *г* — ток  $I$  в цепи представляет собой разность противоположных токов

мам лампочки, и лампочка горит нормально. Таким образом, индуктивность имеет реактивное сопротивление только для переменного тока.

Рассмотрим катушку, имеющую индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $R$  (рис. 130, *а*). Если бы катушка не имела индуктивности, то генератор переменного напряжения создал

бы ток  $I_G$ , равный, допустим, 10 а (рис. 130, б). Возьмем теперь катушку индуктивности  $L$  без генератора напряжения (рис. 130, в). Предположим, что э. д. с. самоиндукции на ее зажимах создает ток  $I_L = 9$  а, направленный противоположно току генератора  $I_G$ . Суммарный ток в данной цепи (рис. 130, г), равный разности  $I_G - I_L$ , будет 1 а. Таким образом, индуктивное сопротивление катушки уменьшает ток генератора.

Величина э. д. с. самоиндукции  $E_L$  (амплитудное значение) прямо пропорциональна частоте тока  $\omega$ , индуктивности  $L$  и величине тока  $I$ :

$$E_L = I\omega L.$$

Определим величину сопротивления, вносимого в цепь переменного тока катушкой индуктивности.

Так как

$$E_L = I\omega L,$$

то для того, чтобы в цепи проходил ток, необходимо приложить к зажимам напряжение  $U_3$ :

$$U_3 = I\omega L.$$

Значит,

$$I = \frac{U_3}{\omega L}. \quad (41)$$

Формула (41) представляет собой закон Ома для цепи переменного тока, в которую включена катушка, обладающая индуктивностью  $L$  (величину активного сопротивления цепи не учитываем). Если в формуле (41)  $I$  выразить в амперах, а  $U_3$  — в вольтах, то знаменатель дроби получится в омах. Это и есть индуктивное сопротивление  $X_L$ :

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad (42)$$

где  $f$  — частота переменного тока в герцах;

$L$  — индуктивность катушки в генри.

Индуктивное сопротивление зависит только от величин  $L$  и  $f$ . Оно возрастает при увеличении индуктивности, так как индуктивность  $L$  большей величины создает большую э. д. с. самоиндукции, чтобы препятствовать току в цепи. Подобным же образом ток более высокой частоты индуктирует в катушке большую э. д. с., т. е. тоже увеличивает индуктивное сопротивление. Постоянная величина  $2\pi$  вытекает из кругового движения, связанного с периодом синусоидальной волны.

**Зависимость индуктивного сопротивления от индуктивности и частоты — прямо пропорциональная:** если частота или индуктивность увеличится в два раза, то вдвое возрастет и индуктивное сопротивление. Другими словами, между  $X_L$  и  $f$ , а также между  $X_L$  и  $L$  существует линейная зависимость.

**Пример 54.** Имеются две катушки:  $L_1=10$  гн и  $L_2=5$  гн. Определить их индуктивное сопротивление при частоте 50 гц.

**Решение.** По формуле (42)

$$X_{L1} = 2\pi fL = 6,28 \cdot 50 \cdot 10 = 3140 \text{ ом.}$$

Так как индуктивность второй катушки в два раза меньше, то во столько же раз меньше индуктивное сопротивление, т. е.  $X_{L2}=1570$  ом.

**Пример 55.** Определить индуктивное сопротивление катушки 250 мкгн при частотах 1 и 10 Мгц.

**Решение.** По формуле (42) для  $f=1$  Мгц

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 1570 \text{ ом.}$$

При повышении частоты в 10 раз во столько же раз увеличится и индуктивное сопротивление при той же индуктивности, т. е. для  $f=10$  Мгц  $X_L=15700$  ом.

**Пример 56.** Индуктивность катушки  $L=40$  мгн. Определить ее индуктивное сопротивление при частотах  $f_1=50$  гц и  $f_2=1000$  гц, а также ток, если приложенное напряжение  $U=125,6$  в (активное сопротивление катушки  $R=0$ ).

**Решение.** По формуле (42)

$$X_{L1} = 2\pi f_1 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04 = 12,56 \text{ ом}$$

(в формулу индуктивность надо подставлять в генри, т. е.  $L=40$  мгн= $=0,04$  гн);

$$X_{L2} = \omega_2 L = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 0,04 = 251,2 \text{ ом.}$$

Ток в катушке

$$I_1 = \frac{U}{X_{L1}} = \frac{125,6}{12,56} = 10 \text{ а;}$$

$$I_2 = \frac{U}{X_{L2}} = \frac{125,6}{251,2} = 0,5 \text{ а.}$$

**Пример 57.** Определить индуктивность катушки  $L$  ( $R=0$ ), если при напряжении  $U=220$  в и частоте  $f=50$  гц по ней проходит ток  $I=2,5$  а.

**Решение.** Из формулы (41) индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \omega L = \frac{U}{I} = \frac{220}{2,5} = 88 \text{ ом,}$$

откуда индуктивность

$$L = \frac{88}{\omega} = \frac{88}{2\pi f} = \frac{88}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,28 \text{ гн} = 280 \text{ мгн.}$$

Индуктивное сопротивление  $X_L$  часто можно измерить, тогда при известной частоте  $f$  индуктивность можно подсчитать по формуле

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (43)$$

Если известны индуктивное сопротивление  $X_L$  и индуктивность  $L$ , частоту можно найти по формуле

$$f = \frac{X_L}{2\pi L}. \quad (44)$$

**Пример 58.** Катушка с ничтожно малым активным сопротивлением  $R$  имеет индуктивное сопротивление  $X_L=6280$  ом при частоте  $f=1000$  гц. Определить индуктивность катушки  $L$ .

Решение. По формуле (43)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{6280}{6,28 \cdot 1000} = \frac{6280}{6280} = 1 \text{ гн.}$$

**Пример 59.** При какой частоте  $f$  катушка с индуктивностью 1 гн будет иметь сопротивление  $X_L=1000$  ом?

Решение. По формуле (44)

$$f = \frac{X_L}{2\pi L} = \frac{1000}{6,28 \cdot 1} = 0,159 \cdot 10^3 = 159 \text{ гц.}$$

Последовательное или параллельное соединение индуктивных сопротивлений определяется так же, как и активных сопротивлений.

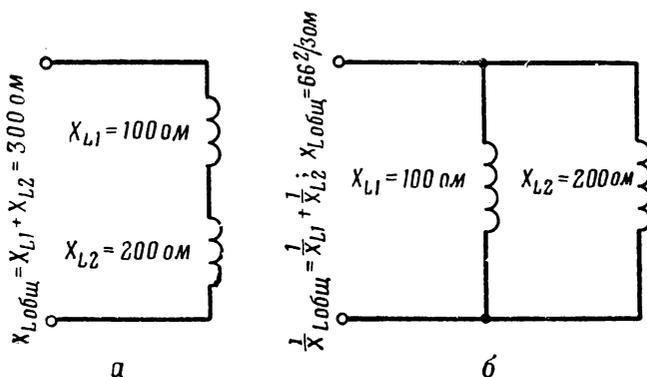


Рис. 131. Общее индуктивное сопротивление:

а — при последовательном соединении;  
 б — при параллельном соединении

При последовательном соединении индуктивных сопротивлений общее реактивное сопротивление равно сумме отдельных их величин:

$$X_{L \text{ общ}} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots + X_{Ln}. \quad (45)$$

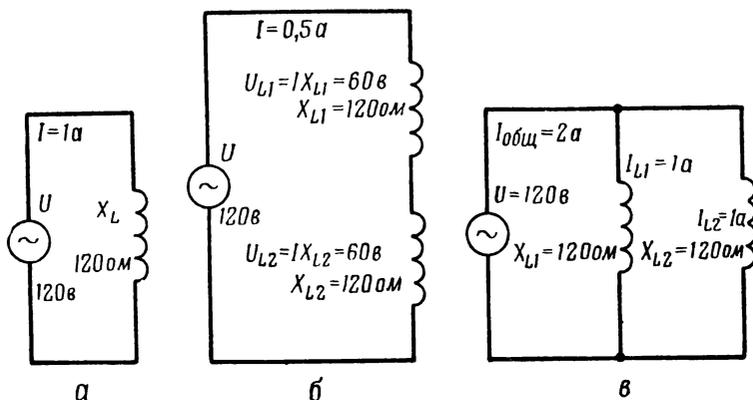
На рис. 131, а показаны два индуктивных сопротивления  $X_{L1}=100$  ом и  $X_{L2}=200$  ом, включенных последовательно. Общее индуктивное сопротивление равно 300 ом.

При параллельном соединении индуктивных сопротивлений (рис. 131, б) общее сопротивление подсчитывается по формуле

$$\frac{1}{X_{L \text{ общ}}} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \dots + \frac{1}{X_{Ln}}. \quad (46)$$

Оно всегда меньше наименьшего из параллельно включенных сопротивлений.

Ток в цепи с одним индуктивным сопротивлением равен приложенному напряжению, деленному на  $X_L$ . Подсчитаем величину тока в цепях, показанных на рис. 132. Сопротивлением  $R$  катушек пренебрегаем. Для рис. 132, *а*  $X_L = 120 \text{ ом}$ ;  $I = \frac{U}{X_L} = \frac{120}{120} = 1 \text{ а}$ . Для рис. 132, *б*  $X_{L1} = X_{L2} = 120 \text{ ом}$ ;  $X_{L\text{общ}} = 240 \text{ ом}$ ; ток  $I = \frac{U}{X_{L\text{общ}}} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ а}$  одинаков в обоих индуктивных сопротивлениях, поэтому напряжение на зажимах каждого из них  $I X_L = 0,5 \cdot 120 = 60 \text{ в}$ . Для рис. 132, *в* ток каждой ветви равен 1 а, поскольку напряжение на зажимах обеих катушек одно и то же,



**Рис. 132.** Подсчеты в цепях с индуктивным сопротивлением:  
*а* — одно индуктивное сопротивление; *б* — последовательное соединение индуктивностей; *в* — параллельное соединение индуктивностей

равное напряжению генератора. Ток в общей цепи равен сумме токов отдельных ветвей, т. е. 2 а.

Индуктивные сопротивления создают небольшое сопротивление току относительно низких частот и большое — току относительно высоких частот. Приняв сопротивление 1000 ом как практически наиболее используемое, определим необходимую для его получения величину индуктивности при различных частотах (табл. 6).

Катушка с индуктивностью 3,3 мГн при частоте 50 Гц имеет индуктивное сопротивление приблизительно 1000 ом. Для частот ниже 50 Гц индуктивное сопротивление меньше, а для частот выше 50 Гц — больше 1000 ом.

Типичная индуктивность катушек радиовещательного диапазона волн — от 100 до 300 мкГн.

В диапазоне ультракоротких волн требуется несколько микрогенри, чтобы получить индуктивное сопротивление порядка 1000 ом.

По мере повышения частоты следует брать катушки с меньшей индуктивностью, иначе возникнут чрезмерные потери, особенно в катушках со стальным сердечником.

Таблица 6

Величины индуктивностей для получения индуктивного сопротивления в 1000 ом

Индуктивность (приблизительно)	Частота
3,3 гн	50 гц (частота осветительной линии, нижняя звуковая частота)
160 мгн	1000 гц (средняя звуковая частота)
16 мгн	10000 гц (верхняя звуковая частота)
160 мкгн	1000 кгц (широкое радиовещание)
16 мкгн	10 Мгц (диапазон коротких волн)
1,6 мкгн	100 Мгц (диапазон метровых волн)

## 6. Фазовое соотношение в трансформаторе

Кроме передачи мощности из первичной цепи во вторичную, трансформатор используется для получения сдвига фазы на  $180^\circ$ .

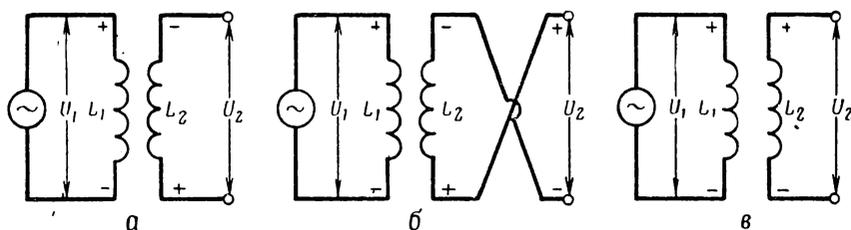


Рис. 133. Фазовое соотношение в трансформаторе с разомкнутой вторичной цепью или с большой нагрузкой активным сопротивлением:

*a* — напряжение  $U_2$  сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  с  $U_1$ ; *б* — пересоединение во вторичной обмотке с целью получения  $U_2$  в фазе с  $U_1$ ; *в* — первичная и вторичная обмотки намотаны в одном направлении

Напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора может быть в фазе или сдвинуто на  $180^\circ$  по отношению к напряжению  $U_1$  на зажимах первичной обмотки.

В цепи рис. 133, *a* направление обмоток противоположное, поэтому напряжение на зажимах вторичной обмотки сдвинуто по фазе на  $180^\circ$ . В цепи рис. 133, *б* направление обмоток тоже про-

тывоположное, но выводы вторичной обмотки переключены, поэтому напряжение на ее зажимах находится в фазе с напряжением первичной обмотки. В цепи рис. 133, в направление обмоток одинаковое, поэтому  $U_2$  и  $U_1$  находятся в фазе.

Таким образом, получение сдвига по фазе  $180^\circ$  между  $U_2$  и  $U_1$  зависит от направления обмоток и их подключения к цепи. Когда нет требуемой полярности, достаточно переключить первичную или вторичную обмотку трансформатора.

## 7. Постоянная времени $\frac{L}{R}$

Формула индуктивного сопротивления выведена для переменного тока синусоидальной формы. Поэтому величина  $X_L$  не характеризует влияния индуктивности в цепи при несинусоидальном изменении тока. Примером

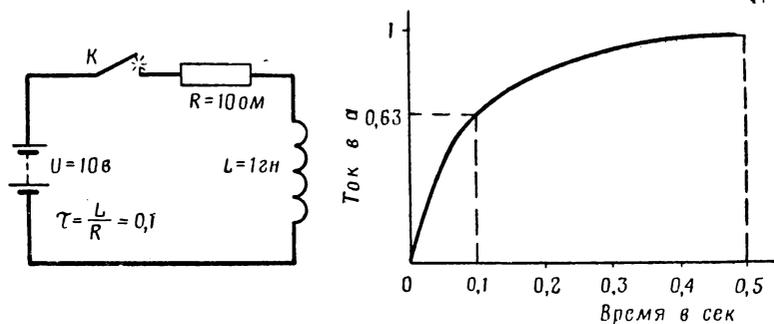


Рис. 134. Когда выключатель включается, ток нарастает от нуля до постоянной величины 1 а

такого изменения тока служит включение или выключение постоянного тока (рис. 134).

Когда выключатель  $K$  включается, ток возрастает от 0 до 1 а. В конечном счете он будет иметь постоянную величину 1 а, равную напряжению батареи 10 в, деленному на сопротивление цепи 10 ом. Когда ток изменяется от 0 до 1 а, индуктивность препятствует этому. Влияние цепи, состоящей из индуктивности и сопротивления, в течение этого времени характеризуется постоянной времени.

Подобным же образом, когда  $K$  выключается, постоянная времени характеризует способность цепи противодействовать спаду тока до нуля.

Скорость нарастания напряжения зависит от отношения  $\frac{L}{R}$ , которое называется постоянной времени индуктивной цепи:

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ (сек)}, \quad (47)$$

где  $\tau$  — время в секундах;  
 $L$  — индуктивность в генри;  
 $R$  — сопротивление в омах.

Легко убедиться, что отношение  $\frac{L}{R}$  имеет размерность времени. Индуцируемое напряжение из формулы (32)  $U = L \left( \frac{\Delta I}{\Delta t} \right)$ , откуда  $L = \frac{U\tau}{I}$ . Таким образом,

$$\frac{L}{R} = \frac{U\tau}{IR} = \frac{U\tau}{U} = \tau.$$

Постоянная времени цепи, изображенной на рис. 134, равна по формуле (47)

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ сек.}$$

Постоянная времени выражает время, необходимое для изменения тока на 63% (в цепи рис. 134 — от 0 до 0,63 *a*). В течение времени, равного 5  $\tau$ , ток достигает постоянной величины (в данном примере 1 *a*). При выключении цепи за время  $\tau$  ток уменьшается приблизительно до 37% постоянной его величины (для нашего примера — от 1 до 0,37 *a*).

То, что при выключении цепи постоянная времени меньше, чем при включении, объясняется большим сопротивлением между разомкнутыми контактами выключателя, подсоединенного к цепи последовательно. Практически ток спадает до нуля в течение 5  $\tau$ .

**Пример 60.** В цепь включена катушка индуктивности  $L = 20$  *гн*, сопротивление которой составляет 100 *ом*. Определить постоянную времени.

**Решение.** По формуле (47)

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20}{100} = 0,2 \text{ сек.}$$

**Пример 61.** К зажимам цепи, указанной в примере 60, подключено постоянное напряжение 10 *в*. Определить величину тока через 0,2 *сек* и 1 *сек*.

**Решение.** Ток в цепи

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{100} = 0,1 \text{ а} = 100 \text{ ма.}$$

Поскольку 0,2 *сек* — постоянная времени этой цепи, ток через 0,2 *сек* составит 63%, т. е. 63 *ма*. За время 1 *сек* = 5  $\tau$  ток достигнет постоянной своей величины 100 *ма*.

**Пример 62.** В ту же цепь последовательно с катушкой индуктивности включен резистор с сопротивлением  $R = 1$  *Мом*. Определить постоянную времени.

**Решение.** По формуле (47)

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20}{1000100}, \text{ или приблизительно } 20 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ мксек.}$$

При такой малой постоянной времени ток может увеличиться на 63% очень быстро — за 20 *мксек* или за это время уменьшиться до 37%.

Постоянная времени возрастает при увеличении индуктивности и уменьшается при увеличении сопротивления. Более короткая постоянная времени вызывает более быстрое изменение тока в катушке индуктивности при включении и выключении приложенного напряжения. При этом на ее зажимах может возникнуть большая э. д. с. самоиндукции.

Небольшая величина постоянной времени при большом последовательном сопротивлении объясняется тем, что последовательная цепь менее индуктивна и меньше противодействует изменениям тока.

Э. д. с. самоиндукции на зажимах катушки при выключении цепи может во много раз превышать приложенное напряжение. Высокое напряже-

ние, развиваемое на зажимах рубильника, вызывает образование искры. От дуги тока подгорают контакты рубильника. Они становятся черными с дырочками и не могут обеспечить низкое сопротивление при замкнутом рубильнике. Такие контакты следует зачистить или заменить. Для предотвращения обгорания применяют искрогасящие устройства (в простейшем случае это обычный конденсатор, подключаемый к контактам; при разрыве цепи происходит заряд конденсатора, вследствие чего искра уменьшается) или контакты покрывают слоем какого-либо тугоплавкого материала.

Во многих случаях высокое напряжение, развиваемое при разрыве индуктивной цепи, полезно используется (например, в системе зажигания в автомобилях — для создания искры в свечах цилиндров).

Путем мгновенного разрыва индуктивной цепи легко создать напряжение в несколько тысяч вольт.

## 8. Энергия в магнитном поле катушки индуктивности

Магнитный поток, связанный с током в катушке индуктивности, имеет электрическую энергию, которая поступает от источника напряжения. Энергия запасается в поле, которое может производить работу, индуктируя э. д. с. при изменении потока. Запасенная электрическая энергия равна

$$\frac{1}{2} LI^2, \quad (48)$$

где  $I$  — величина постоянного тока.

Если  $L$  взять в генри, а ток — в амперах, то энергия будет в ватт-секундах, или джоулях. Например, при индуктивности  $L=10$  гн и силе тока  $I=2$  а

$$\text{энергия} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{10 \cdot 4}{2} = 20 \text{ вт} \cdot \text{с} \text{ (дж)}.$$

Эта энергия поступает от источника напряжения, который создает ток 2 а в катушке индуктивности. Когда цепь разрывается, магнитное поле исчезает и его энергия возвращается в цепь в форме индуктируемой э. д. с., которая поддерживает ток в цепи. При наличии сопротивления в цепи эта энергия через определенное время рассеивается в форме тепла.

### Краткие выводы

1. Переменный ток индуктирует в проводнике э. д. с., так как переменное магнитное поле тока эквивалентно перемещаемому магнитному потоку.

2. По правилу Ленца индуктируемая э. д. с. препятствует изменению тока, вызывающего индукцию, следовательно, она представляет собой величину, обратную э. д. с., т. е. противоэлектродвижущую силу.

3. Индуктивность катушки вследствие явления обратной э. д. с. иногда называют самоиндукцией.

4. Способность проводника индуцировать э.д.с. в самом себе при изменении тока характеризуется его самоиндукцией, или индуктивностью. Условное обозначение индуктивности  $L$ , а единица ее измерения — генри.

Катушка обладает индуктивностью 1 генри, если при изменении тока на 1 ампер в секунду в ней наводится э.д.с в 1 вольт.

5. Взаимная индукция проявляется в способности переменного тока, протекающего в одном проводнике, индуцировать э.д.с. в другом проводнике, расположенном вблизи. Обозначается взаимная индукция через  $L_m$  и измеряется в генри.  $L_m = k\sqrt{L_1L_2}$ , где  $k$  — коэффициент связи между двумя катушками с индуктивностью  $L_1$  и  $L_2$ .

6. Индуктивность катушки, вызванная влиянием магнитного поля соседней катушки, называется взаимной индуктивностью. Когда нет взаимодействия магнитных полей между катушками, взаимная индуктивность равна нулю.

7. Если взаимная индуктивность между двумя катушками добавляется к общей индуктивности, значит, катушки подключены последовательно согласованно.

8. Если общая индуктивность уменьшается, значит, катушки соединены последовательно несогласованно.

9. Трансформатор служит для преобразования напряжения. Он состоит из двух или большего числа индуктивно связанных изолированных обмоток. Первичная обмотка подключается к источнику напряжения; вторичная — к сопротивлению нагрузки.

10. Трансформатор со стальным сердечником имеет коэффициент связи, практически равный единице. Поэтому отношение напряжений можно заменить отношением витков.

11. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора может быть сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно напряжения первичной обмотки или быть в фазе. Это зависит от направления обмоток и способа их включения.

12. Коэффициент полезного действия трансформатора равен отношению его выходной мощности к входной. Если к.п.д. трансформатора со стальным сердечником принять за 100%, то мощность, подводимая к первичной обмотке, будет равна мощности, используемой во вторичной обмотке.

13. Вихревые токи, индуцируемые в стальном сердечнике катушки, вызывают потерю мощности на нагревание сердечника. Потери от вихревых токов возрастают при повышении частоты тока. Чтобы уменьшить их, сердечник собирают из стальных пластин, изолированных между собой. Минимальные потери от вихревых токов имеют порошкообразные и ферритовые сердечники.

14. Если нет взаимной индукции, то последовательно включенные индуктивности складываются.

15. Кроме индуктивности, катушка имеет активное сопротивление постоянному току, равное сопротивлению провода катушки. Если это сопротивление (можно измерить омметром) находится в пределах нормы, то можно предположить, что катушка исправна и имеет нормальную индуктивность.

16. У катушки, в которой произошел обрыв, бесконечно большое сопротивление. Такая катушка не имеет индуктивности, так как по ней не может протекать ток, что необходимо для индуктирования э. д. с.

17. Противодействие катушки индуктивности синусоидальному переменному току называется индуктивным сопротивлением. Оно обозначается  $X_L$  и измеряется в омах.

18. Индуктивное сопротивление катушки возрастает пропорционально частоте, а при одной и той же частоте — пропорционально ее индуктивности:

$$X_L = 2\pi fL.$$

19. Общее индуктивное сопротивление последовательно включенных катушек равно сумме их индуктивных сопротивлений. В последовательно включенных индуктивных сопротивлениях протекает один и тот же ток, а напряжение на их зажимах равно  $IX_L$ .

20. При параллельном включении катушек индуктивности их общее индуктивное сопротивление подсчитывается так же, как общее активное сопротивление параллельно включенных резисторов. Ток в каждой ветви равен  $\frac{U}{X_L}$ , а в общей цепи — сумме токов отдельных ветвей.

21. Чтобы получить требуемую величину индуктивного сопротивления, нужно при повышении частоты уменьшить индуктивность. Порядок величин индуктивности для определенных частот: генри — для 50 гц и низких звуковых частот; миллигенри — для высоких звуковых частот; несколько сот микрогенри — для радиочастот; несколько микрогенри — для высоких и ультравысоких частот.

22. Характеристика нарастания тока в цепи, состоящей из сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$ , при ее подключении к источнику несинусоидального напряжения определяется постоянной времени  $\tau = \frac{L}{R}$ . При  $L$  — в генри и  $R$  — в омах  $\tau$  выражается в секундах; это — время, в течение которого ток изменяется на 63%.

23. При мгновенном разрыве цепи, состоящей из сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$ , вследствие небольшой постоянной времени и быстрого спада тока генерируется индуктивностью высокое напряжение.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Переменный ток может индуцировать э. д. с., так как он создает:  
а — большую амплитуду; б — переменное магнитное поле; в — магнитное поле сильнее поля постоянного тока; г — постоянное магнитное поле.

2. Когда ток в проводнике увеличивается, э. д. с. самоиндукции по правилу Ленца будет:

а — стремиться увеличить ток; б — помогать приложенному напряжению; в — создавать ток, противоположный увеличивающему току; г — складываться с увеличивающим током.

3. Первичная обмотка трансформатора, повышающего напряжение в пять раз, имеет напряжение 120 в. Ко вторичной обмотке подключена нагрузка 600 ом. Если к. п. д. = 100%, ток в первичной обмотке равен:

а — 0,5 а; б — 600 ма; в — 5 а; г — 10 а.

4. Трансформатор со стальным сердечником, повышающий напряжение в восемь раз, имеет 120 в на зажимах первичной обмотки. Напряжение на зажимах вторичной обмотки равно:

а — 15 в; б — 120 в; в — 180 в; г — 960 в.

5. Индуктивность катушки без сердечника зависит от:

а — частоты; б — э. д. с.; в — конструкции; г — тока, протекающего через катушку.

6. Две катушки по 250 мкгн, соединенные последовательно без взаимной связи, имеют общую индуктивность:

а — 125 мкгн; б — 250 мкгн; в — 400 мкгн; г — 500 мкгн.

7. Сопротивление катушки постоянному току:

а — очень велико; б — практически равно бесконечности; в — равно нулю; г — невелико.

8. Катушка, в которой произошел обрыв, имеет:

а — бесконечно большое сопротивление и нулевую индуктивность; б — нулевое сопротивление и большую индуктивность; в — бесконечно большое сопротивление и нормальную индуктивность; г — нулевое сопротивление и индуктивность.

9. Индуктивное сопротивление измеряется в омах, так как оно:

а — уменьшает амплитуду переменного тока; б — увеличивает ее; в — увеличивает амплитуду постоянного тока; г — имеет обратную э. д. с., которая препятствует напряжению батареи.

10. Индуктивное сопротивление катушки переменному току:

а — зависит от величины приложенного напряжения; б — прямо пропорционально частоте напряжения; в — обратно пропорционально частоте приложенного напряжения; г — не зависит от частоты.

11. Две катушки по 10 гн соединены последовательно согласованно и имеют взаимную индукцию 0,75 гн. Общая индуктивность равна:

а — 21,5 гн; б — 20,75 гн; в — 19,25 гн; г — 18,5 гн.

12. Катушка индуктивности имеет реактивное сопротивление 10000 ом при частоте 10000 гц. При частоте 20000 гц ее реактивное сопротивление равно:

а — 500 ом; б — 2 ком; в — 20 ком; г — 40 ком.

13. Реактивное сопротивление катушки в 2 гн при частоте тока 100 гц равно:

а — 200 ом; б — 628 ом; в — 1256 ом; г — 1884 ом.

14. Реактивное сопротивление катушки в 500 мкгн при частоте тока 2 Мгц равно:

а — 628 ом; б — 6,28 ком; в — 62,8 ком; г — 628 ком.

15. Общее реактивное сопротивление катушек 50 мгн и 600 мгн, соединенных последовательно согласованно с взаимной индукцией 25 мгн при частоте 100 кгц, равно:

а — 376 ком; б — 410 ком; в — 424 ком; г — 440 ком.

16. Два индуктивных сопротивления по 5000 *ом*, включенных параллельно, имеют эквивалентное сопротивление:  
 а — 2500 *ом*; б — 5000 *ом*; в — 10 *ком*; г — 50 *ком*.
17. Источник напряжения в 10 *в* подключен к индуктивному сопротивлению 100 *ом*. Ток в цепи равен:  
 а — 10 *мкА*; б — 10 *мА*; в — 100 *мА*; г — 10 *А*.
18. Ток 100 *мА*, протекающий через индуктивное сопротивление 100 *ом*, создает падение напряжения:  
 а — 1 *в*; б — 6,28 *в*; в — 10 *в*; г — 100 *в*.
19. Катушка индуктивности, реактивное сопротивление которой при 20 *МГц* равно 2000 *ом*, имеет индуктивность:  
 а — 10 *мкГн*; б — 16 *мкГн*; в — 159 *мкГн*; г — 320 *мкГн*.
20. Катушка с индуктивностью 160 *мкГн* будет иметь реактивное сопротивление 5000 *ом* при частоте:  
 а — 5 *кГц*; б — 200 *кГц*; в — 1 *МГц*; г — 5 *МГц*.
21. Катушка имеет индуктивное сопротивление 1000 *ом*. Если индуктивность и частота удваиваются, реактивное сопротивление будет равно:  
 а — 100 *ом*; б — 2000 *ом*; в — 4000 *ом*; г — 16000 *ом*.
22. Индуктивность 250 *мкГн* включена последовательно с активным сопротивлением 50 *ом*. Постоянная времени цепи равна:  
 а — 25 *мксек*; б — 5 *мксек*; в — 2 *мсек*; г — 25 *сек*.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Что такое самоиндукция и взаимная индукция?
2. Сформулируйте правило Ленца.
3. Преобразуйте следующие величины в генри, используя степень 10: 250 *мкГн*, 40 *мкГн*, 40 *мГн*, 5 *мГн*.
4. В трансформаторе со стальным сердечником 10% потока первичной обмотки связано со вторичной обмоткой. Какова величина коэффициента связи?
5. Нарисуйте схему трансформатора со стальным сердечником. Трансформатор повышает напряжение в шесть раз.  
 а) Используйте автотрансформатор. б) Используйте трансформатор с изолированной вторичной обмоткой. в) При 100 витках в первичной обмотке сколько витков должно быть во вторичной для обоих случаев?
6. Почему в первичной обмотке силового трансформатора будет чрезмерный ток, если вторичная обмотка замкнута накоротко?  
 Почему нет напряжения на вторичной обмотке, если первичная обмотка разомкнута?
7. Силовой трансформатор, повышающий напряжение в восемь раз, имеет на зажимах первичной обмотки 120 *в*, 50 *Гц*.  
 а) Какова частота напряжения во вторичной обмотке? б) Какова его величина? в) Какова величина тока во вторичной обмотке, если сопротивление нагрузки равно 10000 *ом*? г) Какова величина тока в первичной обмотке?
8. Почему индуктивное сопротивление возрастает при повышении частоты и увеличении индуктивности?
9. Подсчитайте индуктивное сопротивление для катушки 0,5 *Гн* при частотах 100, 200 и 1000 *Гц*.
10. Какова индуктивность катушки, которая имеет реактивное сопротивление 628 *ом*, при 100, 200, 1000 *Гц* и 500 *кГц*?
11. Катушка с индуктивным сопротивлением 2000 *ом* подключена к генератору 10 *в*. Нарисуйте схему, подсчитайте ток. Какова величина напряжения на зажимах катушки?
12. К катушке с индуктивностью 20 *Гн* приложено напряжение 10 *в* частотой 50 *Гц*.  
 а) Нарисуйте схему. б) Какова величина индуктивного сопротивления? в) Подсчитайте ток. г) Какова частота тока?

13. Индуктивность в  $1 \text{ мГн}$  подключена к источнику  $10 \text{ В}$ . Подсчитайте ток в цепи для частоты  $50 \text{ Гц}$ . Если частота увеличится до  $100 \text{ Гц}$ , почему ток в цепи уменьшится?

14. Какова индуктивность катушки с очень малым активным сопротивлением, если по ней протекает ток  $1 \text{ А}$  при напряжении  $120 \text{ В}$ ,  $50 \text{ Гц}$ ?

15. Катушка имеет индуктивность  $1 \text{ мГн}$  и внутреннее сопротивление  $100 \text{ Ом}$ .  
а) Нарисуйте эквивалентную схему катушки (внутреннее сопротивление последовательно с индуктивностью). б) Каково индуктивное сопротивление катушки при частоте  $50 \text{ Гц}$ ? в) Какой ток будет протекать через катушку, если ее подключить к источнику  $100 \text{ В}$  частотой  $400 \text{ Гц}$ ?



### 1. Электрическое поле

**Электрическое поле — особый вид материи** — Выше указывалось, что в природе существуют электрические заряды двух видов — положительные и отрицательные. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Чем объясняется это взаимодействие?

Всякий электрический заряд, помещенный в ту или другую среду, изменяет ее свойства. Если в эту измененную среду поместить теперь другой электрический заряд, то он начнет испытывать на себе действие некоторой силы (будет притягиваться или отталкиваться). Таким образом, электрические заряды взаимодействуют между собой не непосредственно, а через изменяемую ими среду — электрическое поле.

Электрическое поле, как и магнитное, — это особая форма материи.

Если рука человека попадет в достаточно мощное электромагнитное поле, то оно может вызвать ожог. Это говорит о том, что поле не менее материально, чем кипятик или пламя.

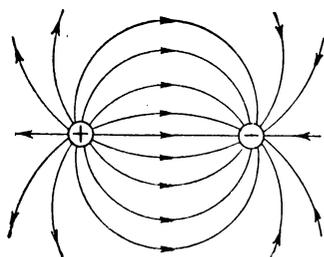
Непосредственно видеть электрические и магнитные поля мы не можем, но это не означает, что они не материальны. Хотя еще не изучены все особенности электрических и магнитных полей, их силы уже поставлены на службу человечеству, создавшему телефон, телеграф, радио, телевидение и т. д. Это лучшее доказательство объективности существования таких полей.

В. И. Ленин доказал ограниченность старого, упрощенного понятия материи. Не только вещество, но и электрические и магнитные поля, свет и другие виды излучения — все это мате-

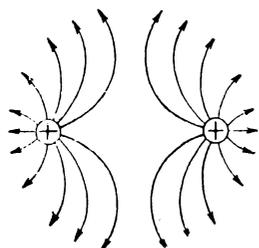
рия, «...материя есть то, что, действуя на наши органы чувств, производит ощущение...»<sup>1</sup>.

**Напряженность  
электрического поля**

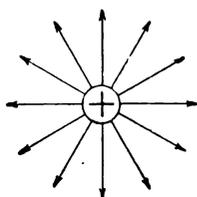
**поля** и обозначается буквой  $E$ . Чем больше напряженность поля, тем сильнее его действие на электрический заряд.



*a*



*б*



*в*

**Рис. 135.** Электрическое поле:  
*a* — двух разноименных зарядов;  
*б* — двух одноименных зарядов;  
*в* — одиночного положительного заряда

Электрическое поле характеризуется силой, с которой оно действует на единственный заряд в данной точке. Эта сила называется **напряженностью электрического**

поля можно сравнить с силой, которая действует в поле земного тяготения на единицу массы (например, на 1 г). Сила притяжения к земле уменьшается по мере удаления предмета от поверхности земли (уменьшается вес предмета). Аналогично и напряженность электрического поля уменьшается по мере удаления от заряженного тела.

Электрическое поле (как и магнитное) условно принято изображать в виде совокупности силовых линий, совпадающих с направлением действия поля. Силовые линии нематериальны; их ввели, чтобы облегчить изучение свойств поля, подобно тому как земные меридианы и параллели, не существующие в действительности, наносят на карты для указания местоположения.

Силовые линии статических (т. е. находящихся в покое) зарядов (рис. 135) изображают электрическое поле; точнее, это поле называется электростатическим.

Принято считать, что силовые линии электрического поля имеют начало и конец. Начинаются они у положительного заряда, а заканчиваются на отрицательном и всегда выходят или входят перпендикулярно к поверхности заряженного тела.

На рис. 135, *a* и *б* изображены электрические поля разноименных и одноименных зарядов, а на рис. 135, *в* — поле оди-

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Сочинения, изд. 4-е, т. 14, стр. 133.

ночного положительного заряда. Направление же силовых линий одиночного отрицательного заряда противоположно показанному для положительного заряда.

На рис. 136, *а* изображены два разноименно заряженных металлических шарика. Электрон в точке  $\mathcal{E}_1$  испытывает на себе действие двух сил:  $F_A$ , которая отталкивает его от шарика *A*, и  $F_B$ , которая притягивает его к шарика *B*. Первая сила больше второй, так как электрон находится ближе к шарика *A*.

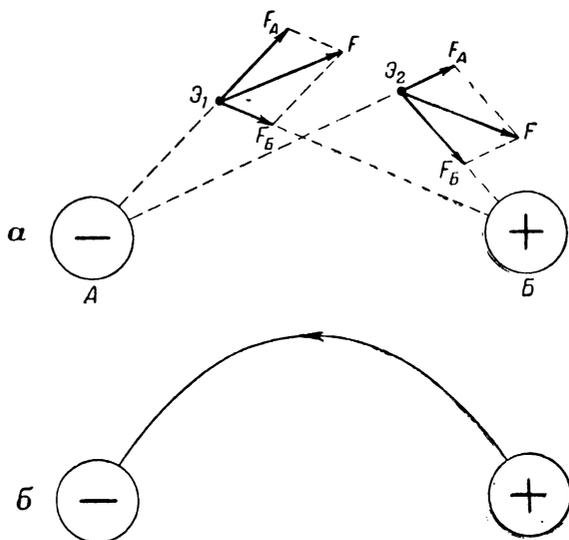


Рис. 136. Электрическое поле:

*а* — направления действия электрических сил на электрон от двух разноименно заряженных шариков;  
*б* — траектория движения электрона

Результирующая сила  $F$  направлена по диагонали параллелограмма, построенного на составляющих силах. В точке  $\mathcal{E}_2$  сила  $F_A$  меньше силы  $F_B$ , поскольку электрон теперь находится ближе к шарика *B*. Таким образом, электрон при своем движении опишет некоторую кривую, называемую **траекторией** (рис. 136, *б*).

Траекторию движения электрона в электрическом поле и принято изображать электрической силовой линией.

Если электрон поместить в другое место, то он опишет другую траекторию и т. д.

По тем же траекториям будут двигаться и положительно заряженные частицы, но только направление движения их будет обратным.

Сила притяжения или отталкивания двух заряженных тел зависит от величины зарядов и от расстояния между ними.

### Разность потенциалов

Мы уже говорили, что для создания электрического тока в цепи необходимо иметь разность потенциалов (разность электрических уровней) на зажимах источника тока. Остановимся на этом более подробно.

Когда мы поднимаем груз, то производим работу, т. е. затрачиваем какое-то количество энергии, которая переходит в так называемую **потенциальную энергию** (остается запасенной в поле земного тяготения).

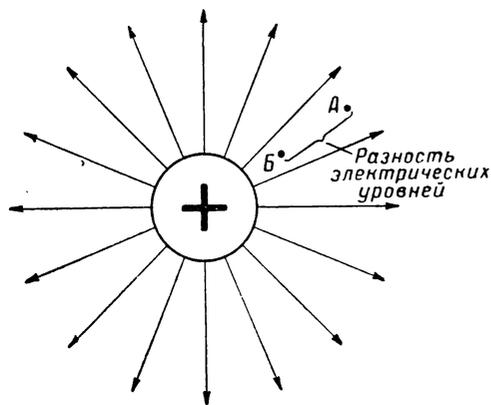


Рис. 137. Потенциал электрического поля

Потенциальную энергию легко превратить, например, в энергию движения, если поднятый груз отпустить.

Чем определяется количество энергии, затрачиваемой на подъем груза? Во-первых, величиной груза: поднять 20 кг труднее, чем 1 кг. Во-вторых, высотой, на которую груз поднимается: поднять один и тот же груз легче на первый этаж, чем на пятый. Но если условиться, что поднимается один

и тот же единичный груз (например, 1 кг), то потенциальная энергия его будет определяться только высотой над поверхностью земли.

Пусть электрическое поле создано положительно заряженным телом (рис. 137). Допустим, что нам нужно внести в точку А из бесконечно удаленной точки единичный положительный заряд (заряд, равный единице). При этом мы должны совершить какую-то работу, чтобы преодолеть силу отталкивания двух одноименных зарядов.

Чем ближе мы поднесем единичный заряд к заряженному телу, тем больше совершенная нами работа. Электрическую характеристику поля, пропорциональную этой работе, назвали его потенциалом в данной точке. Точкам, расположенным на одинаковом расстоянии от заряженного тела, соответствует один и тот же потенциал.

Следовательно, под потенциалом следует понимать электрический «уровень» данной точки поля. Совершенно очевидно, что потенциалы точек А и Б различны (неодинаковы их электрические «уровни»). Другими словами, потенциал поля в какой-либо точке выражает собой энергию, которую поле

способно сообщить единичному заряду, находящемуся в этой точке.

Электрический заряд, расположенный в какой-либо точке поля, грубо можно сравнить с телом, поднятым над землей на некоторую высоту; потенциал электрического поля аналогичен потенциальной энергии поля земного тяготения.

Практически приходится иметь дело с переносом зарядов не из бесконечности (или в бесконечность), а между определенными точками. Поэтому важно знать разность потенциалов между двумя этими точками, а не величину электрического потенциала в каждой из них. Чтобы лучше понять это, приведем следующее сравнение. Находясь в комнате первого этажа, вы подняли гиру в 10 кг на высоту 1 м. Вы совершили какую-то работу. Точно такую же работу вы совершите, если поднимете гиру на ту же высоту находясь в комнате пятого этажа. В первом и во втором случаях высота (уровень) над поверхностью земли различна, но для вас важно не это, а то, что вы каждый раз поднимали груз на одну и ту же высоту — 1 м (т. е. совершали одинаковую работу). Аналогично в электрическом поле важны не сами по себе потенциалы точек, а их разность, необходимая для создания тока.

Разность потенциалов между двумя точками называется **напряжением**.

#### **Электрическая энергия и поле**

Возвратимся к электризации двух шариков (рис. 6). Переноса электроны с шарика *A* на шарик *B*, мы затрачиваем энергию, которая переходит в потенциальную энергию электрического поля шариков. Если электронам предоставить возможность, то они возвратятся к шарикку *A* под действием электрических сил, т. е. совершат работу за счет затраченной нами энергии, перешедшей в потенциальную энергию электрического поля.

Таким образом, под **электрической энергией** следует понимать энергию электрического поля, в которую превращается энергия внешних сил (механическая, химическая и т. д.).

При электризации тел на преодоление электрических сил притяжения разнородных зарядов расходуется внешняя энергия, которая накапливается в электрическом поле наэлектризованных тел и используется в виде электрической энергии.

Электрическое поле — обязательное условие существования электрического тока в замкнутой цепи. Для получения непрерывного тока в цепи необходимо создавать электрическое поле путем непрерывной электризации электродов (полюсов) источника электрического тока.

Магнитное поле по своему действию отличается от электрического. Силы электрического поля действуют на электроны независимо от того, находятся ли они в состоянии покоя или движения. Когда электрон движется, то направление его дви-

жения всегда совпадает с направлением силовой линии. Силы магнитного поля действуют только на движущиеся электроны, да и то не во всех случаях, а только когда электрон пересекает магнитное поле. Когда электрон движется вдоль направления магнитного поля, оно на него не действует.

## 2. Электромагнитное поле

**Открытый контур** Всякий провод, по которому протекает переменный ток высокой частоты, излучает **электромагнитные волны**. Тем не менее не всякая электрическая цепь может создать в пространстве достаточно эффективное излучение. Так, при наличии в цепи двух проводов, по которым чаще всего ток протекает

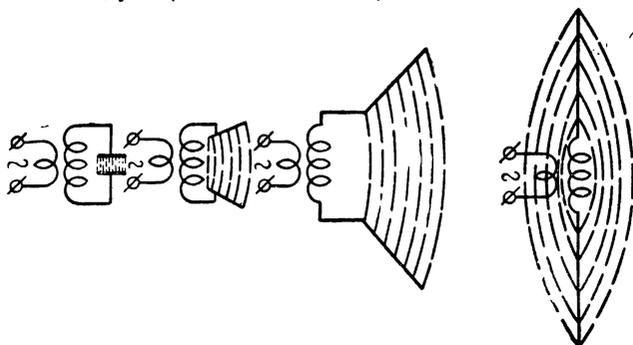


Рис. 138. Переход от замкнутого колебательного контура к открытому

в противоположных направлениях, излучаемые электрические и магнитные поля ослабляют друг друга, и поэтому суммарное излученное поле получается во много раз слабее, чем если бы излучал только один провод.



Рис. 139. Простейшая антенна

Для образования радиоволн в пространстве нельзя использовать и обычный замкнутый контур, называемый контуром с сосредоточенными параметрами  $L - C$ . Магнитное поле его, сосредоточенное вблизи витков катушки, охватывает небольшое пространство. Еще меньшее пространство занимает электрическое поле, сосредоточенное между обкладками конденсатора<sup>1</sup>. Изменения величины и направления магнитного и электрического полей создают вблизи контура очень слабую радиоволну, которая не способна распространяться на большие расстояния.

Такой контур можно сравнить с закрытой комнатой, внутри которой находится источник звука. Находясь вне комнаты, вы слышите слабый звук. Чтобы звук был хорошо слышен, достаточно раскрыть окна и двери. Подобно этому нужно «раскрыть» замкнутый контур, чтобы он мог излучать.

Для создания радиоволны, способной распространяться на большие расстояния, нужно расширить пространство, занимаемое магнитным и электрическим полями. Это возможно сделать при помощи антенны, поскольку она представляет собой **открытый колебательный контур**.

Проследим преобразование замкнутого колебательного контура в открытый — антенну. Возьмем замкнутый контур (рис. 138) и будем раздвигать

<sup>1</sup> Устройство и назначение конденсатора рассматриваются в гл. 8.

пластины конденсатора. Чтобы емкость контура не изменилась, необходимо одновременно увеличивать размеры пластин. В конце концов конденсатор превратится в два длинных провода — его электрическое поле займет значительно большее пространство, чем раньше.

Точно так же, если заменить катушку длинным проводом, увеличится пространство, охватываемое магнитным полем.

Таким образом, колебательный контур с сосредоточенными параметрами  $L$  и  $C$  превратился в колебательный контур (в два провода) с распределенными параметрами  $L$  и  $C$ , т. е. в антенну (рис. 139), способную создать радиоволны в пространстве.

**Волны на поверхности** Образование и распространение радиоволн в некоторой степени аналогично образованию и распространению волн на поверхности воды (рис. 140).

Камень, брошенный в воду, служит источником образования волн двух видов: звуковых волн (слышен всплеск), распространение которых мы не видим, и волн, видимых на поверхности воды, за распространением которых можно проследить. Эти волны от места падения камня расходятся в виде концентрических окружностей, которые, расширяясь, охватывают все большую поверхность воды.

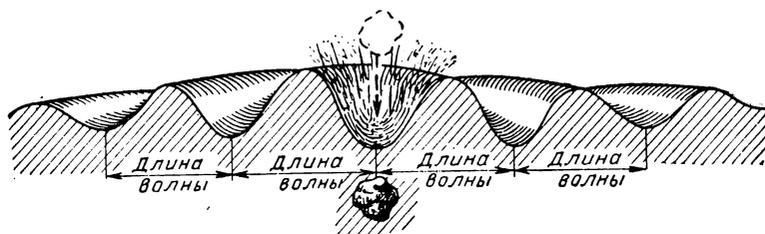


Рис. 140. Образование волн на поверхности воды

Спичка, плавающая на поверхности воды, не будет увлечена проходящими волнами, а останется на месте, совершая колебания вверх и вниз. Отсюда ясно, что вода не передвигается вместе с волной. Камень нарушил покой одних частиц воды, заставив их совершать колебательные движения вверх и вниз, которые передаются соседним частицам, и те тоже начинают колебаться, но с некоторым опозданием. Постепенно все большая масса воды втягивается в колебательное движение. В результате на поверхности воды образуется волна, которая представляет собой вертикальное колебание частиц воды.

Расстояние между двумя соседними гребнями или впадинами называется **длиной волны**.

Радиоволны, возникая около антенны, распространяются в пространстве подобно волнам на поверхности воды или звуковым волнам.

**Электромагнитное поле** Выше указывалось, что при прохождении тока по проводнику вокруг него образуется магнитное поле, а так как между отдельными участками проводника существует определенная разность потенциалов, то имеется и электрическое поле. Следовательно, между электрическим и магнитным полями существует неразрывная связь.

Электрическое поле вызывает движение электронов, т. е. электрический ток. Электрический же ток в свою очередь вызывает появление магнитного поля вокруг проводника или вокруг того места, где он проходит. Следовательно, электрическое поле создает магнитное, а переменное магнитное поле, создавая электрическое поле, вызывает появление электрического тока.

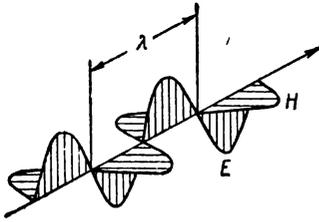
Силовые линии изменяющегося электрического поля (в отличие от статического) замкнуты так же, как и силовые линии магнитного поля.

Поскольку изменяющиеся магнитное и электрическое поля неразрывно связаны, правильнее говорить об **электромагнитном поле** как о совокупности непрерывно изменяющихся электрического и магнитного полей.

На рис. 141 приведены значения напряженностей магнитного и электрического полей для одного момента времени. Направление напряженности  $H$  магнитного поля в каждой точке перпендикулярно направлению напряженности  $E$  электрического поля.

### Длина волны

Каждую секунду антенна излучает в пространство количество радиоволн, равное частоте тока в антенне. Допустим, что частота тока в антенне  $3 \text{ Мгц}$ , тогда за  $1 \text{ сек}$  будет создано в пространстве  $3000000$  радиоволн. За одну секунду «первая» волна пройдет путь  $300000 \text{ км}$ , а все остальные волны пройдут соответственно меньшие расстояния, т. е. на расстоянии  $300000 \text{ км}$  уложится в данном случае  $3000000$  радиоволн. Отсюда легко определить длину  $\lambda$  одной волны:



$$\lambda = \frac{300000}{3000000} = 0,1 \text{ км} = 100 \text{ м.}$$

Если частота тока в антенне  $1 \text{ Мгц}$ , то за  $1 \text{ сек}$  создается  $1000000$  волн. В этом случае

$$\lambda = \frac{300000}{1000000} = 0,3 \text{ км} = 300 \text{ м.}$$

Рис. 141. Мгновенное значение напряженности электромагнитного поля в пространстве

Расстояние, на которое распространяется радиоволна за время одного колебания тока в антенне, называется **длиной волны**.

Другими словами, длина волны — это расстояние между двумя ближайшими точками на синусоиде, имеющими одну и ту же фазу (например, расстояние между двумя соседними положительными амплитудами).

Так как скорость распространения электромагнитных волн (радиоволн) постоянна и равна скорости света  $300000000 \text{ м/сек}$ , то длина волны

$$\lambda = cT,$$

где  $\lambda$  — длина волны в метрах;  
 $c$  — скорость света, равная  $300000000 \text{ м/сек}$ ;  
 $T$  — период колебаний в секундах.

Но так как

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

значит,

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (49)$$

где  $f$  — частота колебаний в герцах,  
 или

$$\lambda (\text{м}) = \frac{3 \cdot 10^8 (\text{м/сек})}{f (\text{гц})}.$$

Чем выше частота тока в антенне, тем меньше длина излучаемых радиоволн.

Если частоту взять в мегагерцах, то формула примет вид

$$\lambda (\text{м}) = \frac{300 (\text{м/сек})}{f (\text{Мгц})},$$

или

$$\lambda (\text{м}) \cdot f (\text{Мгц}) = 300.$$

Этой формулой легко пользоваться. Часто по радио передают, что такая-то станция работает на частоте столько-то мегагерц. Чтобы узнать длину волны этой станции в метрах, достаточно 300 разделить на число мегагерц. И наоборот, если вам нужно узнать частоту в мегагерцах, достаточно 300 разделить на длину волны в метрах.

Для звуковых волн скорость распространения в воздухе равна около 300 м/сек для средних условий. Значит,

$$\lambda (\text{м}) = \frac{300 (\text{м/сек})}{f (\text{гц})}.$$

**Пример 63.** Найти длину волны, соответствующую частотам 1200 и 600 кгц<sup>1</sup>.

**Решение.** По формуле (49)

$$\lambda_1 = \frac{300000}{1200} = 250 \text{ м};$$

$$\lambda_2 = \frac{300000}{600} = 500 \text{ м}.$$

**Пример 64.** Радиостанция работает на волне 240 м. Определить ее частоту.

**Решение.** Из формулы (49) находим

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300000}{240} = 1250 \text{ кгц}.$$

**Пример 65.** Телевизионная передача осуществляется на частоте 60 Мгц. Определить длину волны.

**Решение.** По формуле (49)

$$\lambda (\text{м}) = \frac{3 \cdot 10^{10} (\text{см/сек})}{60 \cdot 10^6 (\text{гц})} = \frac{1}{20} \cdot 10^4 = 0,05 \cdot 10^4 = 500 \text{ см}.$$

**Пример 66.** Определить длину звуковых волн, создаваемых громкоговорителем при частоте 100 гц.

**Решение.** По формуле (49)

$$\lambda (\text{м}) = \frac{300 (\text{м/сек})}{100 (\text{гц})} = 3 \text{ м}.$$

На рис. 142 условно (при помощи силовых линий) изображены магнитное и электрическое поля вокруг антенны. При питании антенны переменным током высокой частоты создается переменное электромагнитное поле:

### Электромагнитные волны

Некоторое упрощенное представление об образовании и распространении электромагнитных волн можно получить, рассмотрев колебательное движение одного электрона.

Поскольку вокруг электрического заряда существует электрическое поле, то при движении заряда перемещается и электрическое поле (силовые линии). Однако картина поля мгновенно измениться не может. Для этого требуется какое-то время. Изменение состояния поля распространяется от одной точки пространства к другой со скоростью света.

<sup>1</sup> Если частота выражается в килогерцах, то для получения длины волны в метрах скорость распространения надо брать не в метрах, а в километрах (300000 км/сек).

На рис. 143 показан один период колебания электрона в проводнике и изменение при этом одной силовой линии электрического поля в пространстве

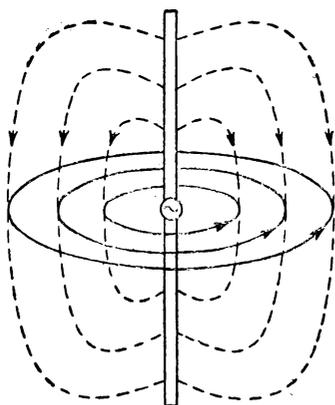


Рис. 142. Условное изображение электрического и магнитного полей вокруг антенны

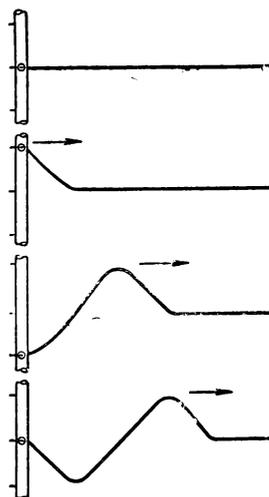


Рис. 143. Изменение электрического поля при движении электрона в проводнике

стве. При продолжительном периодическом колебании электрона в проводнике в пространстве образуется волна электрического поля.

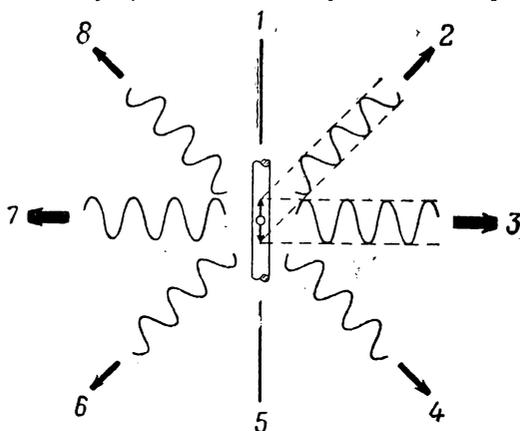


Рис. 144. Условное изображение распространения волн электрического поля в различных направлениях от колеблющегося электрона

На рис. 144 представлена картина распространения волн электрического поля в восьми направлениях от колеблющегося электрона. Колебания с наи-

большей амплитудой распространяются перпендикулярно оси провода, т. е. в этих направлениях происходит наибольшее излучение. Вдоль оси провода амплитуды колебаний равны нулю, т. е. в этих направлениях отсутствует излучение. Характер излучения и распространения волн не изменится, если вместо одного электрона будут колебаться многие: чем больше их участвует в колебательном процессе, тем больше мощность излучаемых колебаний.

Электрическое поле в любой точке пространства можно разложить на две составляющие (рис. 145). Составляющие электрического поля, перпендикулярные направлению распространения волны, несут на себе энергию. Если

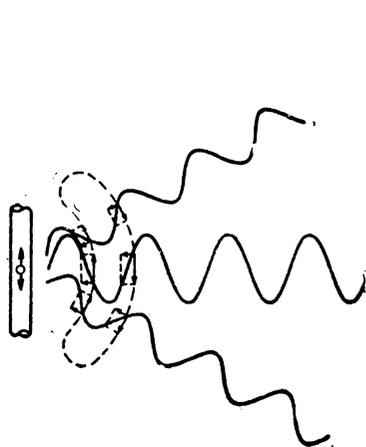


Рис. 145. Составляющие электрического поля

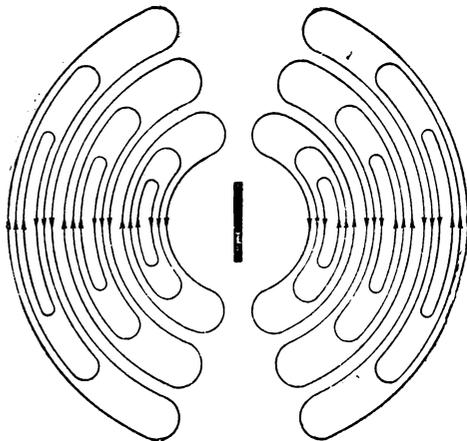


Рис. 146. Условное изображение электрического поля

их просуммировать во всех точках пространства, то получается электрическое поле в виде замкнутых силовых линий, которые распространяются в пространстве (рис. 146).

Таким образом, при питании антенны переменным током высокой частоты в пространстве вокруг антенны возникает переменное электромагнитное поле, которое изменяет электрическое состояние среды. Другими словами, возникает колебание электрических и магнитных сил, вызывающее подобное колебание в соседних точках пространства, т. е. электромагнитные волны.



### 1. Электростатическая индукция

Отрицательно заряженная металлическая пластина *A* (рис. 147) находится на изолирующей подставке (иначе создать на пластине избыток электронов было бы невозможно — они «стекали» бы в землю). Электроны, отталкиваясь один от другого, распределяются равномерно по всей поверхности пластины.

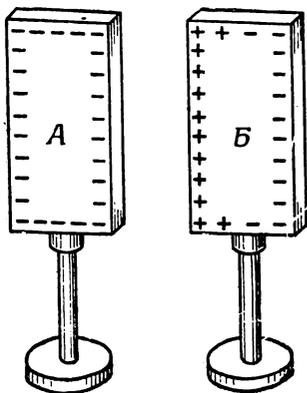


Рис. 147. Явление электростатической индукции

Если в электрическое поле пластины *A* внести изолированную незаряженную металлическую пластину *B*, то на ее поверхности появятся электрические заряды: на стороне, обращенной к заряженному телу, противоположного знака, а на другой стороне — одноименного. Такой способ электризации на расстоянии называется **электростатической индукцией**.

Заряды на поверхности пластины *B* будут существовать все время, пока она находится в электрическом поле. Стоит только удалить пластину *A* или *B*, как электрический заряд на поверхности пластины *B* нейтрализуется.

Явление электростатической индукции объясняется следующим образом. В проводящей пластине *B* под влиянием поля отрицательно заряженной пластины *A* свободные электроны перемещаются в противоположную от нее сторону. Сторона, обращенная к пластине *A*, испытывая недостаток электронов, оказывается заряженной положительно. Такое разделение зарядов силами поля — вынужденное: общее количество зарядов на пластине *B* не изменяется, и при устранении внешнего влияния

она снова становится нейтральной — ее заряды компенсируются (электроны возвращаются на прежние места).

Для того чтобы пластина *Б* осталась заряженной, необходимо заряды одного из знаков отвести. Стоит, например, прикоснуться заземленным проводником к стороне пластины *Б*, заряженной отрицательно (когда пластина *Б* находится в поле пластины *А*), как свободные электроны будут отведены в землю. Если теперь пластину *Б* удалить из поля, она окажется заряженной положительно.

Явление электростатической индукции происходит аналогично, если пластина *А* заряжена положительно. Но в этом случае сторона пластины *Б*, обращенная к пластине *А*, оказывается заряженной отрицательно, а обратная — положительно. Чем выше электризация пластины *А* (чем выше ее потенциал), тем до большего потенциала можно наэлектризовать пластину *Б*.

## 2. Электрическая емкость. Конденсатор

### Общие понятия

Тот факт, что электрическое поле заряда имеет силу, которая может отталкивать или притягивать электроны, означает, что заряд может индуцировать (наводить) излишек или недостаток электронов в любом материале, помещенном в электрическом поле. Например, электроны диэлектрика в поле между зарядами, показанными на рис. 148, сдвигаются вниз. Верхняя часть диэлектрика заряжается положительно из-за недостатка электронов по сравнению с нижней частью, где их избыток. Образуется индуцированный заряд вследствие электрической индукции, которая соответствует электромагнитной индукции магнитного поля.

Смещение электронных орбит в диэлектрике аналогично смещению молекулярных магнетиков в магнитном материале под действием магнитного поля. Структура диэлектрика деформируется электрическим полем.

Всякое тело можно зарядить только до определенного потенциала. При повышении потенциала сверх предельного будет происходить разряд. Различные тела вмещают различное количество электричества, другими словами, обладают неодинаковой электрической емкостью.

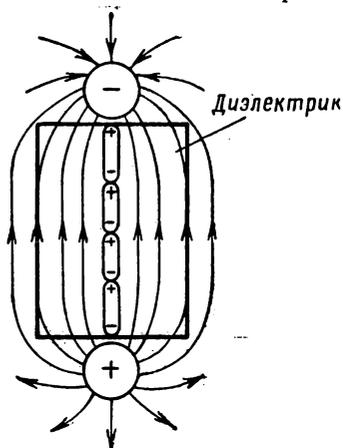


Рис. 148. Влияние электрического поля на диэлектрик

Способность тела накапливать электрические заряды с одновременным повышением потенциала до определенного уровня называется электрической емкостью или просто емкостью.

Для получения необходимых емкостей в электротехнике применяют электрические конденсаторы. Принцип их действия основан на использовании явления электростатической индукции.

Конденсатор

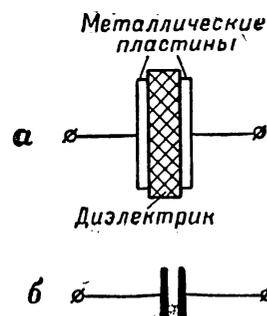


Рис. 149. Конденсатор:  
а — схематическое устройство простейшего конденсатора; б — условное обозначение конденсатора

Простейший конденсатор образуют две металлические пластины, изолированные одна от другой (рис. 149, а).

Если одну пластину зарядить положительно, а другую — отрицательно, то разноименные заряды, притягиваясь друг к другу, будут удерживаться на пластинах — «запасаться». Конденсатор способен запастись на своих пластинах большое количество электричества, т. е. может служить накопителем электрической энергии.

Чаще всего пластины конденсатора называют обкладками, а изолирующий слой — диэлектриком. Обкладки обычно изготавливают из алюминия, латуни, стали.

В качестве диэлектрика используют слюду, воздух, бумагу, масло, парафин.

Количество электричества в конденсаторе можно сравнить с количеством жидкости в сосуде. Последнее зависит от объема сосуда и от уровня, до которого жидкость налита: чем больше объем и чем выше уровень, тем больше жидкости. Точно так же, чем больше емкость конденсатора и чем выше потенциал, до которого он заряжен, тем большее количество электричества в нем запасено:

Фарада

$$Q = CU, \quad (50)$$

где  $Q$  — заряд, запасенный в конденсаторе;

$C$  — емкость конденсатора, т. е. величина, показывающая, какой заряд может быть накоплен при данном напряжении;

$U$  — приложенное напряжение.

Единицей емкости является фарада. Емкость конденсатора равна 1 фараде, если заряд в 1 кулон повышает его потенциал на 1 вольт.

При большем напряжении заряда электрическое поле сильнее, поэтому в конденсаторе накапливается больше электричества, т. е. величина заряда  $Q$ , запасаемого в конденсаторе, пропорциональна приложенному напряжению  $U$ .

Так как емкость в одну фараду очень велика, то обычно используются меньшие единицы: микрофарада — миллионная часть фарады (сокращенно обозначается *мкф* или  $\mu F$ ); пикофарада (микромикрофарада) — миллионная часть микрофарады (сокращенно обозначается *пф* или  $\mu\mu F$ ).

$$1 \text{ ф} = 10^6 \text{ мкф} = 10^{12} \text{ пф};$$

$$1 \text{ мкф} = 10^6 \text{ пф} = 10^{-6} \text{ ф};$$

$$1 \text{ пф} = 10^{-6} \text{ мкф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

Типичные величины практических емкостей — от сотен микрофарад до нескольких пикофарад.

Емкость конденсатора зависит:

— от размеров проводящих обкладок (чем они больше, тем больше емкость);

— от расстояния между обкладками или толщины диэлектрика (чем тоньше диэлектрик, тем больше емкость);

— от вещества диэлектрика (электрической проницаемости).

**Площадь пластин** Если площадь каждой пластины увеличить в два раза, то во столько же возрастает заряд конденсатора при одной и той же разности потенциалов. При больших пластинах увеличивается площадь соприкосновения с ними диэлектрика, следовательно, через него проходит больше силовых линий электрического поля, а значит, поле может создать больший заряд. Таким образом, **емкость конденсатора (накапливаемый им заряд) увеличивается прямо пропорционально размерам его пластин.**

**Толщина диэлектрика** Если расстояние между пластинами уменьшить в два раза, во столько же увеличится заряд конденсатора при одной и той же разности потенциалов. Это объясняется тем, что, чем меньше расстояние между пластинами, тем больше взаимное влияние между зарядами, что позволяет сосредоточить на пластинах большее количество электричества, т. е. увеличить емкость конденсатора.

**Электрическая проницаемость** (в литературе встречается диэлектрическая проницаемость, что одно и то же) **характеризует способность диэлектрика концентрировать электрическое поле.** Она показывает, во сколько раз увеличится емкость конденсатора, если воздушный диэлектрик заменить другим. Численно величина электрической проницаемости определяется отношением электрического поля в диэлектрике к электрическому полю в воздухе или вакууме. Электрическая проницаемость воздуха или вакуума, равная единице, берется за исходную. Слюда, например, имеет среднюю электрическую проницаемость, равную 6; это означает, что при использовании слюды поток электрического поля в 6 раз больше, чем при использовании воздуха.

В любом диэлектрике под действием напряжения на обкладках конденсатора происходит поляризация, т. е. смещение электронных орбит атомов диэлектрика в сторону положительно заряженной пластины. Вследствие этого заряд частично нейтрализуется. При одном и том же напряжении число зарядов на обкладках увеличивается, а это согласно формуле (50) равносильно увеличению емкости.

Электрическая проницаемость обозначается буквой  $\epsilon$  (эпсилон).

Ниже приводится электрическая проницаемость некоторых диэлектриков:

Воздух или вакуум . . . . .	1
Керамика . . . . .	80—1200
Стекло . . . . .	5,5—10
Слюда . . . . .	3—8
Нефть . . . . .	3—5
Бумага . . . . .	2—6
Резина . . . . .	2—4
Электрокартон . . . . .	2,5—4

Величина электрической проницаемости зависит от температуры, давления и влажности. Меньше всего изменяется  $\epsilon$  слюды, поэтому слюду применяют в качестве диэлектрика для изготовления точных конденсаторов.

**Диэлектрическая прочность** выражает способность диэлектрика выдерживать определенную разность потенциалов без пробоя конденсатора.

Каждый конденсатор рассчитан на определенное напряжение, которое называется **рабочим** (номинальным). При превышении рабочего напряжения может произойти пробой диэлектрика, обкладки конденсатора замкнутся накоротко и конденсатор выйдет из строя.

Физический смысл явления пробоя диэлектрика заключается в том, что силы электрического поля, действующие на электроны, не только смещают их, но и вырывают из атома, после чего диэлектрик становится проводящим электрический ток. Та напряженность поля, которую диэлектрик выдерживает до пробоя, служит мерой его диэлектрической прочности. Например, для пробоя воздушного зазора в 1 см нужно приложить к нему напряжение около 30 кВ, для пробоя пластинки слюды толщиной 1 см требуется напряжение 1500 кВ.

Условное обозначение конденсатора приведено на рис. 149, б.

В зависимости от вида диэлектрика конденсаторы делятся на **воздушные**, с **твердым диэлектриком** и с **жидким диэлектриком**. Кроме того, конденсаторы бывают постоянной и переменной емкости.

На рис. 150 изображен конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком. Он состоит из нескольких неподвижных металлических пластин (статора), электрически соединенных между собой, и нескольких подвижных пластин (ротора), укрепленных на оси. При повороте ручки подвижные пластины входят между неподвижными или выходят из них. При этом меняется площадь перекрытия пластин, а следовательно, и емкость конденсатора.

На рис. 151 изображены керамические, слюдяные, бумажные и металlobумажные конденсаторы постоянной емкости.

В керамических конденсаторах (рис. 151, а) диэлектриком служит керамика с высокой электрической проницаемостью. С каждой стороны диэлектрика имеется по одному слою серебра. Эти два слоя являются обкладками конденсатора. Емкость таких конденсаторов — от нескольких единиц до тысяч пикофарад.

Слюдяные конденсаторы (рис. 151, б) имеют емкость от единиц до десятков тысяч пикофарад, бумажные (рис. 151, в) — от 0,01 до 10 мкф, металlobумажные (рис. 151, г) прямоугольной формы — 0,1—30 мкф, а цилиндрической — 0,025—1 мкф. Размеры металlobумажных конденсаторов значительно меньше, чем бумажных, при одинаковых основных характеристиках.

Часто причиной нарушения нормальной работы приемника бывает пробой конденсаторов постоянной емкости. При использовании же металlobумажных конденсаторов пробой не страшен, так как емкость пробитого конденсатора быстро самовосстанавливается, объясняется это следующим. В качестве диэлектрика в металlobумажных конденсаторах применяют бумагу, покрытую слоем ацетилцеллюлозного лака, а в качестве обкладок — очень тонкие слои металла, нанесенные на одну сторону бумаги поверх слоя лака. Пробой конденсатора обычно происходит в «слабых местах» диэлектрика, т. е. там, где бумага тоньше или где в нее вкраплены электропроводящие частицы. При этом возникает сильный электрический ток, который мгновенно расплавляет металлический слой вокруг места пробоя. Лишенная сплошного металлического слоя, бумага в этом месте оказывается изолированной от обкладок и ток прекращается.

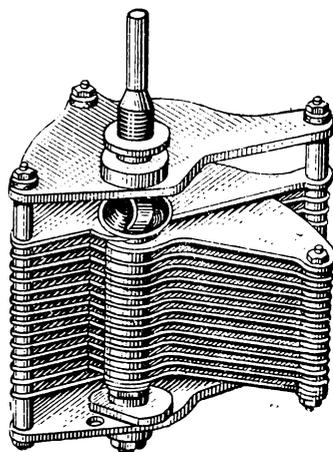
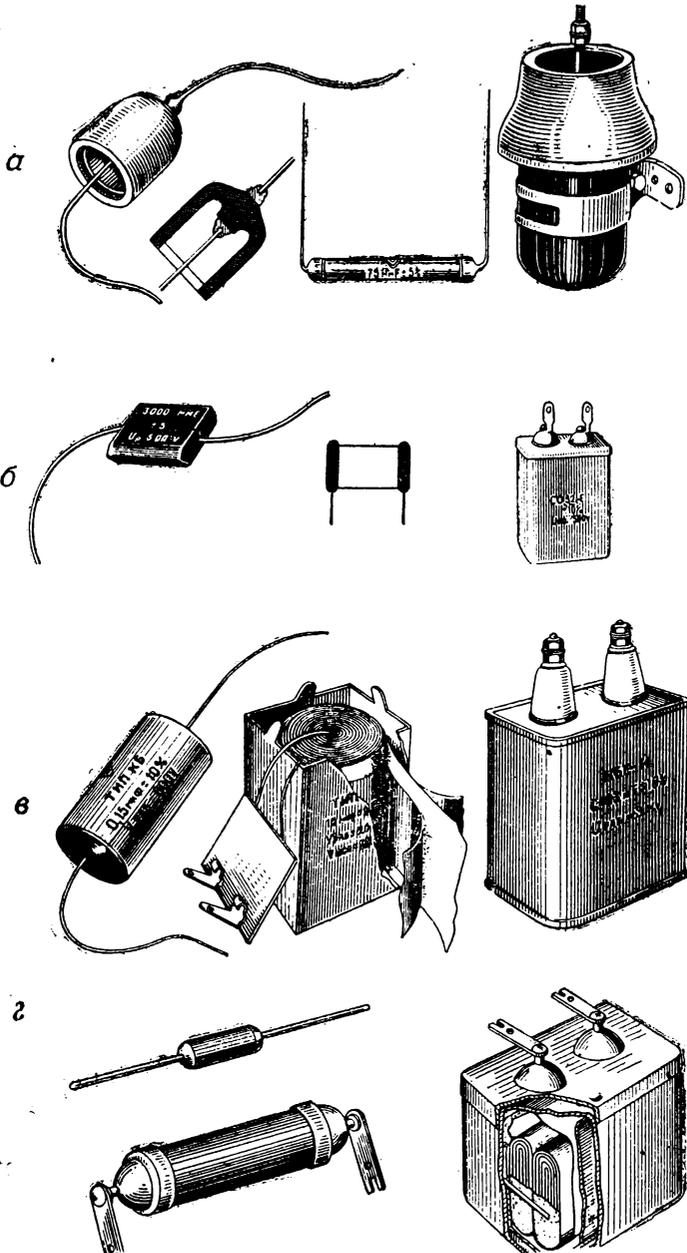


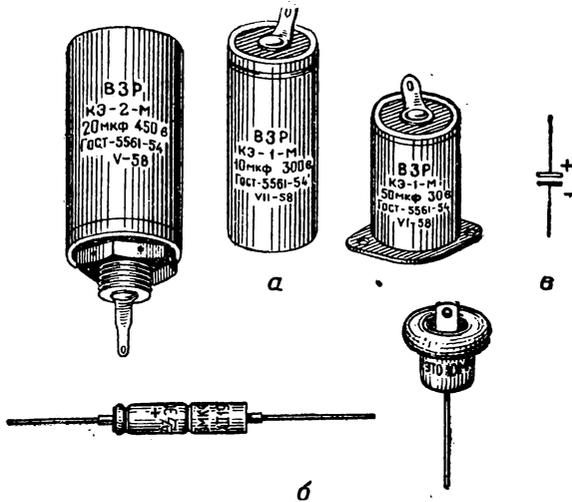
Рис. 150. Конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком



**Рис. 151.** Конденсаторы постоянной емкости:  
 а — керамические; б — слюдяные; в — бумажные; г — металлобумажные

Емкость конденсатора после пробоя мало уменьшается, так как площадь оплавления очень мала. Металлобумажный конденсатор может выдержать несколько сотен и даже тысяч пробоев.

На рис. 152 изображены конденсаторы с жидким диэлектриком — так называемые **электролитические конденсаторы**. Их изготовляют из двух алюминиевых пластин, помещаемых в химический раствор или пасту. Роль диэлектрика играет тонкая оксидная пленка, нанесенная на одну из пластин. Поскольку пленка очень тонкая, емкость конденсатора получается очень



**Рис. 152.** Электролитические конденсаторы: а — электролитические конденсаторы с алюминиевым анодом; б — малогабаритные электролитические конденсаторы; в — условное изображение

большой (до нескольких тысяч микрофард) при сравнительно небольших его размерах. Пластина с пленкой служит одной обкладкой конденсатора. Другой его обкладкой фактически является электролит, а чистая алюминиевая пластина предназначена для получения контакта с электролитом.

При включении в цепь электролитического конденсатора нужно соблюдать определенную полярность, иначе оксидная пленка исчезнет и конденсатор станет непригодным к использованию. Поэтому эти конденсаторы используют в цепях постоянного тока.

Недостатки электролитических конденсаторов следующие:

— низкое пробивное напряжение вследствие небольшой диэлектрической прочности оксидной пленки (электролитические конденсаторы нельзя включать в цепи с высоким напряжением);

— зависимость емкости от температуры.

### 3. Заряд и разряд конденсатора

Незаряженный конденсатор (рис. 153, *а*) подключим к источнику постоянного тока (рис. 153, *б*). Под действием сил электрического поля от отрицательного зажима источника к конденсатору начнут перемещаться электроны, и на верхней пластине окажется их избыток (так как они не могут «стекать» через диэлектрик). Каждый электрон верхней пластины вследствие электростатической индукции вызовет на внутренней стороне нижней пластины равный ему положительный заряд (ион), а

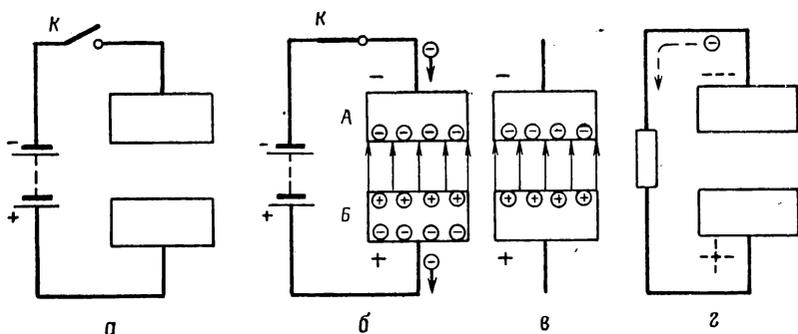


Рис. 153. Подключение цепи, содержащей конденсатор, к источнику постоянного тока:

*а* — незаряженный конденсатор; *б* — конденсатор заряжается от источника до величины приложенного напряжения; *в* — запасенный заряд остается в конденсаторе; *г* — разряд конденсатора

на внешней — отрицательный. Положительные заряды называются связанными (поскольку они «уравновешиваются» электронами верхней пластины), а отрицательные — свободными.

Свободные электроны с нижней пластины будут передвигаться к положительно заряженному зажиму источника тока, и в цепи возникнет электрический ток — происходит заряд конденсатора. Часть электронов верхней пластины нейтрализуется положительным зарядом в результате смещения электронных орбит диэлектрика. Но от источника тока поступают на верхнюю пластину новые электроны. Они накапливаются на пластине *А*, в то время как пластина *Б* накапливает равный избыток протонов.

По мере заряда конденсатора его собственное напряжение увеличивается и по окончании заряда становится равным напряжению источника тока. При отключении источника конденсатор остается заряженным (рис. 153, *в*).

В начале заряда конденсатора в цепи течет большой ток. По мере того как число электронов на верхней пластине увеличивается, величина зарядного тока уменьшается и доходит до нуля в конце заряда. В этом случае величина собственного элек-

трического поля конденсатора становится равной величине поля источника. Направлены же эти поля навстречу одно другому.

**Разряд** Энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора, расходуется при его разряде.

Если подключить к пластинам конденсатора какую-нибудь нагрузку, то электроны верхней его пластины начнут перемещаться по соединительным проводам на нижнюю пластину и нейтрализовать на ней положительные ионы. Конденсатор будет быстро разряжаться до тех пор, пока его собственное напряжение не упадет до нуля (рис. 153, *з*). Значит, энергия электрического поля конденсатора расходуется в нагрузке.

Когда конденсатор полностью разрядится, напряжение на его зажимах станет равным нулю — он опять окажется незаряженным (рис. 153, *а*) и его можно снова зарядить от источника.

Конденсатор имеет способность накапливать заряд, необходимый для создания разности потенциалов, равной приложенному напряжению. Если вместо 10 *в* приложить 120 *в*, то конденсатор зарядится до 120 *в*. Если же напряжение будет больше номинального, на которое рассчитан конденсатор, то электрическое поле может разрушить молекулярную структуру диэлектрика — потечет ток и, следовательно, произойдет короткое замыкание между пластинами.

Следует обратить внимание, что ток заряда и разряда конденсатора протекает только в соединительных проводах, а не через диэлектрик.

#### 4. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов

Последовательное, параллельное или смешанное соединение конденсаторов применяется для того, чтобы получить необходимую величину емкости и нормальное (в пределах допуска) напряжение на каждом конденсаторе.

**Последовательное соединение** При последовательном соединении конденсаторов (рис. 154) общая емкость их уменьшается по сравнению с емкостью каждого конденсатора, поскольку общая толщина диэлектрика как бы увеличивается.

Величина, обратная общей емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов, равна сумме величин, обратных их емкостям:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (51)$$

Рассмотрим, как распределяется напряжение между конденсаторами, соединенными последовательно.

Подключим к источнику тока три последовательно соединенных конденсатора различной емкости (рис. 154). Допустим, что электроны от источника, перемещаясь к пластине 1, зарядят ее количеством электричества  $-Q$ . Тогда свободные электроны пластины 2 перейдут на пластину 3 и также зарядят ее количеством электричества  $-Q$ . Пластина 2, потеряв электроны, зарядится положительным электричеством  $+Q$  и т. д. Таким образом, все три конденсатора, несмотря на разную емкость, зарядятся одинаковым количеством электричества.

Напряжения на конденсаторах различной емкости различны, потому что каждый из них заряжается одним и тем же количе-

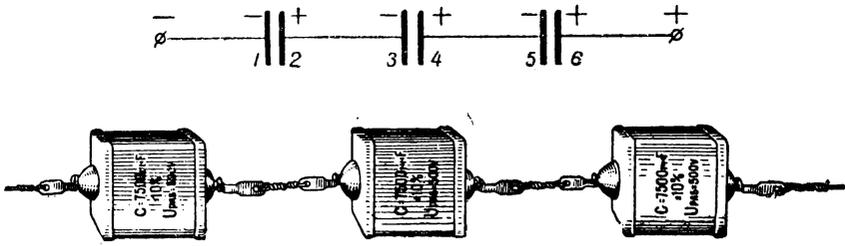


Рис. 154. Последовательное соединение конденсаторов

ством электричества. Общее напряжение  $U$ , приложенное к трем конденсаторам, равно сумме напряжений на каждом из них:

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3.$$

Поскольку

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3,$$

то

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

Итак, напряжение на каждом из последовательно соединенных конденсаторов обратно пропорционально его емкости. Чем больше емкость конденсатора, тем меньше напряжение, необходимое для его заряда определенным количеством электричества.

При включении  $n$  конденсаторов одинаковой емкости общая емкость батареи уменьшается в  $n$  раз:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{n}. \quad (52)$$

Для двух конденсаторов, соединенных последовательно,

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (53)$$

При последовательном включении  $n$  одинаковых конденсаторов напряжение на каждом из них в  $n$  раз меньше напряжения, приложенного ко всей батарее. Таким образом, если напряжение цепи выше пробивного напряжения отдельных конденсаторов, необходимо прибегнуть к последовательному соединению.

**Параллельное  
соединение**

**При параллельном соединении конденсаторов (рис. 155) общая емкость их увеличивается по сравнению с емкостью каждого**

из них, потому что как бы увеличивается общая площадь обкладок конденсаторов. Общая емкость батареи конденсаторов в этом случае равна сумме их емкостей:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \quad (54)$$

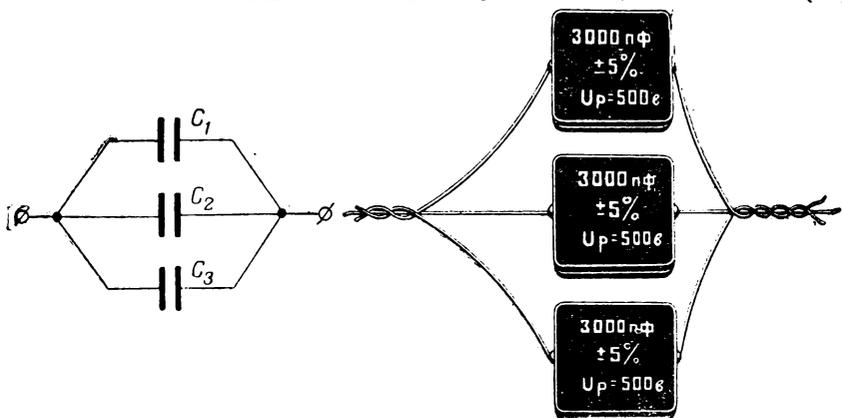


Рис. 155. Параллельное соединение конденсаторов

Параллельное включение нескольких конденсаторов применяют для получения большей емкости, чем емкость каждого из них в отдельности. **При параллельном соединении напряжение на всех конденсаторах одинаковое.**

**Смешанное  
соединение**

Чтобы использовать преимущества последовательного и параллельного соединений конденсаторов, применяют смешанное их соединение (рис. 156). Его можно получить двумя способами:

1) соединить конденсаторы сначала последовательно, а потом последовательные группы соединить между собой параллельно;

2) соединить конденсаторы сначала параллельно, а потом параллельные группы соединить между собой последовательно.

Величина емкости при этих способах соединения получается одна и та же.

**Пример 67.** Три конденсатора, емкости которых  $C_1=2\text{ мкф}$ ,  $C_2=4\text{ мкф}$  и  $C_3=6\text{ мкф}$ , соединены последовательно. Определить общую емкость батареи.

Решение. По формуле (51)

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+2}{12} = \frac{11}{12},$$

откуда

$$C_{\text{общ}} = \frac{12}{11} = 1,09 \text{ мкф.}$$

**Пример 68.** Четыре конденсатора одинаковой емкости ( $C=1,2 \text{ мкф}$ ) соединены последовательно. Определить общую емкость батареи.

Решение. По формуле (52)

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{n} = \frac{1,2}{4} = 0,3 \text{ мкф.}$$

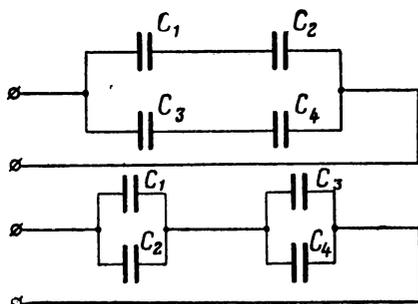


Рис. 156. Смешанное соединение конденсаторов

**Пример 69.** Два конденсатора, емкости которых  $C_1=0,4 \text{ мкф}$  и  $C_2=0,6 \text{ мкф}$ , соединены последовательно. Определить общую емкость.

Решение. По формуле (53)

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0,4 \cdot 0,6}{0,4 + 0,6} = \frac{0,24}{1} = 0,24 \text{ мкф.}$$

$=0,5 \text{ мкф}$  и  $C_3=0,4 \text{ мкф}$ , соединены параллельно. Определить общую емкость батареи.

Решение. По формуле (54)

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0,5 + 0,4 = 2,9 \text{ мкф.}$$

**Пример 70.** Три конденсатора, емкости которых  $C_1=2 \text{ мкф}$ ,  $C_2=$

### Неисправности в конденсаторах

Обычная неисправность конденсатора — обрыв в выводах или короткое замыкание между пластинами. В том и другом случае конденсатор непригоден, так как он не может накапливать заряд. Кроме того, частичному замыканию эквивалентна утечка в конденсаторе, когда диэлектрик постепенно теряет изоляционные свойства под действием приложенного напряжения, т. е. сопротивление диэлектрика уменьшается.

Если сопротивление исправного конденсатора исчисляется мегомами (сопротивление бумажных, слюдяных и керамических конденсаторов практически бесконечно — 500—1000 *Мом* и больше, а электролитических — порядка 0,5 *Мом*), а замкнутого накоротко конденсатора равно нулю, то сопротивление конденсатора с утечкой имеет промежуточное значение.

Сопротивление конденсатора проверяют омметром обычно по высокоомной шкале. Одну сторону конденсатора следует отсоединить от схемы, чтобы исключить возможность появления параллельных сопротивлений. Выводы омметра подключают к зажимам конденсатора. При исправном конденсаторе стрелка прибора сначала быстро отклоняется в сторону низкого сопротивления шкалы, а затем медленно возвращается в

сторону показания бесконечно большого сопротивления ( $\infty$ ). Когда стрелка остановится — прибор показывает сопротивление диэлектрика конденсатора.

Перед проверкой сопротивления конденсатор необходимо разрядить и только потом подключить к омметру. Конденсатор начинает заряжаться от батареи омметра. Под влиянием тока заряда стрелка прибора отклоняется от показания  $\infty$ . Максимальный ток протекает через омметр в первый момент заряда (чем и объясняется быстрое отклонение стрелки). Затем он уменьшается, поскольку напряжение на конденсаторе увеличивается в полярности, противоположной приложенному напряжению, т. е. разность напряжений между источником тока и конденсатором уменьшается, поэтому стрелка медленно возвращается в сторону показания  $\infty$ . Наконец, конденсатор полностью зарядится до напряжения батареи омметра, ток заряда становится равным нулю и омметр покажет величину сопротивления диэлектрика. Это означает, что конденсатор может накапливать заряд, т. е. исправен.

Неисправности конденсатора по показаниям омметра определяются следующим образом:

1. Если стрелка омметра быстро идет к нулю и остается в этом положении, то конденсатор имеет короткое замыкание.

2. Если прибор показывает заряд конденсатора, как описано выше, но его стрелка устанавливается на сопротивлении, которое заметно меньше нормального, значит, конденсатор имеет утечку. Использовать его в цепях высокого напряжения не рекомендуется.

Электролитический конденсатор следует проверять дважды при различных подключениях омметра и в расчет брать наибольшее показание.

3. Если прибор не показывает заряда конденсатора, а стрелка установилась на чрезмерно высоком сопротивлении, значит, конденсатор имеет обрыв. Однако в этом случае необходимо проявить большую внимательность, поскольку вообще-то высокое сопротивление — нормальное для конденсаторов, а именно: переключить выводы омметра, чтобы разрядить конденсатор, и проверить его снова. При этом необходимо помнить, что конденсаторы емкостью 100 *нф* и меньше имеют очень небольшой ток заряда.

## 5. Емкостное сопротивление

Общее понятие

Переменное напряжение, приложенное к зажимам конденсатора, создает переменный ток заряда и разряда. Чем больше переменный ток — тем меньше противодействие конденсатора, т. е. меньше его емкостное сопротивление  $X_C$ . Емкостное сопротивление  $X_C$  так же, как активное  $R$  и индуктивное  $X_L$  сопротивления, измеряется в омах.

Подключим к цепи, состоящей из лампы, амперметра и конденсатора, различные источники (рис. 157).

В первом случае (рис. 157, а) лампа не горит и показание амперметра равно нулю. Значит, конденсатор не пропускает постоянный ток — включение его равносильно разрыву цепи. Во втором случае (рис. 157, б) лампа горит и амперметр отмечает наличие тока в цепи. В третьем случае (рис. 157, в) лампа горит еще ярче и показание амперметра резко возрастает. Значит, проводимость цепи увеличивается с повышением частоты питающего тока, т. е. сопротивление уменьшается.

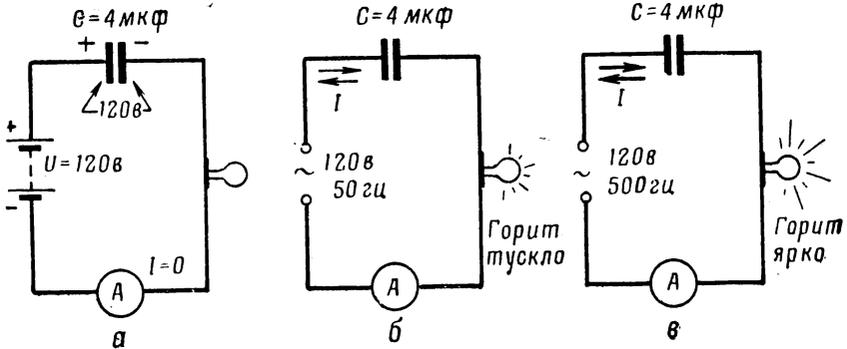


Рис. 157. Ток в емкостной цепи:

а — при постоянном напряжении лампа не горит; б — при переменном напряжении 120 в, 50 гц лампочка горит тускло; в — при переменном напряжении 120 в, 500 гц лампочка горит ярче

Итак, в отличие от цепи постоянного тока, где учитывается только активное сопротивление, в цепи переменного тока необходимо также учитывать сопротивления, оказываемые индуктивностью и емкостью.

Конденсаторы различной емкости вызывают в цепи разные токи заряда и разряда. Следовательно, конденсатор можно рассматривать как некоторое сопротивление переменному току. Физический смысл этого сопротивления заключается в том, что при заряде конденсатора между его обкладками появляется напряжение  $E_C$ , направленное навстречу напряжению  $U_3$  на зажимах источника и потому противодействующее ему.

Таким образом, конденсатор, включенный в цепь переменного тока, вносит в нее дополнительное сопротивление.

Переменный ток в цепи с конденсатором прямо пропорционален приложенному напряжению  $U_3$ , емкости конденсатора  $C$  и частоте переменного тока  $\omega$ :

$$I = \omega C U_3,$$

где  $C$  — емкость конденсатора в фарадах;  
 $U_3$  — приложенное напряжение в вольтах;  
 $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — частота переменного тока в герцах).

Из равенства  $I = \omega C U_3$  имеем

$$I = \frac{U_3}{\frac{1}{\omega C}}.$$

Эта формула представляет собой закон Ома для цепи переменного тока, в которую включен конденсатор.

Величина  $\frac{1}{\omega C}$  — емкостное сопротивление — для цепи переменного синусоидального тока определяется по формуле

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

Для простоты подсчета емкостного сопротивления постоянную величину  $\frac{1}{2\pi}$  можно принять равной приблизительно 0,16.

Тогда

$$X_C = \frac{0,16}{fC} \text{ (ом)}. \quad (55)$$

Из приведенной формулы следует, что, чем больше емкость конденсатора и частота переменного тока, тем меньше емкостное сопротивление. Другими словами, емкостное сопротивление цепи обратно пропорционально емкости конденсатора и частоте питающего тока.

Поэтому конденсатор часто используют в цепях переменного тока для того, чтобы создавать небольшое сопротивление для верхних частот и большое для нижних.

Обратите внимание, что емкостное сопротивление противоположно индуктивному, которое возрастает при более высоких частотах.

**Пример 71.** Определить емкостное сопротивление конденсаторов емкостью 0,1 и 1 мкф при частоте переменного тока 1000 гц.

**Решение.** По формуле (55)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{0,16}{fC} = \frac{0,16}{1000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,16 \cdot 10^6}{1000 \cdot 0,1} = \frac{160000}{100} = 1600 \text{ ом}.$$

Поскольку емкость второго конденсатора в 10 раз больше, чем первого, его сопротивление в 10 раз меньше, т. е. 160 ом.

**Пример 72.** Определить емкостное сопротивление конденсатора 100 нф при частотах 1 и 10 Мгц.

**Решение.** По формуле (55)

$$X_C = \frac{0,16}{fC} = \frac{0,16}{1 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = \frac{0,16 \cdot 10^6}{100} = 1600 \text{ ом}.$$

При частоте, большей в 10 раз, конденсатор той же емкости имеет емкостное сопротивление, в 10 раз меньшее, т. е. 160 ом.

Заметьте, что вследствие более высокой частоты во втором примере конденсатор меньшей емкости (100 нф) имеет такое

же емкостное сопротивление, как и конденсатор большей емкости (1 мкф) в первом примере.

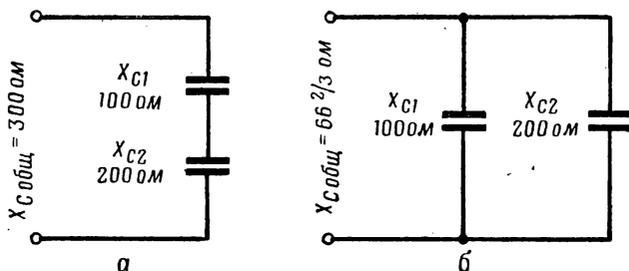
Из рассмотренных примеров видно, как резко уменьшается емкостное сопротивление конденсатора при повышении частоты.

**Пример 73.** При какой частоте конденсатор емкостью 0,1 мкф будет иметь емкостное сопротивление 1000 ом?

Решение. Из формулы (55)

$$f = \frac{0,16}{CX_C} = \frac{0,16}{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = \frac{0,16}{1 \cdot 10^{-4}} = 0,16 \cdot 10^4 = 1600 \text{ гц.}$$

Общее емкостное сопротивление цепи с последовательным или параллельным соединением конденсаторов определяется таким же образом, как и при соответствующем соединении резисторов.



**Рис. 158.** Емкостные сопротивления комбинируются подобно активным сопротивлениям:

*a* — при последовательном включении — складываются; *b* — при параллельном — равны произведению сопротивлений, деленном на их сумму

На рис. 158, *a* два конденсатора с емкостными сопротивлениями  $X_{C1} = 100 \text{ ом}$  и  $X_{C2} = 200 \text{ ом}$  включены последовательно. Их общее емкостное сопротивление равно 300 ом. Следовательно,

$$X_{C \text{ общ}} = X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{Cn}. \quad (56)$$

При параллельном соединении конденсаторов величина, обратная общему сопротивлению, равна сумме величин, обратных каждому отдельному сопротивлению:

$$\frac{1}{X_{C \text{ общ}}} = \frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}}, \quad (57)$$

откуда можно определить  $X_{C \text{ общ}}$ . Оно всегда меньше наименьшего из параллельно включенных сопротивлений.

В частности, для двух параллельно включенных конденсаторов с емкостными сопротивлениями (рис. 158, *b*) 100 и 200 ом общее емкостное сопротивление, подсчитанное по формуле (57), равно  $66\frac{2}{3} \text{ ом}$ .

Ток в цепи только с емкостным сопротивлением (активным сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем) равен приложенному напряжению, деленному на  $X_C$ :  $I = \frac{U}{X_C}$ . На рис. 159 приведены три примера. Для рис. 159, а ( $X_C = 100 \text{ ом}$ )  $I = \frac{U}{X_C} = \frac{100}{100} = 1 \text{ а}$ . Для рис. 159, б  $I = \frac{U}{X_{\text{Собщ}}} = \frac{100}{100 + 200} = \frac{100}{300} = \frac{1}{3} \text{ а}$ . Этот ток одинаков в обоих конденсаторах, а напряжение на зажимах каждого из них равно произведению тока на сопротивление. Для рис. 159, в каждая ветвь имеет свой ток, равный

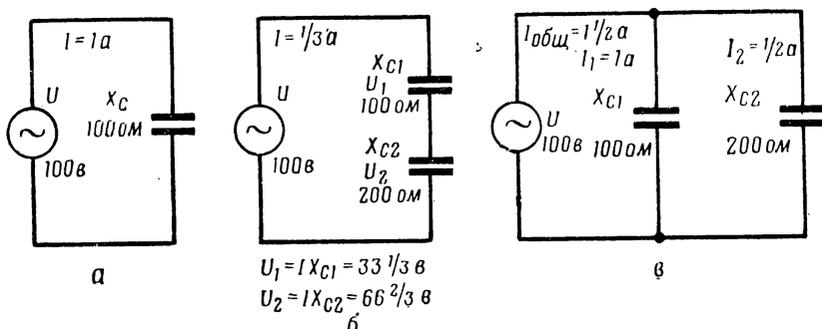


Рис. 159. Подсчеты в цепях с емкостным сопротивлением:

а — ток равен напряжению, деленному на сопротивление  $X_C$ ; б — сумма последовательных падений напряжений равна приложенному напряжению; в — сумма токов параллельных ветвей равна общему току цепи

приложенному напряжению, деленному на сопротивление ветви. Ток одной ветви равен  $1 \text{ а}$ , другой —  $1/2 \text{ а}$ , общий ток равен  $1 1/2 \text{ а}$ .

Главное назначение конденсаторов — блокировать (не пропускать) постоянный ток и создавать минимальное сопротивление переменному.

Конденсаторы емкостью от 2 до 100 мкф используют в цепях осветительных линий 50 гц. В диапазоне звуковых частот применяют конденсаторы емкостью от 0,001 до 1 мкф, в диапазоне высоких частот — от 1 до 1000 пф.

## 6. Емкостные делители напряжения

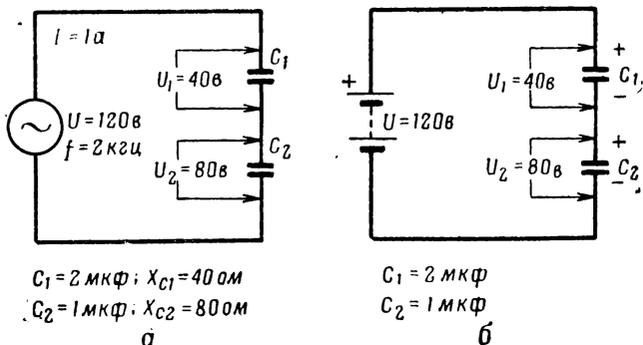
Последовательно соединенные конденсаторы, подключенные к источнику напряжения, служат делителем напряжения. На каждом конденсаторе происходит падение части приложенного напряжения, а сумма всех последовательных падений напряжений равна напряжению источника. Напряжение на зажимах каждого конденсатора обратно пропорционально емкости.

В схеме (рис. 160) включены последовательно два конденсатора:  $C_1 = 2 \text{ мкф}$  и  $C_2 = 1 \text{ мкф}$ . Конденсатор, емкость которого в два раза меньше, имеет в два раза большее напряжение. При

120 в приложенного напряжения 40 в падает на зажимах конденсатора  $C_1=2 \text{ мкф}$  и 80 в на зажимах конденсатора  $C_2=1 \text{ мкф}$ .

**Переменного тока** При синусоидальном переменном токе делитель напряжения из последовательно соединенных конденсаторов можно рассчитать исходя из емкостного сопротивления.

В схеме рис. 160, а конденсаторы с общим емкостным сопротивлением 120 ом подключены к источнику напряжения 120 в. В этом случае ток в последовательной цепи равен 1 а. Поэтому падение напряжения на конденсаторе  $C_1$  равно 40 в, а на  $C_2$  — 80 в. Таким образом, напряжение делится пропорционально



**Рис. 160.** Делитель напряжения из последовательно соединенных конденсаторов (приложенное напряжение делится обратно пропорционально емкостям):

а — для переменного тока; б — для постоянного тока

емкостным сопротивлениям. Однако емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости. В результате меньшая емкость имеет большее сопротивление, а следовательно, и большее падение напряжения.

**Постоянного тока** В схеме рис. 160, б оба конденсатора заряжены от батареи. Напряжение на их зажимах должно быть равно приложенному напряжению  $U$ , а величина заряда одинакова для каждого конденсатора, поскольку они включены последовательно. Так как разность потенциалов, создаваемая равными зарядами, обратно пропорциональна емкости конденсатора из формулы (50), то конденсатор  $C_2=1 \text{ мкф}$  имеет напряжение, в два раза большее, чем конденсатор  $C_1=2 \text{ мкф}$ .

Если измерить вольтметром постоянного тока напряжение на зажимах конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , то прибор покажет соответственно 40 и 80 в. Если прибор подключить между плюсовой пластиной конденсатора  $C_2$  и минусовой —  $C_1$ , то его показания будут равны нулю. Эти пластины имеют один и тот же потенциал, так как они соединены проводником, сопротивление кото-

рого практически равно нулю. Знак плюс или минус в точке соединения  $C_1$  и  $C_2$  показывает полярность напряжения в этой точке по отношению к противоположной пластине конденсатора. Соединение имеет положительный потенциал относительно противоположной пластины конденсатора  $C_2$ , где имеется избыток электронов, и отрицательный потенциал относительно противоположной пластины конденсатора  $C_1$ , которая имеет недостаток электронов.

## 7. Постоянная времени $RC$

Формула емкостного сопротивления выведена для переменного тока синусоидальной формы. При несинусоидальном изменении напряжения, например при включении или выключении источника постоянного тока (рис. 161),

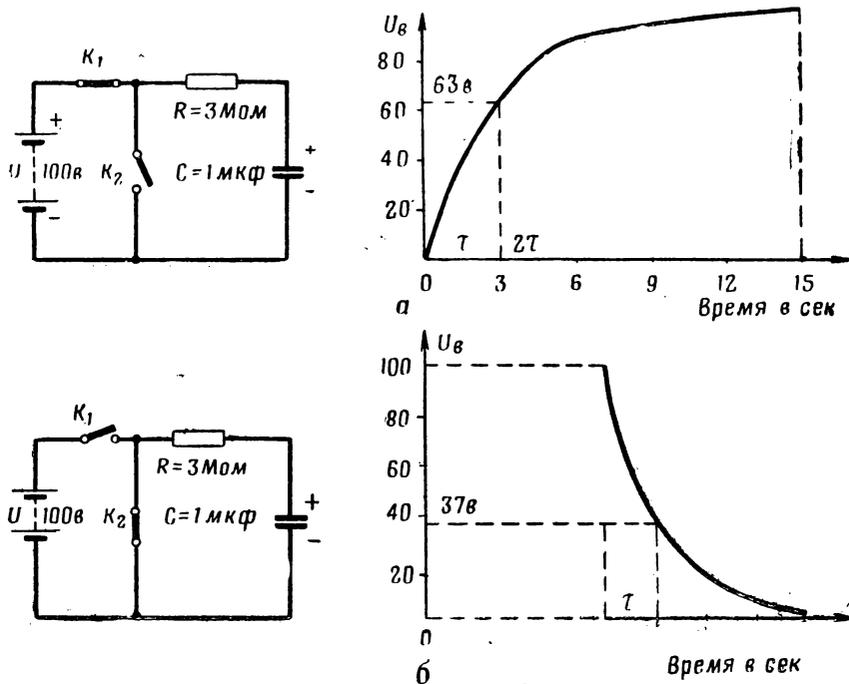


Рис. 161. Постоянная времени заряда и разряда конденсатора:  
 а — конденсатор заряжается через  $R$  до 63% приложенного напряжения за  $\tau = 3 \text{ сек}$ ;  
 б — конденсатор разряжается через  $R$  до 37% его первоначального напряжения за  $\tau = 3 \text{ сек}$

роль  $X_C$  в цепи иная. Когда выключатель  $K_1$  замыкается (рис. 161, а), приложенное напряжение возрастает мгновенно от 0 до 100 в. Если выключатель  $K_1$  разомкнуть, а выключатель  $K_2$  замкнуть, напряжение снизится со 100 в до 0 (рис. 161, б). Влияние цепи, состоящей из конденсатора и рези-

стора, во время возрастания или спада напряжения характеризуется постоянной времени (означает противодействие цепи мгновенному увеличению или уменьшению приложенного напряжения).

**Формула постоянной времени** Скорость нарастания напряжения измеряется величиной произведения  $RC$ , которое выражает постоянную времени емкостной цепи:

$$\tau = RC, \quad (58)$$

где  $\tau$  — время в секундах;  
 $R$  — сопротивление в омах;  
 $C$  — емкость в фарадах.

Легко убедиться, что произведение  $RC$  имеет размерность времени. Из формулы (50)

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{It}{IR},$$

следовательно,

$$RC = \frac{RQ}{U} = \frac{RIt}{IR} = T.$$

На практике сопротивление в цепях часто измеряется в мегомах, тогда емкость следует измерять в микрофарадах. Например, для цепи, изображенной на рис. 161,

$$\tau = RC = 3 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 3 \text{ сек}$$

(множители  $10^6$  для перевода мегомов в омы и  $10^{-6}$  для перевода микрофарады в фарады сокращаются).

Резистор нужно включать последовательно с конденсатором. Только в этом случае произведение  $RC$  выражает постоянную времени.

**Постоянная времени  $RC$ -цепи характеризует степень заряда и разряда конденсатора.** При заряде  $\tau$  показывает время, необходимое для того, чтобы конденсатор зарядился до 63% приложенного напряжения. При разряде  $\tau$  показывает время, в течение которого конденсатор успевает разрядиться до 37% первоначального напряжения на его зажимах.

Для цепи рис. 161, а постоянная времени  $\tau = 3$  сек. За это время конденсатор заряжается до 63%, что от 100 в составит 63 в. Практически конденсатор полностью зарядится до приложенного напряжения 100 в за время  $5\tau$  (15 сек). При разряде этого конденсатора напряжение его упадет до 37 в за 3 сек. После  $5\tau$  конденсатор практически полностью разрядится.

Чем меньше постоянная времени, тем быстрее происходит заряд и разряд конденсатора. Если для схемы рис. 161 постоянная времени составит 1 сек, то конденсатор будет заряжаться до 63 в за 1 сек вместо 3 сек и полностью зарядится до приложенного напряжения 100 в за 5 сек вместо 15 сек. Быстрее будет происходить и разряд конденсатора.

Приведем несколько примеров применения формулы для постоянной времени для  $RC$ -цепей.

**Пример 74.** Конденсатор  $C = 0,01$  мкф включен последовательно с сопротивлением  $R = 1$  Мом. Определить постоянную времени.

**Решение.** По формуле (58)

$$\tau = RC = 1 \text{ Мом} \cdot 0,01 \text{ мкф} = 0,01 \text{ сек.}$$

Эта величина справедлива для заряда и разряда конденсатора, если последовательное сопротивление одно и то же в том и другом случае.

**Пример 75.** При постоянном напряжении 300 в, приложенном к той же цепи, определить напряжение на зажимах конденсатора через 0,01 сек после включения.

**Решение.** Так как  $0,01 \text{ сек} = 1 \tau$ , напряжение на зажимах конденсатора через 0,01 сек составит 63% от 300 в, т. е. 189 в. После  $5 \tau = 0,05 \text{ сек}$  конденсатор практически зарядится до приложенного напряжения 300 в.

**Пример 76.** Конденсатор той же цепи заряжен до 300 в. Определить напряжение на конденсаторе через 0,01 сек с момента начала разряда.

**Решение.** За время  $1 \tau$  конденсатор разрядится до 37% своего первоначального напряжения, что составит  $0,37 \cdot 300 = 111 \text{ в}$ .

**Пример 77.** Если в ту же цепь добавить последовательное сопротивление, равное 1 Мом, то какой будет постоянная времени?

**Решение.** Теперь последовательно с конденсатором включено сопротивление 2 Мом. Поэтому

$$\tau = RC = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ сек.}$$

Постоянная времени  $RC$ -цепи возрастает при увеличении сопротивления и емкости конденсатора. Большая емкость означает, что конденсатор может накопить больший заряд. Чем больше сопротивление (при одинаковом приложенном напряжении), тем меньше ток заряда, тем больше требуется времени для заряда и разряда конденсатора.

**Кривые заряда и разряда** На рис. 161, а изображена кривая заряда  $RC$ -цепи. Вначале заряд происходит быстро, затем кривая возрастает медленно. Это объясняется тем, что по мере заряда конденсатора разница между приложенным напряжением  $U$  и напряжением на конденсаторе  $U_c$  уменьшается. Меньшая разность потенциалов вызывает меньший ток, который идет для заряда конденсатора. Чем больше степень заряда конденсатора, тем медленнее он заряжается.

Подобным же образом при разряде конденсатор (рис. 161, б) теряет свой заряд вначале быстро, а затем все медленнее и медленнее. Кривая, характеризующая изменение такого вида: быстрое вначале и замедленное в конце, называется экспоненциальной кривой.

## 8. Энергия электрического поля конденсатора

В диэлектрике заряженного конденсатора запасается энергия в виде электрического поля. Эта запасенная энергия может вызвать ток разряда конденсатора при отключении источника напряжения и замыкании его обкладок через внешнюю цепь.

Величина запасенной электрической энергии равна

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \text{ (дж)}, \quad (59)$$

где  $C$  — емкость в фарадах;

$U$  — напряжение в вольтах.

## 9. Конденсаторы связи для низких и радиочастот

В цепи (рис. 162) показан конденсатор связи. Так как емкостное сопротивление невелико, практически все переменное напряжение генератора падает на зажимах резистора и лишь небольшая часть его — на зажимах конденсатора. Конденсатор связи рассчитан на определенную полосу частот. При более низких частотах он представляет для цепи большое емкостное сопро-

тивление, в результате чего небольшое напряжение падает на резисторе  $R$  и почти все напряжение — на зажимах конденсатора  $C$ . При постоянном токе все напряжение падает на зажимах конденсатора, а на резисторе напряжения нет, поскольку конденсатор блокирует постоянный ток.

Необходимое условие для создания падения напряжения на резисторе, а не на конденсаторе — чтобы емкостное сопротивление было примерно в десять раз меньше активного. Тогда практически все напряжение переменного тока будет падать на зажимах резистора  $R$  и очень малая его часть — на конденсаторе.

Типичные емкости конденсаторов связи для низких и радиочастот можно подсчитать исходя из сопротивления последовательно подключенного резистора порядка 160 ком. Тогда  $X_C$  должно быть приблизительно 16 ком или меньше.

При частоте 100 гц конденсатор связи должен иметь емкость приблизительно 0,1 мкф, чтобы емкостное сопротивление равнялось 16 ком. При более высоких частотах допускается меньшая емкость. Например, при 100 Мгц достаточна емкость 0,1 пф.

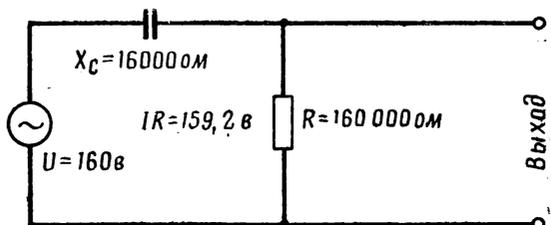


Рис. 162. Цепь связи из  $R$  и  $C$  (небольшая величина емкостного сопротивления  $X_C$  позволяет практически всему приложенному напряжению действовать на зажимах резистора)

Емкость конденсатора связи подсчитывают для нижней частоты. При более высоких частотах тот же конденсатор будет иметь емкостное сопротивление меньше  $1/10 R$ , т. е. выполнение условия связи гарантируется с запасом.

### Краткие выводы

1. Конденсатор состоит из двух проводящих пластин, разделенных диэлектриком (изолятором). Способность конденсатора накапливать заряд определяется его емкостью  $C$ . Когда напряжение прикладывается к конденсатору, он заряжается; при подключении к нагрузке конденсатор разряжается.

2. Единицей измерения емкости служит фарада. Конденсатор имеет емкость 1 ф, если увеличение его заряда на 1 к вызывает увеличение напряжения на 1 в. Конденсаторы, используемые на практике, имеют емкости от 1 пф до 1000 мкф.  $1 \text{ пф} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ ф}$ ;  $1 \text{ мкф} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ф}$ .

3. Емкость конденсатора прямо пропорциональна его заряду и обратно пропорциональна разности потенциалов на его зажимах:

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

где  $C$  — емкость в фарадах;

$Q$  — заряд в кулонах;

$U$  — разность потенциалов в вольтах.

4. Емкость конденсатора возрастает при увеличении площади пластин и электрической проницаемости и при уменьшении толщины диэлектрика.

5. Наиболее распространены бумажные, воздушные, слюдяные, керамические и электролитические конденсаторы. Электролитические конденсаторы используются для цепей постоянного тока.

6. Общая емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме их емкостей:

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

7. Величина, обратная общей емкости последовательно соединенных конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

откуда определяется общая емкость конденсаторов при последовательном соединении.

Последовательное соединение конденсаторов уменьшает общую емкость батареи.

8. При проверке конденсатора омметром в случае исправности конденсатора стрелка прибора после быстрого отклонения по шкале в сторону низкого сопротивления медленно устанавливается на величину сопротивления изоляции конденсатора. Все конденсаторы, кроме электролитических, нормально имеют очень высокое сопротивление изоляции — от 500 до 1000 *Мом*. У электролитических конденсаторов небольшое сопротивление изоляции — около 0,5 *Мом*.

9. Емкостное сопротивление  $X_C$  *ом* представляет собой противодействие конденсатора синусоидальному переменному току, ограничивая ток до величины  $I = \frac{U}{X_C}$ .

Величина  $X_C$  уменьшается с повышением частоты и с увеличением емкости (обратно пропорциональна частоте и емкости):

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

10. Общее емкостное сопротивление при последовательном соединении конденсаторов равно сумме их сопротивлений.

Ток в них один и тот же, а напряжение на зажимах каждого равно  $IX_C$ .

11. При параллельном включении конденсаторов общее емкостное сопротивление подсчитывают из формулы

$$\frac{1}{X_{C \text{ общ}}} = \frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \dots + \frac{1}{X_{Cn}}.$$

Ток в каждой ветви равен  $\frac{U}{X_C}$ , а общий ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов отдельных ветвей.

12. Емкостное сопротивление практически используют для блокировки постоянного тока и создания небольшого реактивного сопротивления переменному току.

13. Сравнение индуктивного  $X_L$  и емкостного  $X_C$  сопротивлений:

$X_L$	$X_C$
Возрастает при увеличении индуктивности	Уменьшается при увеличении емкости
Увеличивается при повышении частоты	Уменьшается при повышении частоты
При низких частотах сопротивление малое, ток большой	При низких частотах сопротивление большое, ток малый
Катушка индуктивности пропускает постоянный ток	Конденсатор блокирует постоянный ток

14. Два или несколько конденсаторов, подключенных последовательно к зажимам источника напряжения  $U$ , используются как делитель напряжения. Напряжение  $U$  делится обратно пропорционально емкости каждого конденсатора. На конденсатор с наименьшей емкостью приходится наибольшая часть приложенного напряжения.

15. Емкостное сопротивление  $X_C$  конденсатора связи в 10 раз и более меньше активного сопротивления  $R$  последовательно включенного резистора. Практически все переменное напряжение оказывается приложенным к концам резистора и лишь небольшая его часть — к концам конденсатора.

16. Скорость нарастания амплитуды напряжения в цепи, состоящей из резистора и конденсатора, при несинусоидальном режиме определяется постоянной времени  $\tau$ , равной произведению  $RC$ . При  $C$  — в фарадах и  $R$  — в омах время  $\tau$  выражается в секундах. Величина  $\tau$ , равная единице, показывает время, не-

обходимое для того, чтобы напряжение на зажимах конденсатора достигло 63% приложенного напряжения.

17. Энергия, запасенная в конденсаторе, равна  $\frac{1}{2} CU^2$ . При  $C$  в фарадах и  $U$  в вольтах энергия выражается в джоулях.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

### I

1. Емкость конденсатора 0,02 мкф равнозначна емкости:  
а —  $0,02 \cdot 10^{-12}$  ф; б —  $0,02 \cdot 10^{-6}$  ф; в —  $0,02 \cdot 10^6$  ф; г —  $200 \cdot 10^{-12}$  ф.
2. Конденсатор емкостью 10 мкф, заряженный до 10 в, имеет заряд, равный:  
а —  $10 \cdot 10^{-6}$  к; б —  $100 \cdot 10^{-6}$  к; в — 10 к; г — 100 к.
3. Емкость конденсатора увеличивается при:  
а — увеличении площади пластин и расстояния между ними; б — уменьшении площади пластин и расстояния между ними; в — увеличении площади пластин и уменьшении расстояния между ними; г — увеличении приложенного напряжения.
4. Напряжение, приложенное к керамическому диэлектрику, создает электростатическое поле, в 100 раз большее, чем в воздухе. Электрическая проницаемость  $\epsilon$  керамики равна:  
а —  $33\frac{1}{3}$ ; б — 50; в — 100; г — 10000.
5. Два последовательно соединенных конденсатора по 0,02 мкф, 500 в имеют общую емкость и номинальное пробивное напряжение:  
а — 0,01 мкф, 500 в; б — 0,01 мкф, 1000 в; в — 0,02 мкф, 500 в; г — 0,04 мкф, 500 в.
6. Два параллельно соединенных конденсатора по 0,02 мкф, 500 в имеют общую емкость и номинальное пробивное напряжение:  
а — 0,01 мкф, 1000 в; б — 0,02 мкф, 500 в; в — 0,04 мкф, 500 в; г — 0,04 мкф, 1000 в.
7. При проверке исправного бумажного конденсатора емкостью 0,05 мкф стрелка омметра должна:  
а — быстро отклониться приблизительно к 100 ом и остаться в этом положении; б — мгновенно показать небольшое сопротивление и возвратиться к очень высокому сопротивлению; в — мгновенно показать большое сопротивление и возвратиться к очень низкому; г — остаться неподвижной.
8. При повышении частоты емкостное сопротивление:  
а — увеличивается; б — остается без изменения; в — уменьшается; г — возрастает, когда увеличивается напряжение.
9. При одной и той же частоте, если емкость увеличивается, то емкостное сопротивление:  
а — возрастает; б — остается без изменения; в — уменьшается; г — уменьшается при условии уменьшения приложенного напряжения.
10. Емкостное сопротивление конденсатора 0,1 мкф при частоте 1000 гц равно:  
а — 1000 ом; б — 1600 ом; в — 2000 ом; г — 3200 ом.
11. Два емкостных сопротивления по 1000 ом каждое, включенных последовательно, имеют общее сопротивление:  
а — 500 ом; б — 1000 ом; в — 1414 ом; г — 2000 ом.
12. Два емкостных сопротивления по 1000 ом каждое, включенных параллельно, имеют общее сопротивление:  
а — 500 ом; б — 707 ом; в — 1000 ом; г — 2000 ом.

13. Чтобы получить емкостное сопротивление  $1000 \text{ ом}$  при частоте  $2 \text{ Мгц}$ , емкость конденсатора должна быть равна:  
 а —  $2 \text{ нф}$ ; б —  $80 \text{ нф}$ ; в —  $1000 \text{ нф}$ ; г —  $2000 \text{ нф}$ .
14. Конденсатор емкостью  $0,2 \text{ мкф}$  имеет емкостное сопротивление  $1000 \text{ ом}$  при частоте:  
 а —  $800 \text{ гц}$ ; б —  $1 \text{ кгц}$ ; в —  $1 \text{ Мгц}$ ; г —  $8 \text{ Мгц}$ .
15. Конденсатор емкостью  $250 \text{ нф}$  последовательно с резистором  $1 \text{ Мом}$  подключается к батарее  $100 \text{ в}$ . Напряжение равно  $63 \text{ в}$  на зажимах:  
 а — конденсатора через  $250 \text{ мксек}$ ; б — сопротивления через  $250 \text{ мксек}$ ;  
 в — конденсатора через  $1250 \text{ мксек}$ ; г — сопротивления через  $1250 \text{ мксек}$ .
16. Напряжение  $120 \text{ в}$  подведено к трем последовательно включенным конденсаторам по  $5 \text{ мкф}$  каждый. Напряжение на зажимах каждого конденсатора равно:  
 а —  $5 \text{ в}$ ; б —  $40 \text{ в}$ ; в —  $600 \text{ в}$ ; г —  $80 \text{ в}$ .
17. Конденсатор емкостью  $1 \text{ мкф}$ , заряженный до напряжения  $2000 \text{ в}$ , имеет запасенную энергию:  
 а —  $1 \text{ дж}$ ; б —  $2 \text{ дж}$ ; в —  $4 \text{ дж}$ ; г —  $2000 \text{ дж}$ .

## II

Ответьте, правильны или неправильны и почему следующие положения:

- Конденсатор может накапливать заряд, так как он имеет диэлектрик между двумя проводящими пластинами.
- Чтобы получить данную величину заряда, на зажимах конденсатора меньшей емкости должна быть большая разность потенциалов.
- Емкость  $250 \text{ нф}$  равна  $250 \cdot 10^{-12} \text{ ф}$ .
- Чем тоньше диэлектрик, тем больше емкость конденсатора и ниже его пробивное напряжение.
- Чем больше площадь пластин, тем больше емкость конденсатора.
- Последовательно соединенные конденсаторы имеют меньшую емкость, но пробивное напряжение всей цепи увеличивается.
- Параллельно соединенные конденсаторы увеличивают общую емкость при том же номинальном напряжении.
- Два конденсатора по  $0,01 \text{ мкф}$ , соединенные параллельно, имеют общую емкость  $0,005 \text{ мкф}$ .
- При исправном бумажном конденсаторе емкостью  $0,01 \text{ мкф}$  стрелка омметра отклоняется в сторону низкого сопротивления, а затем останавливается на показании  $500 \text{ Мом}$  или больше.
- Если емкость конденсатора увеличивается в два раза, то емкостное сопротивление в два раза уменьшается.
- Если частота удваивается, то емкостное сопротивление в два раза уменьшается.
- Емкостное сопротивление конденсатора  $0,1 \text{ мкф}$  при частоте  $60 \text{ гц}$  равно приблизительно  $60 \text{ ом}$ .
- Индуктивное и емкостное сопротивления изменяются при изменении частоты, а индуктивность и емкость — нет.
- Постоянная времени  $RC$ -цепи возрастает при увеличении емкости и сопротивления.
- Когда постоянная времени  $RC$  подсчитывается для разряда, то  $R$  должно быть сопротивлением в цепи разрядного тока.
- Активное и реактивное сопротивления измеряются в омах.
- Индуктивное и емкостное сопротивления измеряются в омах.
- При приложенном напряжении  $100 \text{ в}$  конденсатор  $1 \text{ мкф}$ , включенный последовательно с резистором  $1 \text{ Мом}$ , в течение  $1 \text{ сек}$  зарядится до  $63 \text{ в}$ .

19. Конденсатор емкостью 1 мкф, заряженный до напряжения 2000 в, имеет запасенную энергию 1 Дж.

20. Конденсатор, заряженный до 100 в, в течение одной постоянной времени разрядится до 37 в.

21. Когда приложенное напряжение увеличивается, то в цепи протекает ток заряда, поскольку конденсатор принимает дополнительный заряд.

22. Когда приложенное напряжение уменьшается, происходит разряд конденсатора, так как он имеет более высокую разность потенциалов, чем источник.

23. Конденсаторы, включенные последовательно, имеют один и тот же ток заряда и разряда.

24. Конденсаторы, включенные параллельно, имеют одно и то же напряжение.

25. Чем больше емкостное сопротивление в последовательной цепи, тем большее падение напряжения приходится на конденсатор по сравнению с резистором.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Что такое емкость? Когда две пластины образуют конденсатор?

2. Как зарядить конденсатор?

3. Преобразуйте следующие величины в фарады, используя степень 10: 50 пф, 0,001 мкф, 0,047 мкф, 0,01 мкф, 10 мкф.

4. Как влияют на емкость увеличение площади пластин и электрической проницаемости и уменьшение толщины диэлектрика?

5. Какой тип конденсатора целесообразно использовать в следующих цепях?

а — 80 мкф для цепи постоянного тока напряжением менее 500 в; б — 1,5 пф в радиочастотной цепи при напряжении менее 500 в; в — 0,05 мкф в цепи звуковой частоты при напряжении менее 500 в.

6. Нарисуйте схему с наименьшим количеством конденсаторов 400 в, 2 мкф, чтобы их можно было включить в цепь напряжением 800 в, когда требуется общая емкость 2 мкф.

7. Если конденсатор, заряженный до 500 в, подсоединить к незаряженному конденсатору той же емкости, то напряжение на их зажимах будет 250 в. Почему?

8. Как проверить омметром исправность конденсатора емкостью 0,05 мкф? Укажите показания омметра для случаев, когда конденсатор исправен, замкнут накоротко и разорван.

9. Почему емкостное сопротивление уменьшается при увеличении емкости?

10. Почему конденсатор блокирует постоянный ток?

11. Какая требуется емкость для получения емкостного сопротивления 100 ом при частоте 100 кгц?

12. Конденсатор, подключенный к источнику 10 в, 1000 кгц, имеет емкостное сопротивление 2000 ом.

а) Нарисуйте схему. б) Какова величина тока в цепи? в) Какова частота тока?

13. Какова емкость конденсатора, через который протекает ток 0,1 а при 120 в и 50 гц приложенного напряжения?

14. Два конденсатора с емкостными сопротивлениями  $X_{C1}=1000$  ом и  $X_{C2}=4000$  ом, соединенные последовательно, подключены к источнику напряжения 10 в.

а) Нарисуйте схему соединения. б) Подсчитайте ток в последовательной цепи. в) Определите падение напряжения на каждом конденсаторе.

15. Два конденсатора с емкостными сопротивлениями  $X_{C1}=1000$  ом и  $X_{C2}=4000$  ом, соединенные параллельно, подключены к источнику напряжения 10 в.

а) Нарисуйте схему соединения. б) Подсчитайте ток в каждой ветви. в) Подсчитайте общий ток в неразветвленной части цепи. г) Каково напряжение на зажимах каждого конденсатора?

16. Почему конденсатор заряжается, когда приложенное напряжение увеличивается и разряжается, когда оно уменьшается?

17. Два конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ , соединенные последовательно, подключены к источнику напряжения 10000 в. Конденсатор  $C_1$  емкостью 900 пф имеет напряжение на зажимах 9000 в.

а) Каково напряжение на зажимах конденсатора  $C_2$ ? б) Какова емкость конденсатора  $C_2$ ?

18. Емкостное сопротивление конденсатора  $X_C=100$  ом. Какова его емкость при частотах 50 гц, 1000 гц и 1 Мгц?

19. Подсчитайте постоянную времени цепи следующих комбинаций:

а)  $R=1$  Мом,  $C=0,001$  мкф; б)  $R=1000$  ом,  $C=1$  мкф; в)  $R=250$  ком,  $C=0,05$  мкф; г)  $R=10$  ком,  $C=100$  пф.



В цепях переменного тока синусоидальной формы сила тока зависит от общего сопротивления. Последнее может состоять из активного  $R$  (резистора), индуктивного  $X_L$  (катушки индуктивности) и емкостного  $X_C$  (конденсатора) сопротивлений, одного из них или их комбинации.

### 1. Цепи с резисторами

В цепи переменного тока с одним активным сопротивлением (рис. 163) напряжение и ток совпадают по фазе (рис. 164, а). Векторная диаграмма приведена на рис. 164, б.

Закон Ома для действующих значений напряжения и тока выразится такой же формулой, как и для постоянного тока:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \text{ или } I = \frac{U}{R}.$$

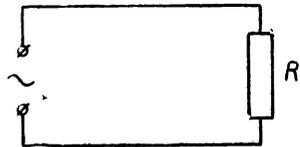


Рис. 163. Цепь переменного тока с одним активным сопротивлением

Мощность в цепи определяется не по мгновенным значениям, а по среднему значению за период:

$$P_{cp} = UI = I^2R.$$

**Пример 78.** Средняя мощность, потребляемая в активном сопротивлении потребителя,  $P_{cp}=1200$  вт, а действующее значение тока  $I=2,5$  а. Определить активное сопротивление потребителя.

Решение.

$$R = \frac{P_{cp}}{I^2} = \frac{1200}{2,5^2} = \frac{1200}{6,25} = 192 \text{ ом.}$$

**Пример 79.** К цепи с активным сопротивлением  $R=30$  ом приложено переменное напряжение, амплитудное значение которого  $U_m=169,2$  в, а круговая частота  $\omega=314$ . Определить действующие значения тока и на-

пряжения, среднюю мощность и энергию, расходуемые в цепи за период, а также частоту и период переменного тока.

Решение. Действующее напряжение по формуле (31)

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{169,2}{1,41} = 120 \text{ в.}$$

Действующее значение тока по формуле

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{30} = 4 \text{ а.}$$

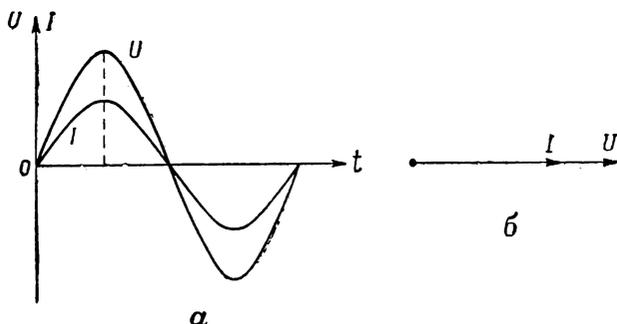


Рис. 164. Графическое изображение тока и напряжения, совпадающих по фазе

Средняя мощность, расходуемая в цепи (индекс «ср» обычно не пишется), по формуле (14)

$$P = UI = 120 \cdot 4 = 480 \text{ вт.}$$

Частота переменного тока

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \cdot 3,14} = 50 \text{ гц.}$$

Период по формуле (28)

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ сек.}$$

Энергия, расходуемая в цепи за период, по формуле (13)

$$W = PT = 480 \cdot 0,02 = 9,6 \text{ дж.}$$

Комбинации последовательного и параллельного соединений резисторов показаны на рис. 165. В обоих случаях все напряжения и токи находятся в одной фазе с приложенным напряжением.

На рис. 165, а два резистора  $R_1$  и  $R_2$  по 60 ом соединены последовательно, ток при напряжении источника 120 в равен 1 а. Падение напряжения на каждом сопротивлении составит 60 в.

Таким образом, последовательно включенные резисторы играют роль делителя напряжения.

При параллельном включении резисторов (рис. 165, б) оба они находятся под напряжением 120 в и ток в каждой ветви равен 2 а. Общий ток 4 а, что соответствует сопротивлению 30 ом для двух ветвей.

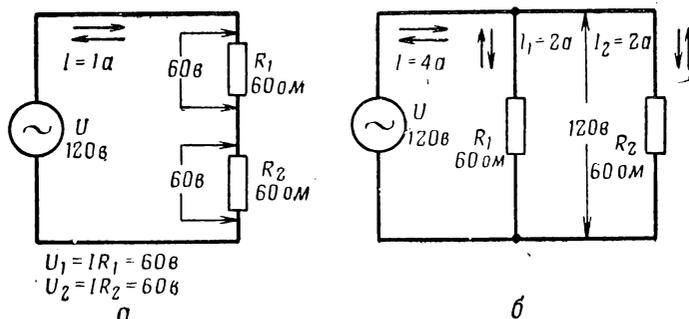


Рис. 165. Цепи переменного тока с активными сопротивлениями:

а — последовательное включение; б — параллельное

## 2. Цепь с катушкой индуктивности

Ток и напряжение на индуктивности

Ток и э. д. с. самоиндукции в цепи (рис. 166, а) сдвинуты по фазе. Наибольшей величины э. д. с. самоиндукции достигает в моменты прохождения тока через нулевые значения (рис. 166, б), так как в это время происходит наиболее резкое изменение магнитного потока. При амплитуд-

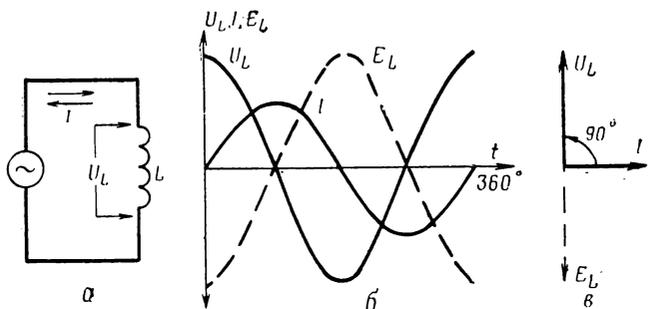


Рис. 166. Ток в катушке индуктивности отстает на  $90^\circ$  во времени от напряжения, приложенного к зажимам катушки:

а — схема; б — графическое изображение напряжений и тока; в — векторная диаграмма фазовых соотношений

ных значениях тока э. д. с. самоиндукции равна нулю (в эти моменты времени поток не изменяется).

Направление э. д. с. самоиндукции  $E_L$  согласно правилу Ленца таково, что она всегда препятствует причине, ее вызы-

вающей, т. е. противодействует изменениям тока. А так как переменный ток появляется в цепи вследствие того, что к ее зажимам приложено переменное напряжение  $U_L$ , то  $E_L$  будет противодействовать этому напряжению.

В первой четверти периода, когда ток нарастает от нуля до наибольшего положительного значения, э. д. с. самоиндукции, препятствуя увеличению тока, изменяется от наибольшего отрицательного значения до нуля. Во второй четверти периода ток уменьшается и э. д. с. самоиндукции, пройдя нулевое значение, станет положительной — она будет препятствовать убыванию тока (поддерживая ток в цепи).

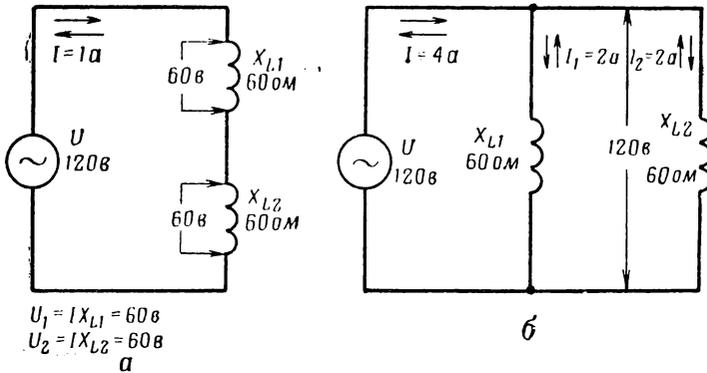


Рис. 167. Цепи переменного тока с индуктивными сопротивлениями:

а — последовательное включение; б — параллельное

Э. д. с. самоиндукции  $E_L$  отстает по фазе от тока  $I$  на  $90^\circ$  (четверть периода).

На рис. 166, в приведена векторная диаграмма. Отложим вектор тока  $I$  по горизонтальной линии. Поскольку э. д. с. самоиндукции  $E_L$  отстает на  $90^\circ$  от тока  $I$ , вектор  $E_L$  надо откладывать под углом  $90^\circ$  в сторону отставания (по часовой стрелке), т. е. вниз. Поскольку напряжение на зажимах  $U_L$  преодолевает напряжение  $E_L$ , вектор  $U_L$ , равный по величине вектору  $E_L$ , будет направлен вверх.

Ток в цепи с чисто индуктивным сопротивлением отстает от приложенного напряжения на  $90^\circ$  (на четверть периода) или напряжение опережает ток на  $90^\circ$ . Другими словами, сдвиг фаз между током и приложенным напряжением равен  $90^\circ$ .

Таким образом, индуктивность катушки, во-первых, вносит дополнительное реактивное сопротивление в цепь переменного тока, а во-вторых, вызывает сдвиг фаз между током в цепи и приложенным напряжением.

Индуктивное сопротивление иногда называют безваттным, потому что энергия источника тока расходуется на создание

только э. д. с. самоиндукции, т. е. превращается в энергию магнитного поля. Происходит попеременный обмен энергией между источником тока и магнитным полем катушки.

Напряжение на зажимах генератора и катушки одно и то же. Между этими двумя напряжениями никакого отставания или опережения по фазе быть не может. Оба они сдвинуты по фазе на  $90^\circ$  по отношению к общему току  $I$ .

В схеме рис. 167 индуктивное сопротивление равно активному сопротивлению рис. 165. Так как в этом случае нет  $R$  и  $X_C$ , сопротивления  $X_L$  цепи можно складывать непосредственно.

В схеме рис. 167, а сумма сопротивлений  $X_L$  двух последовательно соединенных катушек индуктивности составляет 120 ом. Ток равен 1 а. Падение напряжения на каждой катушке 60 в. В схеме рис. 167, б в каждой параллельной ветви протекает ток 2 а при 120 в приложенного напряжения. Общий ток составляет 4 а. Ток через катушку с сопротивлением  $X_L$  отстает от напряжения на катушке на  $90^\circ$ .

### 3. Цепь с последовательно соединенными катушкой и резистором

Цепь переменного тока с одним индуктивным сопротивлением практически получить очень трудно; в цепи всегда имеет-

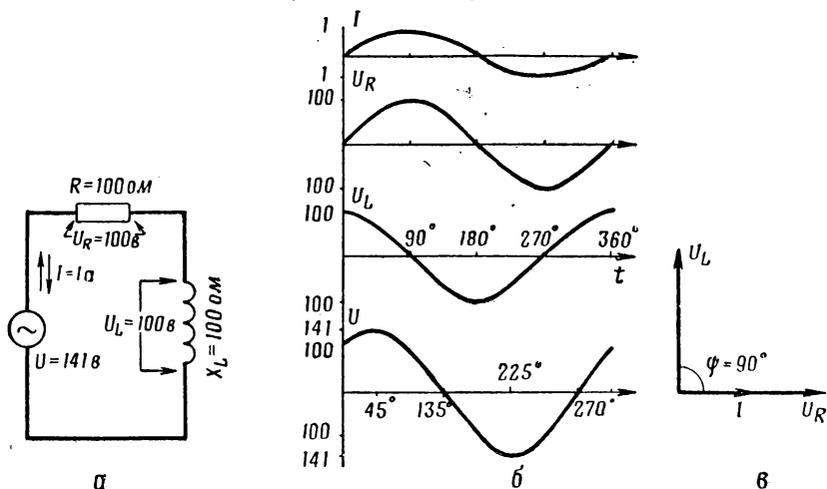


Рис. 168. Цепь с  $X_L$  и  $R$ , включенными последовательно:

а — схема; б — графическое изображение тока и напряжений; в — векторная диаграмма фазовых соотношений

ся и активное сопротивление (если нет специально включенного, то сопротивление катушки и соединительных проводов).

Когда в цепь последовательно включены катушка и резистор (рис. 168, а), ток в цепи один и тот же и ограничивается

он индуктивным  $X_L$  и активным  $R$  сопротивлениями. Падение напряжения на резисторе равно  $IR$ , на катушке —  $IX_L$ .

Падение напряжения на катушке  $U_L$  опережает ток  $I$  на  $90^\circ$ , а на резисторе  $U_R$  совпадает по фазе с током  $I$ .

Ток и напряжение могут измеряться в действующем (среднеквадратичном), амплитудном или мгновенном значении. Для удобства сравнения амплитуд мы будем измерять их в амплитудных значениях.

$U_R$  отстает  
от  $U_L$  на  $90^\circ$

Падение напряжения  $U_R$  совпадает по фазе с током, а поскольку ток отстает по фазе от падения напряжения  $U_L$  на  $90^\circ$ , такое же отставание по фазе имеет и напряжение  $U_R$ .

Ввиду того что в катушке и резисторе в последовательной цепи протекает одинаковый ток, его и берут за исходную величину (за начало отсчета) для определения фазовых соотношений (рис. 168, в).

Сложение напряжений  
 $U_R$  и  $U_L$

В результате сложения двух напряжений  $U_R$  и  $U_L$  (рис. 168, б) получается величина приложенного напряжения  $U$  генератора. Два амплитудных значения  $U_R$  и  $U_L$ , каж-

дое по  $100$  в, в сумме дают амплитудную величину  $141$  в вместо  $200$  в из-за сдвига по фазе на  $90^\circ$ . Например, когда  $U_R=100$  в, то  $U_L=0$  и, следовательно,  $U=100$  в. То же самое, когда  $U_L=100$  в, а  $U_R=0$ , то  $U=100$  в. Величина  $U$  максимальна ( $141$  в) при условии, что каждое напряжение  $U_R$  и  $U_L$  равно  $70,7$  в.

При наличии разности фаз между двумя последовательными падениями напряжений **складывать их арифметически нельзя.**

Построим полную векторную диаграмму **Векторная диаграмма** (рис. 169) для цепи с  $X_L$  и  $R$ .

Основное назначение векторной диаграммы — установить связь между током в цепи и напряжением на ее зажимах.

Отложим вектор тока  $I$  по горизонтали, тогда вектор э. д. с. самоиндукции  $E_L$  нужно отложить вниз под углом  $90^\circ$ . Падение напряжения на катушке индуктивности, необходимое для преодоления напряжения  $E_L$ , выразится вектором  $U_L$ , который численно равен вектору  $E_L$ , но направлен в противоположную сторону, т. е. вверх.

Кроме того, будет происходить падение напряжения  $U_R$  на резисторе. Вектор  $U_R$  равен произведению вектора  $I$  на величину активного сопротивления резистора  $R$ ;  $U_R$  совпадает по направлению с вектором тока. Отложим в масштабе напряжений этот вектор.

Теперь, чтобы получить напряжение на зажимах источника, достаточно сложить геометрически падения напряжений на катушке индуктивности  $U_L$  и резисторе  $U_R$ .

Вектор  $U$ , получившийся как геометрическая сумма векторов  $U_L$  и  $U_R$  (диагональ прямоугольника, построенного на этих векторах), является напряжением на зажимах цепи. Ток отстает по фазе от напряжения  $U$  на угол  $\varphi$  (сдвиг фаз равен  $\varphi$ ).

Вместо построения полной векторной диаграммы обычно строят так называемый **треугольник напряжений** (рис. 170). Этот треугольник прямоугольный. Его катеты пропорциональны падению напряжения на активном ( $U_R = IR$ ) и индуктив-

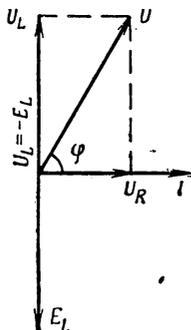


Рис. 169. Векторная диаграмма цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями

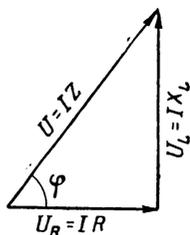


Рис. 170. Треугольник напряжений для цепи переменного тока с  $R$  и  $L$

ном ( $U_L = IX_L$ ) сопротивлениях, а гипотенуза — напряжению на зажимах цепи ( $U = IZ$ ), где  $Z$  — полное сопротивление цепи.

По теореме Пифагора из треугольника напряжений получаем

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 = I^2 R^2 + I^2 X_L^2,$$

откуда

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

Найдем, чему равняется величина тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (60)$$

Эта формула выражает закон Ома для цепи переменного тока с индуктивным и активным сопротивлениями.

Величина, стоящая в знаменателе, и есть **полное сопротивление цепи**, обозначаемое буквой  $Z$ . Тогда

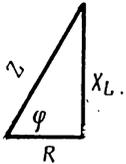
$$U = IZ,$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}. \quad (61)$$

Если разделить каждую сторону треугольника на величину тока  $I$ , то получим так называемый **треугольник сопротивлений** (рис. 171). Катеты этого треугольника пропорциональны соответственно активному и индуктивному сопротивлениям, а гипотенуза — полному сопротивлению.

Треугольник напряжений принципиально отличается от треугольника сопротивлений тем, что стороны первого являются векторами, т. е. графически изображают величины, синусоидально изменяющиеся во времени. Сопротивления во времени не изменяются. Треугольник сопротивлений иллюстрирует математическое соотношение между сопротивлениями в цепи переменного тока.



**Рис. 171.**  
Треугольник сопротивлений для цепи переменного тока с  $R$  и  $L$

Сдвиг фаз между током и напряжением обычно выражают не в градусах, а в виде отношения активного сопротивления к полному сопротивлению цепи переменного тока:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (62)$$

Соответствующий найденному значению синуса или косинуса угол определяется по тригонометрическим таблицам.

Синус и косинус не зависят от длины катетов и гипотенузы, а зависят только от величины угла  $\varphi$ .

Для нашего случая (рис. 171) отношение активного сопротивления  $R$  к полному сопротивлению  $Z$  и есть  $\cos \varphi$  (косинус угла  $\varphi$ ).

**Пример 80.** Катушка с индуктивностью  $L=60$  мГн и сопротивлением  $R=80$  Ом подключена к источнику тока напряжением  $U=120$  В. Определить ток в цепи и угол сдвига фаз между током и напряжением, если угловая частота тока  $\omega=1000$  1/сек.

**Решение.** Индуктивное сопротивление

$$\omega L = 1000 \cdot 0,06 = 60 \text{ Ом}$$

(индуктивность выражается в генри:  $L=60$  мГн = 0,06 Гн).

Полное сопротивление катушки по формуле (61)

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{80^2 + 60^2} = \sqrt{10000} = 100 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи по формуле (60)

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{100} = 1,2 \text{ А.}$$

Косинус угла сдвига фаз по формуле (62)

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{80}{100} = 0,8.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением находим из таблицы. Для  $\cos \varphi=0,8$  угол  $\varphi=36^\circ 50'$ .

На рис. 172 приведены треугольник напряжений и треугольник сопротивлений для цепи рис. 168, а.

Общее напряжение

$$U = \sqrt{100^2 + 100^2} = \sqrt{20000} = 141 \text{ в.}$$

Общее сопротивление

$$Z = \sqrt{100^2 + 100^2} = \sqrt{20000} = 141 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{141}{141} = 1 \text{ а.}$$

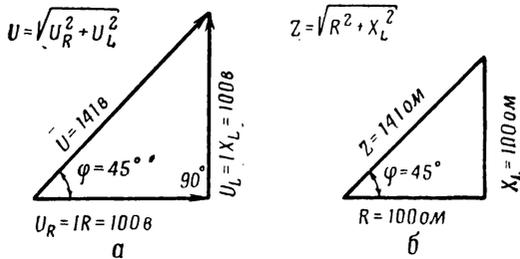


Рис. 172. Сложение векторов двух составляющих, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ :

а — треугольник напряжений для цепи переменного тока с последовательно включенными  $R$  и  $L$ ; б — треугольник сопротивлений для этой цепи

Сдвиг фаз между напряжением генератора и током цепи

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{100}{141} = 0,707, \text{ т. е. } \varphi = 45^\circ,$$

или (из треугольника сопротивлений)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{100}{100} = 1, \text{ т. е. } \varphi = 45^\circ.$$

**Соотношение между  $X_L$  и  $R$**

Чем больше индуктивность в последовательной цепи, тем больше величина  $X_L$  по сравнению с  $R$ . Это означает, что большее падение напряжения приходится на индуктивное сопротивление и фазовый угол приближается к  $90^\circ$ .

В табл. 7 приведены значения общего сопротивления и фазового угла для некоторых соотношений  $R$  и  $X_L$ .

При отношении  $X_L : R = 10 : 1$  цепь практически вся индуктивная. Фазовый угол, равный  $84^\circ$ , немного отличается от  $90^\circ$ . Общее сопротивление  $Z$  практически равно индуктивному сопротивлению  $X_L$ , а падение напряжения на катушке индуктивности — приложенному напряжению. Наоборот, когда  $R$  в 10 раз

$R, \text{ ом}$	$X_L, \text{ ом}$	$Z, \text{ ом}$	$\varphi, ^\circ$
1	10	$\sqrt{101} \approx 10$	84
10	10	$\sqrt{200} \approx 14$	45
10	1	$\sqrt{101} \approx 10$	6

больше  $X_L$ , цепь главным образом активная. Ток имеет почти ту же фазу, что и приложенное напряжение. Общее сопротивление  $Z$  приблизительно равно  $R$  и падение напряжения на этом сопротивлении можно считать равным приложенному напряжению.

Для случая, когда  $X_L = R$ , общее сопротивление  $Z$  в 1,41 раза больше каждого из них. При этом фазовый угол равен  $45^\circ$ , т. е. он находится посредине между нулем для чисто активного сопротивления и  $90^\circ$  для индуктивного.

#### 4. Цепь с параллельно соединенными катушкой и резистором

Для параллельно соединенных катушки индуктивности и резистора фазовый угол в  $90^\circ$  для  $X_L$  нужно рассмотреть в

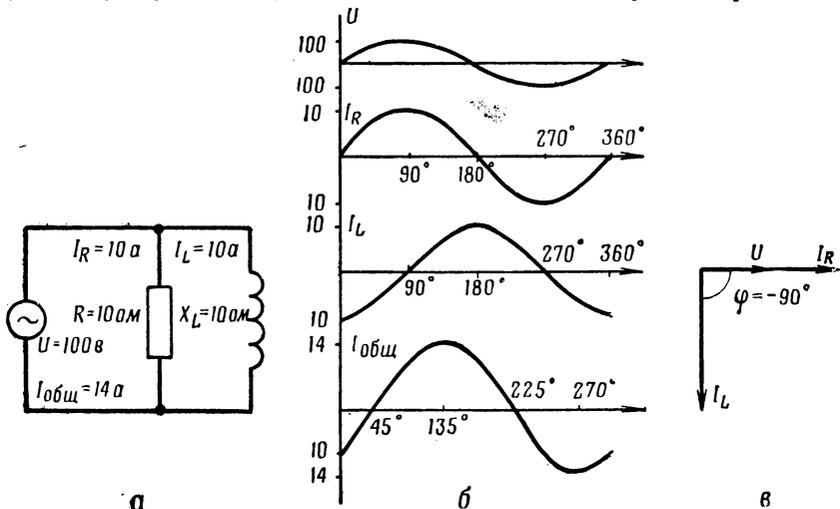


Рис. 173. Цепь с  $X_L$  и  $R$ , включенными параллельно:

а — схема; б — графическое изображение напряжения и токов; в — векторная диаграмма фазовых соотношений

отношении тока индуктивной ветви (вместо падения напряжения при последовательном включении).

В параллельной цепи (рис. 173, а) напряжение на зажимах генератора, катушки и резистора одно и то же, поэтому сдвига фаз между ними быть не может. Однако каждая ветвь имеет свой ток: активная —  $I_R = \frac{U}{R}$ , индуктивная —  $I_L = \frac{U}{X_L}$ . Ток в первой ветви имеет ту же фазу, что и напряжение генератора  $U$ , ток во второй ветви отстает от напряжения  $U$ , поскольку ток в катушке индуктивности отстает от напряжения на ее зажимах на  $90^\circ$ .

Ток неразветвленной части цепи состоит из токов  $I_R$  и  $I_L$ , сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ . Векторная сумма токов ветвей  $I_R$  и  $I_L$  равна общему току в цепи  $I_{\text{общ}}$ .

На рис. 173, б векторная сумма токов  $I_R$  и  $I_L$  (по  $10\text{ а}$  каждый) равна общему току  $I_{\text{общ}} = 14\text{ а}$ . Здесь токи ветвей складываются векторно, так как они сдвинуты по фазе на  $90^\circ$  в параллельной ветви аналогично падению напряжений, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$  в последовательной цепи. В данном случае (рис. 173, в) исходным вектором служит напряжение  $U$ , поскольку оно общее. Вектор тока  $I_L$  идет вниз, т. е. изображен с отрицательным углом  $90^\circ$ , поскольку он отстает от вектора  $U$ .

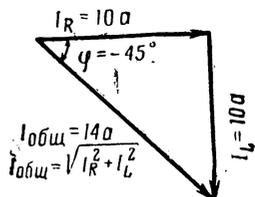


Рис. 174. Векторный треугольник токов, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , для параллельной цепи

Общий ток можно подсчитать из векторного треугольника токов (рис. 174). Расчет ведется в амплитудных значениях. Общий ток

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}. \quad (63)$$

Для значений токов, приведенных на рис. 174,

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{10^2 + 10^2} = \sqrt{200} = 14,1\text{ а}.$$

Общее сопротивление Чтобы определить общее сопротивление  $Z$  параллельно включенных  $X_L$  и  $R$ , необходимо подсчитать общий ток  $I_{\text{общ}}$ . Зная приложенное напряжение, получим

$$Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}}.$$

Определим  $Z$  для цепи, приведенной на рис. 173, а. Напряжение  $U = 100\text{ в}$ , общий ток  $I_{\text{общ}} = 14\text{ а}$  (точнее,  $14,1\text{ а}$ ). Следовательно,

$$Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{100\text{ в}}{14\text{ а}} = 7,07\text{ ом}.$$

Это сопротивление, подключенное к генератору, представляет собой общее противодействие, оказываемое току парал-

лельной цепью, состоящей из  $R=10$  ом и  $X_L=10$  ом. При равных величинах  $R$  и  $X_L$  оно равно не половине одного из них, а 70,7%.

При подсчете общего сопротивления параллельной цепи методом общего тока можно произвольно взять любую величину приложенного напряжения (см. гл. 3, раздел 2), но лучше, если она будет равна значению наибольшего сопротивления, чтобы избежать дробной величины тока.

**Пример 81.** Подсчитать общее сопротивление параллельной цепи с  $R=600$  ом и  $X_L=300$  ом.

Решение. Возьмем напряжение генератора равным 600 в. Тогда

$$I_R = \frac{600}{600} = 1 \text{ а}; I_L = \frac{600}{300} = 2 \text{ а};$$

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{1 + 4} = \sqrt{5} = 2,24 \text{ а}.$$

Отсюда

$$Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{600}{2,24} = 268 \text{ ом}.$$

**Фазовый угол**

В цепи, состоящей из параллельно включенных катушки и резистора, фазовый угол  $\varphi$  есть угол сдвига по фазе между общим током  $I_{\text{общ}}$  и напряжением генератора  $U$ . Приложенное напряжение  $U$  и ток  $I_R$  ветви с активным сопротивлением находятся в фазе, поэтому вместо тока  $I_R$  можно рассматривать напряжение  $U$ . Через косинус фазовый угол выражается

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{-I_{\text{общ}}}. \quad (64)$$

Знак «минус» перед  $I_{\text{общ}}$  показывает, что фазовый угол следует откладывать по часовой стрелке (что означает отставание по фазе), т. е. вниз от нулевой, исходной, фазы.

Чтобы определить  $\varphi$ , не вычисляя общего тока, можно применить формулу тангенса

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-I_L}{I_R}. \quad (65)$$

На рис. 174 фазовый угол равен  $-45^\circ$ , поскольку  $-I_L = I_R$ . Отрицательный фазовый угол тем меньше, чем больше индуктивное сопротивление  $X_L$  в параллельной ветви, поскольку ток индуктивной ветви уменьшается.

**Соотношение между  $X_L$  и  $R$**

В табл. 8 приведены значения общего сопротивления и фазового угла для некоторых соотношений  $X_L$  и  $R$  (при  $U=10$  в).

Когда  $X_L$  в 10 раз больше  $R$ , то параллельная цепь практически активная, так как индуктивный ток в цепи мал. Общее сопротивление параллельной цепи прибли-

Таблица 8

$R, \text{ ом}$	$X_L, \text{ ом}$	$I_R, \text{ а}$	$I_L, \text{ а}$	$I_{\text{общ}}, \text{ а}$ (приблизительно)	$Z_{\text{общ}} = \frac{U}{I_{\text{общ}}},$ $\text{ ом}$	$\varphi, \text{ }^\circ$
1	10	10	1	$\sqrt{101} = 10$	1	-6
10	10	1	1	$\sqrt{2} = 1,4$	7,07	-45
10	1	1	10	$\sqrt{101} = 10$	1	-84

зительно равно активному сопротивлению. Фазовый угол можно считать равным нулю, потому что почти весь общий ток составляет ток активной ветви. По мере уменьшения  $X_L$  ток в индуктивной ветви увеличивается. Когда  $X_L$  приближается к  $1/10$  величны  $R$ , общий ток составляет в основном ток индуктивной ветви. Параллельная цепь становится индуктивной с общим сопротивлением, практически равным  $X_L$ , а фазовый угол — около  $90^\circ$ , поскольку общий ток — главным образом индуктивный. Сравните эти выводы с выводами для последовательной цепи (табл. 7).

При  $X_L = R$  токи ветвей равны и фазовый угол составляет  $45^\circ$ .

## 5. Конденсатор в цепи переменного тока

Ток и напряжение на конденсаторе

В схеме рис. 175 синусоидальное напряжение  $U_C$ , приложенное к зажимам конденсатора, создает переменный ток заряда и разряда. Напряжение  $U_C = U$  в любой момент времени.

Когда  $U$  увеличивается, конденсатор заряжается и  $U_C$  возрастает до величины  $U$ , а когда  $U$  уменьшается, конденсатор разряжается и  $U_C$  уменьшается, так что равенство напряжений опять сохраняется. Когда  $U$  не изменяется, то нет тока заряда или разряда.

Во вторую четверть периода (рис. 175, б) напряжение  $U$  уменьшается, происходит разряд конденсатора. Ток разряда протекает от положительной пластины конденсатора через источник напряжения к отрицательной пластине, т. е. противоположно направлению тока заряда.

Во вторую четверть периода (рис. 175, б) напряжение  $U$  уменьшается, происходит разряд конденсатора. Ток разряда протекает от положительной пластины конденсатора через источник напряжения к отрицательной пластине, т. е. противоположно направлению тока заряда.

Во вторую четверть периода (рис. 175, б) напряжение  $U$  уменьшается, происходит разряд конденсатора. Ток разряда протекает от положительной пластины конденсатора через источник напряжения к отрицательной пластине, т. е. противоположно направлению тока заряда.

В третью четверть периода (рис. 175, в) напряжение  $U$  опять увеличивается, но уже в направлении, противоположном первоначальному. Конденсатор заряжается с обратной полярностью. Ток заряда имеет то же направление, что и ток разряда во второй четверти периода.

Наконец, в последнюю четверть периода (рис. 175, г) отрицательное приложенное напряжение уменьшается. Конденсатор

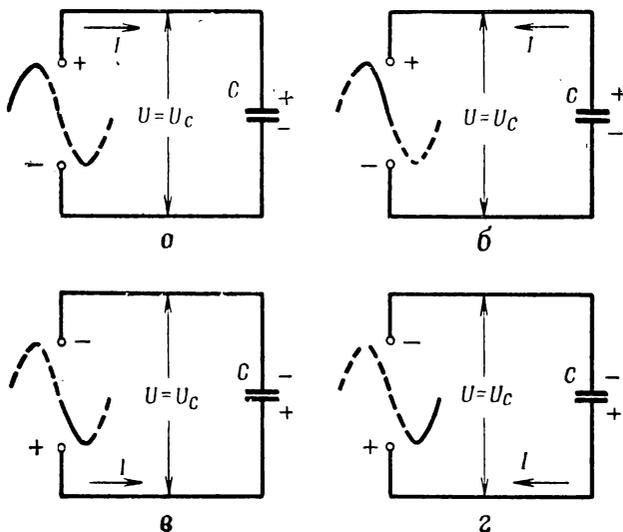


Рис. 175. Ток заряда и разряда конденсатора:

*а* — напряжение, увеличиваясь в одном направлении, заряжает конденсатор; *б* — конденсатор разряжается, по мере того как напряжение уменьшается; *в* — напряжение увеличивается в другом направлении, происходит заряд конденсатора в противоположной полярности; *г* — конденсатор разряжается, по мере того как обратное напряжение уменьшается

разряжается в том же направлении, что и при заряде в первой четверти периода.

Сдвиг фаз между  $U_C$  и  $I_C$   $90^\circ$

При синусоидальном приложенном напряжении в цепи с конденсатором создается переменный ток заряда и разряда. На рис. 176, *а* приведена схема включения конденсатора, а на рис. 176, *б* — графическое изображение тока и напряжения. Величина тока  $I_C = \frac{U}{X_C}$ .

Рассмотрим, как сдвинуты по фазе ток  $I_C$  и напряжение  $U_C$ . При включении источника напряжения, когда конденсатор не заряжен, ток в цепи максимален. По мере заряда конденсатора ток уменьшается, и в момент наибольшего напряжения он равен нулю. При уменьшении напряжения в положительном полупериоде направление тока в цепи меняется на обратное и т. д.

Таким образом, ток и напряжение сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , поскольку максимальная величина одного соответствует нулевой величине другого. Ток  $I_C$  опережает напряжение  $U_C$  на  $90^\circ$ , поскольку максимум тока наступает на четверть периода раньше максимума напряжения.

На рис. 177 приведена векторная диаграмма. Вектор тока  $I_C$  изображен совпадающим с горизонтальной линией. Вектор

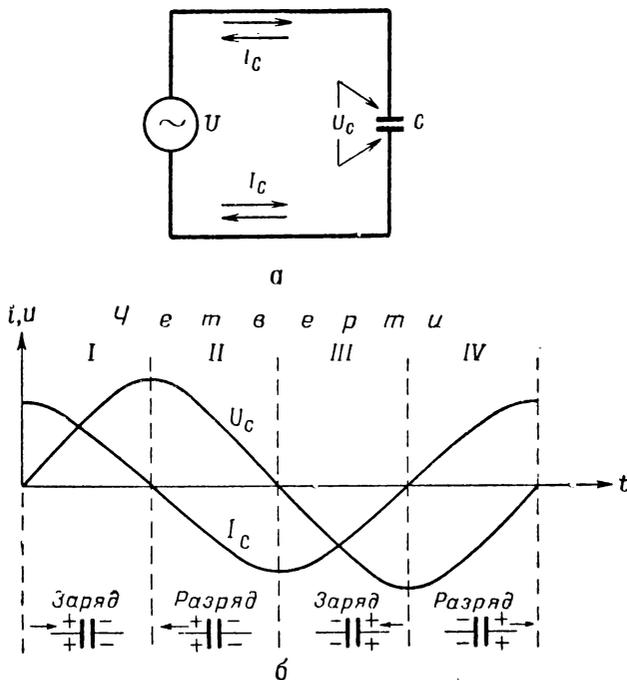


Рис. 176. Ток опережает напряжение на  $90^\circ$  в цепи переменного тока с емкостью:

*a* — переменное напряжение приложено к зажимам конденсатора; *б* — графическое изображение сдвига по фазе между током и напряжением

напряжения  $U$  на зажимах источника направлен вниз под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $I_C$ . Вектор напряжения  $U_C$  между обкладками конденсатора, равный по величине вектору  $U$ , но противоположный ему по направлению, отложен вверх.

Напряжение, возникающее на зажимах конденсатора, во-первых, вносит дополнительное сопротивление в цепь переменного тока и, во-вторых, вызывает сдвиг фаз между током в цепи и приложенным напряжением.

Емкостное сопротивление часто называют безваттным сопротивлением, так как на его преодоление никакой мощности не затрачивается. Происходит попеременный обмен энергией ме-

жду источником тока и электрическим полем конденсатора. В первую четверть периода энергия передается от источника конденсатору, в котором она запасается. Во вторую четверть энергия поступает из конденсатора в источник (не считая потерь на нагревание проводов). В третью четверть опять передается от источника тока к конденсатору и, наконец, в четвертую четверть — опять к источнику.

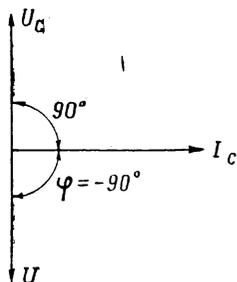


Рис. 177. Векторная диаграмма цепи переменного тока с емкостью

Напряжение на зажимах генератора и конденсатора одно и то же. Между этими двумя напряжениями никакого отставания или опережения по фазе быть не может. Они оба сдвинуты по фазе на  $90^\circ$  по отношению к току  $I_C$ .

В схеме, показанной на рис. 178, емкостное сопротивление конденсаторов равно активному сопротивлению резисторов схемы рис. 165. При той же величине приложенного напряжения обе цепи имеют одинаковый ток, потому что конденсатор действует аналогично резистору в ограничении тока и в создании падения напряжения.

Реактивное сопротивление  $X_C$  создает сдвиг по фазе между током и напряжением. Однако, поскольку оно однородное (только емкостное, без  $R$  и  $X_L$ ), величины  $X_C$  (рис. 178) могут складываться непосредственно, как и активные сопротивления.

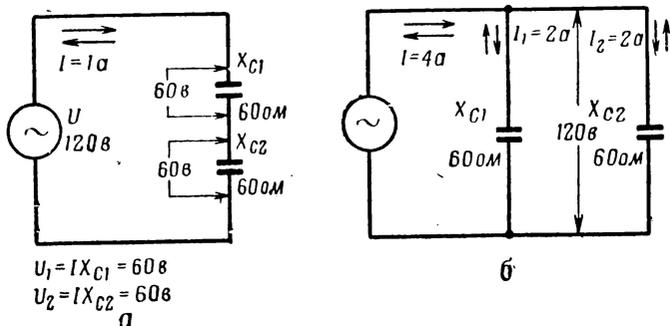


Рис. 178. Цепи переменного тока с емкостными сопротивлениями:

а — последовательное включение; б — параллельное

В схеме рис. 178, а через два последовательно включенных конденсатора с общим сопротивлением  $120 \text{ ом}$  протекает ток  $1 \text{ а}$ . Падение напряжения на каждом конденсаторе  $60 \text{ в}$ . В схеме рис. 178, б к зажимам параллельно включенных конденсаторов приложено напряжение  $120 \text{ в}$ . Ток в каждой ветви

равен  $2 a$ , а общий ток  $4 a$ , что соответствует общему емкостному сопротивлению  $30 \text{ ом}$  при параллельном соединении двух конденсаторов с сопротивлениями по  $X_C = 60 \text{ ом}$ . Напряжение на любом конденсаторе отстает от тока заряда или разряда на  $90^\circ$ .

## 6. Цепь с последовательно соединенными конденсатором и резистором

Когда в цепь последовательно включены конденсатор и резистор (рис. 179, *a*), ток в цепи зависит от емкостного  $X_C$  и активного  $R$  сопротивлений. Падение напряжения на резисторе  $U_R = IR$ , на конденсаторе  $U_C = IX_C$ .

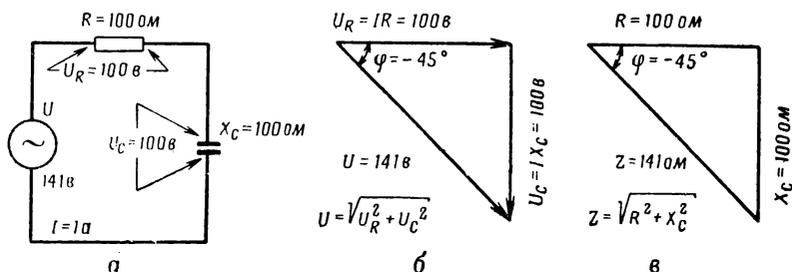


Рис. 179. Активное  $R$  и емкостное  $X_C$  сопротивления соединены последовательно:

*a* — схема включения; *б* — векторный треугольник напряжений ( $U_C$  отстает от  $U_R$  на  $-90^\circ$ ); *в* — треугольник сопротивлений

По фазе  $U_C$  отстает от тока на  $90^\circ$ , а  $U_R$  совпадает с током. Оба эти напряжения должны складываться векторно, поскольку они сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .

Векторное сложение  $U_C$  и  $U_R$  Падение напряжения на резисторе  $IR$  (рис. 179, *б*) совпадает по фазе с током. Падение напряжения на конденсаторе  $IX_C$  отстает по фазе от тока на  $90^\circ$ , поэтому вектор этого напряжения отложен под углом  $90^\circ$  вниз. Поэтому

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (66)$$

Для схемы, приведенной на рис. 179, *a*,

$$U = \sqrt{100^2 + 100^2} = \sqrt{20000} = 141 \text{ в.}$$

Векторная сумма двух напряжений в данном случае равна  $141 \text{ в}$  вместо  $200 \text{ в}$ , так как сдвиг фазы на  $90^\circ$  означает, что

максимальная величина одного напряжения соответствует нулевому значению другого.

Треугольник сопротивлений приведен на рис. 179, в.  
Общее сопротивление

Геометрическое сложение  $X_C$  и  $R$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (67)$$

Для схемы рис. 179, а

$$Z = \sqrt{100^2 + 100^2} = \sqrt{20000} = 141 \text{ ом.}$$

Ток в этой цепи равен  $\frac{U}{Z} = 1 \text{ а}$ . Падения напряжения на резисторе и конденсаторе равны по 100 в каждое.

Фазовый угол  $\varphi$  (сдвиг между напряжением генератора и током) в последовательной цепи может быть подсчитан из треугольника напряжений или сопротивлений (рис. 179, б и в). Фазовый угол отрицательный (перед  $Z$  или  $X_C$  ставят минус), поэтому откладывают его по часовой стрелке от исходного (нулевого) угла вектора тока.

Фазовый угол подсчитывают по формуле

$$\cos \varphi = \frac{R}{-Z} \quad (68)$$

или

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-X_C}{R}. \quad (69)$$

Независимо от выбора формулы значение  $\varphi$  одинаково для положительных и отрицательных углов до  $90^\circ$ .

Например, для схемы, приведенной на рис. 179, а, по формуле (68) определим

$$\cos \varphi = \frac{R}{-Z} = \frac{100}{-141} = -0,707,$$

т. е.  $\varphi = -45^\circ$ .

По формуле (69)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-X_C}{R} = \frac{-100}{100} = -1,$$

т. е. тоже  $\varphi = -45^\circ$ .

Формулой косинуса удобнее пользоваться, когда известны  $R$  и  $Z$ , формулой тангенса — когда известны  $X_C$  и  $R$ .

**Соотношение  
между  $X_C$  и  $R$**

В последовательной цепи большая величина  $X_C$  по сравнению с  $R$  означает, что цепь имеет емкостный характер. На зажимах конденсатора имеется большое падение напряжения и фазовый угол приближается к  $90^\circ$ . При наличии только  $X_C$  и отсутствии  $R$  все внешнее напряжение прикладывается к зажимам конденсатора и угол  $\varphi = -90^\circ$ .

В табл. 9 приведены значения общего сопротивления и фазового угла для некоторых соотношений  $R$  и  $X_C$ .

Таблица 9

$R, \text{ ом}$	$X_C, \text{ ом}$	$Z, \text{ ом}$ (приблизительно)	$\varphi, ^\circ$
1	10	$\sqrt{101} = 10$	-84
10	10	$\sqrt{200} = 14$	-45
10	1	$\sqrt{101} = 10$	-6

Отношение  $X_C : R = 10 : 1$  означает, что цепь практически вся емкостная. Фазовый угол, равный  $-84^\circ$ , немного отличается от  $90^\circ$ . Общее сопротивление  $Z$  практически равно емкостному сопротивлению  $X_C$ . Падение напряжения на конденсаторе почти равно приложенному напряжению. Наоборот, когда  $R$  в 10 раз больше  $X_C$ , цепь главным образом активная. Ток имеет почти ту же фазу, что и приложенное напряжение. Падение напряжения на резисторе практически равно приложенному напряжению.

Когда  $X_C = R$ , общее сопротивление  $Z$  в 1,41 раза больше каждого из них. При этом фазовый угол равен  $-45^\circ$ , т. е. посредине между нулем для активной цепи и  $-90^\circ$  для емкостной.

## 7. Цепь с параллельно соединенными конденсатором и резистором

В параллельной цепи (рис. 180, а) напряжение на зажимах генератора, конденсатора и резистора одно и то же, поскольку они включены параллельно. Следовательно, фаза напряжения, приложенного к резистору и конденсатору, одна и та же. В то же время каждая ветвь имеет свой ток: ветвь с активным сопротивлением —  $I_R = \frac{U}{R}$ , с емкостным —  $I_C = \frac{U}{X_C}$ . Векторная диаграмма приведена на рис. 180, б.

За начало отсчета принято напряжение генератора, одинаковое для всей цепи. Ток  $I_R$  совпадает по фазе с напряжением  $U$ , а ток  $I_C$  опережает его на  $90^\circ$ . Общий ток равен сумме векторов токов  $I_R$  и  $I_C$ , сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ :

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}. \quad (70)$$

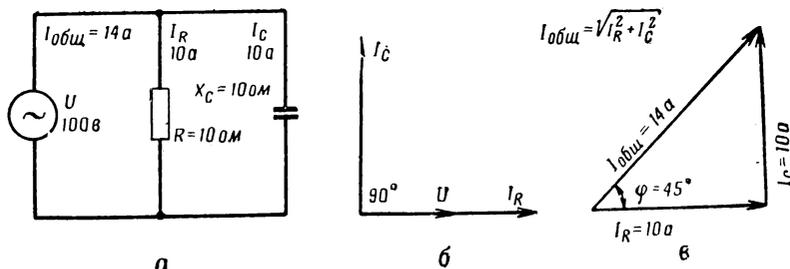
Для схемы, приведенной на рис. 180, а, сумма векторов токов (рис. 180, в) равна  $14 \text{ а}$ . Токи в ветвях параллельной цепи сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .

**Общее  
сопротивление**

Общее сопротивление параллельной цепи равно приложенному напряжению, деленному на общий ток цепи. Для схемы рис. 180, а

$$Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{100 \text{ в}}{14 \text{ а}} = 7,07 \text{ ом}.$$

Величина  $Z$  — это сопротивление на зажимах генератора, подключенного к параллельной цепи с  $R=10 \text{ ом}$  и  $X_C=10 \text{ ом}$ .



**Рис. 180.** Активное  $R$  и емкостное  $X_C$  сопротивления соединены параллельно: а — схема включения; б — вектор тока  $I_C$  опережает вектор напряжения  $U$  на  $90^\circ$ ; в — векторный треугольник токов ветвей  $I_C$  и  $I_R$  для подсчета общего тока  $I_{\text{общ}}$

Обратите внимание, что общее сопротивление резистора и конденсатора, имеющих равные сопротивления  $R$  и  $X_C$ , равно не половине, а  $0,707$  одной из величин.

**Фазовый угол**

Для схемы рис. 180, а фазовый угол  $\varphi$  равен  $45^\circ$ , так как сопротивления  $R$  и  $X_C$  одинаковы, а следовательно, равны и токи в ветвях. Для определения фазового угла выгодно пользоваться формулой тангенса.

Угол  $\varphi$  характеризует сдвиг фаз между общим током  $I_{\text{общ}}$  и напряжением генератора  $U$ . Он положительный — вектор  $I_C$  направлен вверх (ток опережает напряжение на  $90^\circ$ ).

Чем больше емкостное сопротивление в параллельной цепи, тем меньше фазовый угол, поскольку емкостный ток ветви уменьшается.

Соотношение  
между  $X_C$  и  $R$

источника  $U=10$  в).

В табл. 10 приведены значения общего сопротивления и фазового угла для некоторых соотношений  $X_C$  и  $R$  (величины токов определены при условии, что напряжение

Таблица 10

$R, \text{ ом}$	$X_C, \text{ ом}$	$I_R, \text{ а}$	$I_C, \text{ а}$	$I_{\text{общ}}, \text{ а}$ (приблизительно)	$Z, \text{ ом}$ (приблизительно)	$\varphi, \text{ }^\circ$
1	10	10	1	$\sqrt{101} = 10$	1	6
10	10	1	1	$\sqrt{2} = 1,4$	7,07	45
10	1	1	10	$\sqrt{101} = 10$	1	84

Когда  $X_C$  в 10 раз больше  $R$ , параллельная цепь практически активная. Общее ее сопротивление приблизительно равно активному сопротивлению резистора  $R$ . Фазовый угол близок к нулю, так как почти весь общий ток составляет ток активной ветви. По мере уменьшения емкостного сопротивления  $X_C$  ток в емкостной ветви увеличивается. Когда сопротивление  $X_C$  приближается к  $1/10$  сопротивления  $R$ , параллельная цепь становится практически емкостной с общим сопротивлением  $X_C$ . Фазовый угол почти равен  $90^\circ$ , потому что общий ток главным образом емкостный.

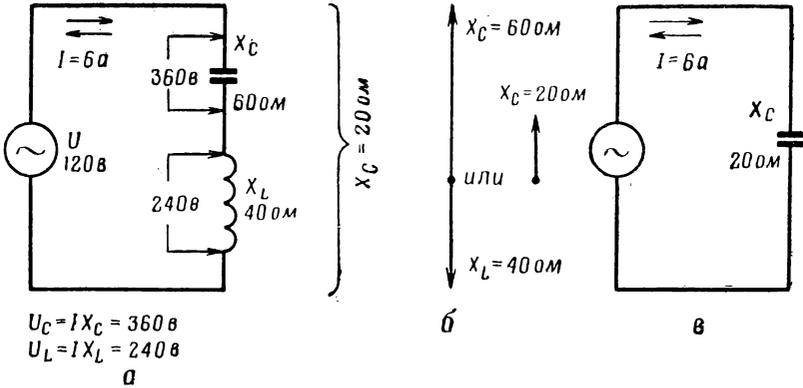
Обратите внимание, что эти закономерности противоположны тем, которым подчиняется последовательная цепь, состоящая из  $X_C$  и  $R$ .

## 8. Цепь с катушкой и конденсатором

$X_L$  и  $X_C$  соединены  
последовательно

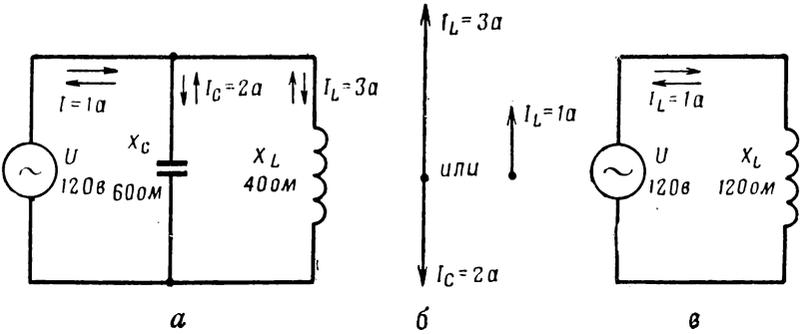
На рис. 181, *а* изображена цепь с последовательно соединенными конденсатором и катушкой с реактивными сопротивлениями  $X_C=60$  ом и  $X_L=40$  ом. В этом случае 40 ом индуктивного сопротивления компенсируются 40 ом емкостного, т. е. цепь эквивалента емкостной цепи с  $X_C=20$  ом (рис. 181, *в*). На рис. 181, *б* приведена диаграмма сопротивлений. При емкостном сопротивлении 20 ом и напряжении 120 в в цепи протекает ток 6 а. Он опережает при-

ложенное напряжение на  $90^\circ$ . Ток в  $6\text{ а}$  протекает через сопротивления  $X_L$  и  $X_C$ . Поэтому падение напряжения на индуктивности  $U_L=6 \cdot 40=240\text{ в}$  и на конденсаторе  $U_C=6 \cdot 60=360\text{ в}$ .



**Рис. 181.** При последовательном включении  $X_C$  и  $X_L$  их реактивные сопротивления взаимно компенсируются:  
*а* — схема цепи; *б* — векторная диаграмма; *в* — эквивалентная цепь

Таким образом, падение напряжения на каждом из последовательно соединенных реактивных сопротивлений может быть больше приложенного напряжения, но сумма их равна прило-



**Рис. 182.** При параллельном включении  $X_C$  и  $X_L$  токи ветвей взаимно компенсируются в общей цепи:  
*а* — схема цепи; *б* — векторная диаграмма; *в* — эквивалентная цепь

женному напряжению (120 в). Это получается потому, что напряжения  $I X_L$  и  $I X_C$  имеют противоположные полярности:  $U_L = I X_L$  опережает ток на  $90^\circ$ , а  $U_C = I X_C$  отстает от него на  $90^\circ$ , вследствие чего эти напряжения оказываются сдвинутыми

по фазе на  $180^\circ$  и, как имеющие противоположные полярности, в общей цепи взаимно уничтожаются.

$X_L$  и  $X_C$  соединены параллельно

В схеме рис. 182  $X_C=60$  ом и  $X_L=40$  ом соединены параллельно и подключены к источнику 120 в. Ток в индуктивной ветви  $I_L=3$  а, а в емкостной  $I_C=2$  а. Первый больше второго, потому что реактивное сопротивление катушки меньше, чем конденсатора. Ток  $I_L$  отстает от приложенного напряжения на  $90^\circ$ , а ток  $I_C$  опережает его на  $90^\circ$ , т. е. эти токи взаимно сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , вследствие чего их действие компенсируется.

Ток в общей цепи равен  $3$  а —  $2$  а =  $1$  а. Он отстает от приложенного напряжения на  $90^\circ$ , так как это — индуктивный ток.

Если  $X_L=60$  ом, а  $X_C=40$  ом, то  $I_C=3$  а, а  $I_L=2$  а. Общий ток опять равен  $1$  а, но он теперь емкостный, а значит, опережает приложенное напряжение на  $90^\circ$ .

## 9. Цепи с активными и реактивными сопротивлениями

В последовательной цепи геометрически складывают активные сопротивления с реактивными. Вначале суммируют все активные сопротивления, в результате чего образуется общее активное сопротивление  $R$ . Затем суммируют все реактивные сопротивления, в результате чего получается общее реактивное сопротивление  $X$ , которое может быть индуктивным или емкостным в зависимости от того, какая из величин преобладает. Затем  $R$  и  $X$  складывают геометрически, чтобы найти сопротивление всей последовательной цепи.

Для параллельных цепей складывают токи ветвей. Вначале суммируют токи активных ветвей, чтобы получить общий ток  $I_R$ , затем — токи реактивных ветвей (с учетом их фазовых соотношений), чтобы получить общий ток  $I_X$ , индуктивный или емкостный в зависимости от того, какая величина реактивного сопротивления меньше. Затем токи  $I_R$  и  $I_X$  складывают геометрически, чтобы найти общий ток всей параллельной цепи.

В обоих случаях фазовый угол определяется преобладающим током реактивной ветви.

Последовательное соединение

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из последовательно включенных резистора  $R$ , катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (рис. 183): Напряжение на зажимах источника тока складывается из падений напряжения на резисторе ( $U_R$ ), на катушке ( $U_L$ ) и на конденсаторе ( $U_C$ ).

На рис. 184 изображены векторные диаграммы для рассматриваемого соединения. Одна диаграмма (рис. 184, а) соответствует случаю, когда индуктивное сопротивление больше емко-

стного ( $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ), т. е. когда падение напряжения на катушке индуктивности больше, чем на конденсаторе ( $U_L > U_C$ ). Другая

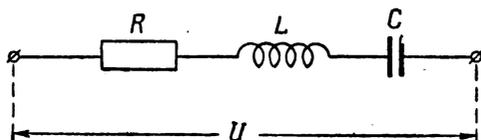


Рис. 183. Цепь переменного тока с последовательно включенными резистором, катушкой индуктивности и конденсатором

диаграмма (рис. 184, б) относится к случаю, когда индуктивное сопротивление меньше емкостного ( $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ), т. е. когда паде-

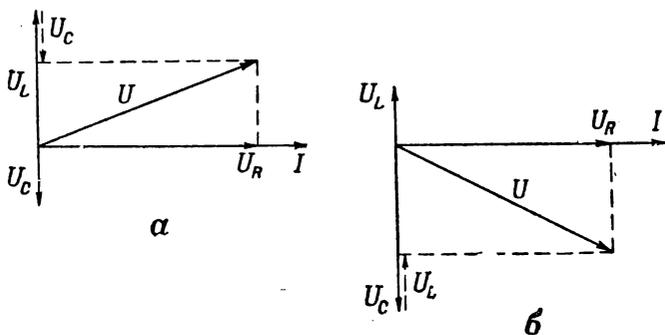


Рис. 184. Векторная диаграмма для цепи переменного тока с  $R$ ,  $L$  и  $C$ :

а — индуктивное сопротивление больше емкостного; б — индуктивное сопротивление меньше емкостного

ние напряжения на катушке индуктивности меньше, чем на конденсаторе ( $U_L < U_C$ ).

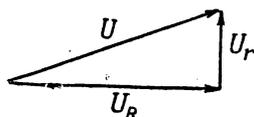


Рис. 185. Треугольник напряжений для цепи переменного тока с  $R$ ,  $L$  и  $C$

Разность напряжений  $U_L - U_C$  называется **реактивным напряжением** и обозначается через  $U_r$ .

На рис. 185 изображен треугольник напряжений, когда  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , из треугольника определяем

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_r^2}.$$

Подставив в эту формулу значения

$$U_R = IR \text{ и } U_r = U_L - U_C = IX_L - IX_C = I(X_L - X_C),$$

получим

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 (X_L - X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Окончательно

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (71)$$

Эта формула выражает закон Ома для цепи переменного тока с последовательно включенными  $R$ ,  $L$  и  $C$ . Полное сопротивление цепи в этом случае

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Разность  $X_L - X_C$  называется реактивным сопротивлением и обозначается буквой  $X$ .

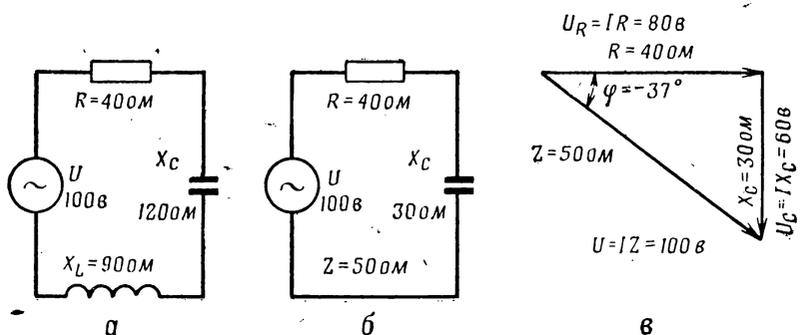


Рис. 186. Общее сопротивление  $Z$  последовательной цепи:

$a$  — последовательное включение  $R$ ,  $X_C$  и  $X_L$ ;  $b$  — эквивалентная цепь;  $в$  — векторная диаграмма

При последовательно включенных  $R$ ,  $L$  и  $C$ , после того как найдены  $R$  и  $X$ , можно определить общее сопротивление по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (72)$$

Общее сопротивление цепи  $Z$  представляет собой геометрическую сумму последовательно включенных активного и реактивного сопротивлений. Знак перед  $X$  (положительный или отрицательный) не имеет значения, так как после возведения в квадрат получается положительная величина.

Возьмем для примера цепь, показанную на рис. 186. Здесь действующее последовательное реактивное сопротивление емкостное, потому что  $X_C > X_L$  ( $120 - 90 = 30$  ом). А так как в цепи еще есть последовательно включенное активное сопротивление  $R = 40$  ом (рис. 186, б), то по формуле (72)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = \sqrt{2500} = 50 \text{ ом}.$$

Ток  $I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{50} = 2$  а. Поэтому напряжения на отдельных участках цепи  $IR = 80$  в,  $IX_C = 240$  в и  $IX_L = 180$  в. Поскольку

напряжения  $IX_C$  и  $IX_L$  имеют противоположную полярность, то чистое реактивное напряжение составит  $240 - 180 = 60$  в. Геометрическая сумма  $IR = 80$  в и чистого реактивного напряжения  $IX = 60$  в равна приложенному напряжению  $100$  в ( $U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X^2}$ ).

Фазовый угол  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$ . Так как в данном примере  $X = X_C = 30$  ом, а  $R = 40$  ом, то  $\varphi \approx -37^\circ$ . Знак «минус» означает, что напряжение генератора  $U$  отстает на  $37^\circ$  от тока  $I$  (рис. 186, в).

Подсчитаем общие активное и реактивное сопротивления цепи, приведенной на рис. 187. Общее активное сопротивление

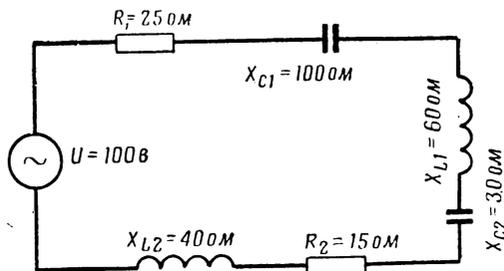


Рис. 187. Сложная цепь переменного тока

$R = R_1 + R_2 = 40$  ом (порядок подключения  $R_1$  и  $R_2$  не имеет значения, поскольку ток во всей цепи один и тот же). Общее емкостное сопротивление  $X_C = X_{C1} + X_{C2} = 130$  ом. Общее индуктивное сопротивление  $X_L = X_{L1} + X_{L2} = 100$  ом. Общее реактивное сопротивление  $X = X_C - X_L = 130 - 100 = 30$  ом; оно емкостное. Цепь рис. 187 эквивалентна цепи рис. 186, б.

#### Параллельное соединение

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из параллельно включенных резистора  $R$ , катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (рис. 188).

Общий ток в цепи равен сумме токов ее ветвей. Токи в ветвях сдвинуты по фазе, и суммировать их нужно геометрически.

Построим векторную диаграмму. Так как напряжение  $U$  на зажимах источника общее для  $R$ ,  $L$  и  $C$ , его и возьмем за исходный вектор (рис. 189).

Диагональ прямоугольника, построенного на векторе  $I_R$  (активного тока) и  $I_X$  (реактивного тока), является вектором общего тока, проходящего по цепи. Следовательно, общий ток цепи

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_X^2}. \quad (73)$$

Сдвиг фаз между током и напряжением равен  $\varphi$ . Если в цепи индуктивный ток больше емкостного ( $I_L > I_C$ ), то общий ток

отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi$ . Если преобладает емкостный ток ( $I_C > I_L$ ), то общий ток опережает напряжение на какой-то угол.

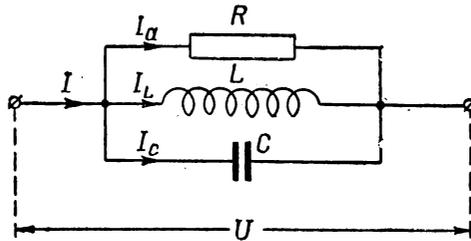


Рис. 188. Цепь переменного тока с параллельно включенными резистором, катушкой индуктивности и конденсатором

В схеме рис. 190, а ток  $I_R = 4$  а. Ток  $I_X = I_L - I_C = 3$  а, т. е. составляет разность между 4 а тока индуктивной ветви и 1 а тока емкостной ветви (рис. 190, б). Поэтому

$$I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_X^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5 \text{ а.}$$

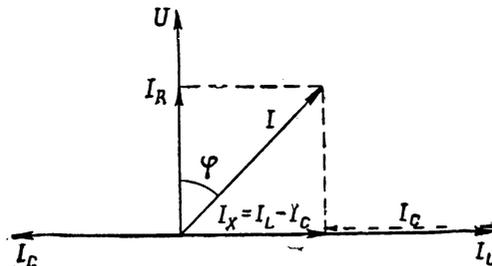


Рис. 189. Векторная диаграмма для цепи переменного тока с параллельно включенными  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$

Общее сопротивление  $Z$  параллельной цепи

$$Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}} = \frac{100}{5} = 20 \text{ ом.}$$

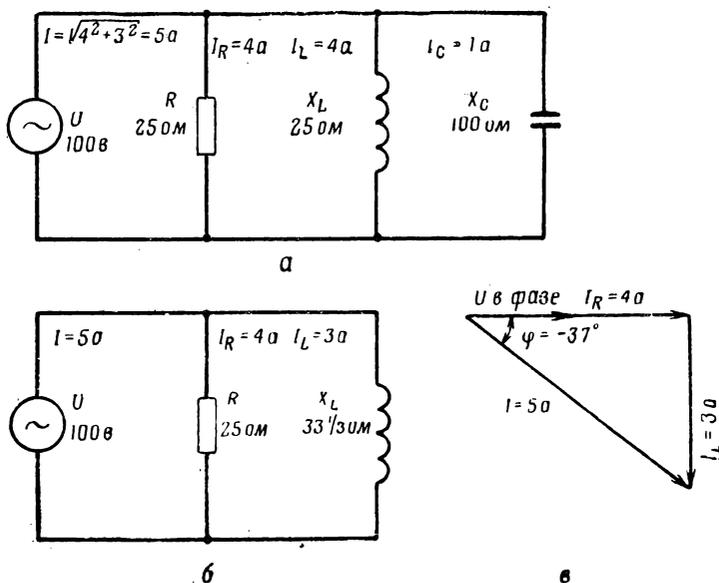
Фазовый угол параллельной цепи  $\text{tg } \varphi = \frac{I_X}{I_R}$ , где ток  $I_X = 3$  а, в данном примере — индуктивный. Угол  $\varphi$  отрицательный и приблизительно равен  $-37^\circ$ . Знак минус означает отставание ин-

дуктивного тока в параллельной цепи. Таким образом, ток  $I_{\text{общ}}$  отстает на  $37^\circ$  от приложенного напряжения  $U$  (рис. 190, в).

**Смешанное  
соединение**

Последовательно-параллельная цепь (рис. 191, а) может быть преобразована в последовательную цепь с одним реактивным и одним активным сопротивлениями.

Более сложные смешанные цепи переменного тока наилучшим образом подсчитываются при помощи комплексных чисел, которые описываются в книгах по математике.



**Рис. 190.** Общий ток неразветвленной части цепи при параллельном включении  $R$ ,  $X_L$  и  $X_C$ :

а — схема включения; б — эквивалентная цепь; в — векторная диаграмма

Подсчет рекомендуется начинать с ветви, наиболее удаленной от генератора. Индуктивные сопротивления  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$  и  $X_{L3}$  включены последовательно, поэтому их общее сопротивление равно  $X_{L5} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} = 25 + 100 + 75 = 200 \text{ ом}$  (рис. 191, б). В другой ветви  $X_{L6} = X_{L4} - X_{C1} - X_{C2} = 700 - 350 - 150 = 200 \text{ ом}$ . Общее активное сопротивление  $R = 100 \text{ ом}$ . Общее реактивное сопротивление  $X = 100 \text{ ом}$ ; оно индуктивное (образуется из двух параллельных индуктивных сопротивлений по  $200 \text{ ом}$  каждое). Эквивалентная цепь приведена на рис. 191, в, а ее треугольник сопротивлений — на рис. 191, г. Общее сопротивление  $Z = 141 \text{ ом}$ . При напряжении генератора  $100 \text{ в}$  ток в цепи равен  $0,7 \text{ а}$ . Фазовый угол  $\varphi = 45^\circ$ .

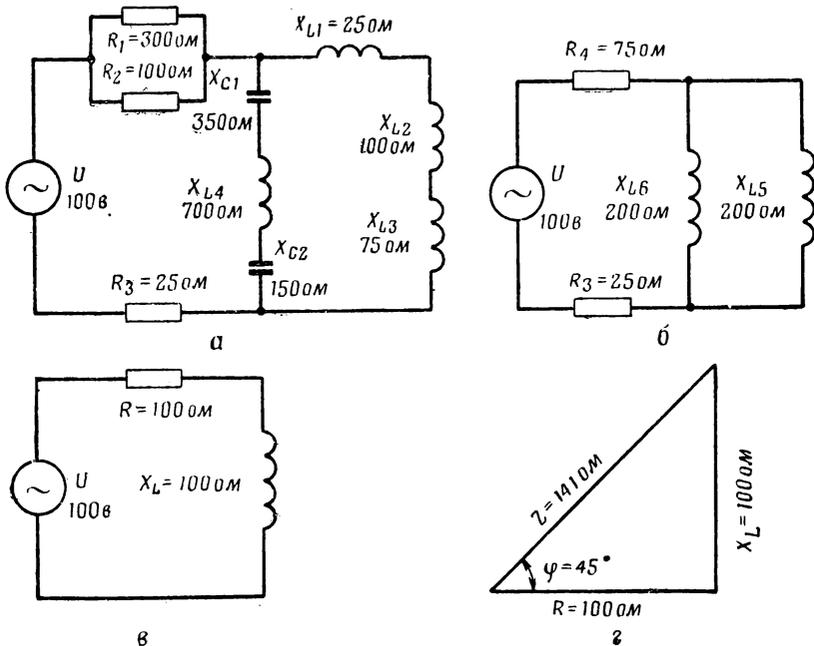


Рис. 191. Преобразование последовательно-параллельной цепи;  
 а — схема цепи; б — упрощенная схема; в — эквивалентная цепь;  
 г — диаграмма для эквивалентной цепи

## 10. Активная мощность

В цепи переменного тока с реактивным сопротивлением ток, создаваемый генератором, опережает напряжение или отстает от него. Тогда произведение  $UI$  не выражает реальную (активную) мощность, создаваемую генератором, поскольку напряжение может быть большим, а ток — около нуля (или наоборот). Активную мощность  $P_a$  можно подсчитать как произведение  $I^2 R$ , где  $R$  — общее активное сопротивление цепи (поскольку ток и напряжение имеют одну и ту же фазу).

Чтобы выразить мощность  $P_a$  через произведение  $UI$ , надо умножить его на  $\cos \varphi$ .

$$\text{Активная мощность } P_a = I^2 R$$

или

$$\text{Активная мощность } P_a = UI \cos \varphi. \quad (74)$$

Так как  $U$  и  $I$  обычно берут в действующих величинах, в них же получается активная мощность. Умножением  $UI$  на косинус фазового угла вводится составляющая активного сопротивления, необходимая для подсчета активной мощности  $P_a = I^2 R$ .

Например, в цепи переменного тока (рис. 192) протекает ток  $3 \text{ а}$  через резистор  $R=100 \text{ ом}$  и конденсатор с  $X_C=173 \text{ ом}$ . В этой цепи  $\varphi=-60^\circ$ , а  $\cos 60^\circ=0,5$ . Приложенное напряжение  $U=600 \text{ в}$ . Поэтому

$$P_a = I^2 R = 9 \cdot 100 = 900 \text{ вт}$$

или

$$P_a = UI \cos \varphi = 600 \cdot 3 \cdot 0,5 = 900 \text{ вт.}$$

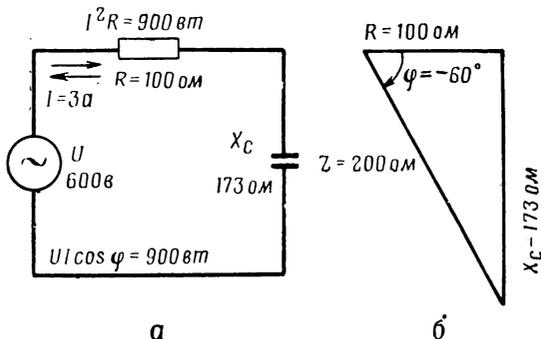


Рис. 192. Действительная мощность в последовательной цепи:  
а — схема цепи; б — диаграмма треугольника сопротивлений

Величина  $\cos \varphi$ , значения которой находятся в интервале от 0 до 1, представляет собой коэффициент мощности цепи.

Для последовательной цепи

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad (75)$$

для параллельной цепи

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I_{\text{общ}}}. \quad (76)$$

Если в цепи только активные сопротивления, то для последовательной цепи  $R=Z$ , а для параллельной  $I_R=I_{\text{общ}}$ , и тогда  $\cos \varphi=1$ . Если же в цепи только реактивные сопротивления (активное сопротивление равно нулю), то  $\cos \varphi=0$ .

Таким образом, по величине  $\cos \varphi$  можно судить о характере цепи: при  $\cos \varphi=1$  она чисто активная, при  $\cos \varphi=0$  — чисто реактивная.

Активная мощность не рассеивается в катушке индуктивности или конденсаторе, активное сопротивление которых равно нулю.

Действительно, напряжение и ток в них сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , т. е. одна величина равна нулю, а другая — максимальная. Энергия, запасаемая в магнитном поле катушки индуктив-

ности или в электрическом поле конденсатора, возвращается в цепь, т. е. мощность в чисто реактивном сопротивлении не рассеивается. Поэтому мощность цепи, в которой  $U$  и  $I$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , называется **кажущейся или реактивной**. Измеряется она не в ваттах (как активная), а в вольт-амперах реактивных (*вар*).

### 11. Резонанс напряжений

В цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора, катушки индуктивности и конденсатора, рассмотрим случай, когда индуктивное сопротивление равно емкостному, т. е.  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ . При этом полное сопротивление становится равным активному, так как  $X=0$ , следовательно, согласно формуле (72):

$$Z = \sqrt{R^2} = R.$$

Так как по мере повышения частоты емкостное сопротивление уменьшается, а индуктивное возрастает, то при сочетании любых величин  $L$  и  $C$  имеется частота, при которой реактивные сопротивления катушки и конденсатора равны.

Частота, при которой противоположные реактивные сопротивления в цепи переменного тока равны, называется **резонансной**, а сам случай их равенства называется **резонансом напряжений** или иногда последовательным резонансом (поскольку  $R$ ,  $L$  и  $C$  включены последовательно).

При резонансе значительно возрастает переменный ток резонансной частоты, при которой индуктивное и емкостное сопротивления полностью компенсируют одно другое.

Сдвиг фаз между током и напряжением становится равным нулю ( $\varphi=0$ ), тогда

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = 1.$$

Таким образом, цепь с последовательно включенными  $R$ ,  $L$  и  $C$  при резонансе становится эквивалентной цепи с чисто активным сопротивлением. **Падения напряжений на катушке индуктивности и конденсаторе при этом становятся очень большими — обычно много выше напряжения, приложенного к зажимам всей цепи.**

Определим частоту, при которой возникает резонанс напряжений (считаем, что  $R$ ,  $L$  и  $C$  имеют постоянные значения):

$$\omega_{\text{рез}} L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C},$$

отсюда

$$\omega_{\text{рез}}^2 LC = 1,$$

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Но

$$\omega_{\text{рез}} = 2\pi f_{\text{рез}},$$

а следовательно,

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (77)$$

Рассмотрим более подробно зависимость реактивного сопротивления от частоты.

Реактивное сопротивление катушки переменному току

$$\omega L = 2\pi fL$$

обращается в нуль при частоте  $f=0$ , поскольку при этом переменный ток превращается в постоянный, при котором сопро-

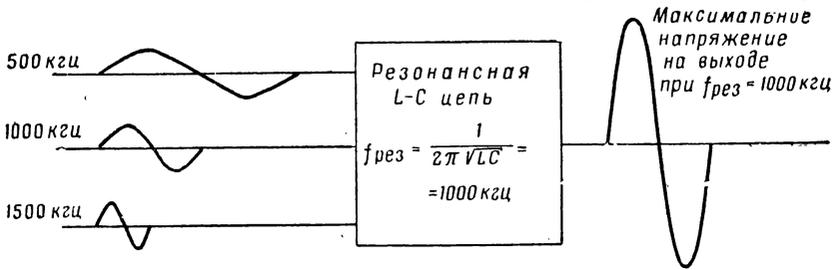


Рис. 193. Цепь при резонансной частоте 1000 кГц создает максимальное напряжение на выходе

тивление катушки индуктивности минимально. Во всех остальных случаях с повышением частоты сопротивление катушки возрастает.

Реактивное сопротивление конденсатора переменному току

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

при  $f=0$  равно бесконечно большой величине ( $\frac{1}{0} = \infty$ ), потому что конденсатор не пропускает постоянного тока. В остальных случаях с повышением частоты сопротивление конденсатора уменьшается.

При очень низкой частоте сопротивление катушки очень мало, а конденсатора велико. При очень высокой частоте, наоборот, сопротивление катушки велико, а конденсатора мало.

Как показано на рис. 193, резонанс в  $L-C$ -цепи наступает при 1000 кГц, когда на выходе цепи создается максимальное напряжение.

Реактивные сопротивления катушки индуктивности ( $L = 239 \text{ мкГн}$ ) и конденсатора ( $C = 106 \text{ нФ}$ ) равны при этом по 1500 ом каждое (рис. 194, а).

Поскольку при  $X_L = X_C$  общее реактивное сопротивление последовательной цепи равно нулю (рис. 194, б), то единственным

действующим оказывается небольшое активное сопротивление  $R_k$ . В результате ток в цепи сильно возрастает.

Главная особенность последовательного резонанса — это **возрастание тока до его максимальной величины  $\frac{U}{R}$  при резонансной частоте** (для цепи рис. 194, *a* она равна 30 мка). При частоте выше или ниже резонансной ток в цепи меньше.

На рис. 195, *a* величины тока представлены в виде отдельных колебаний переменного тока, созданного в цепи напряже-

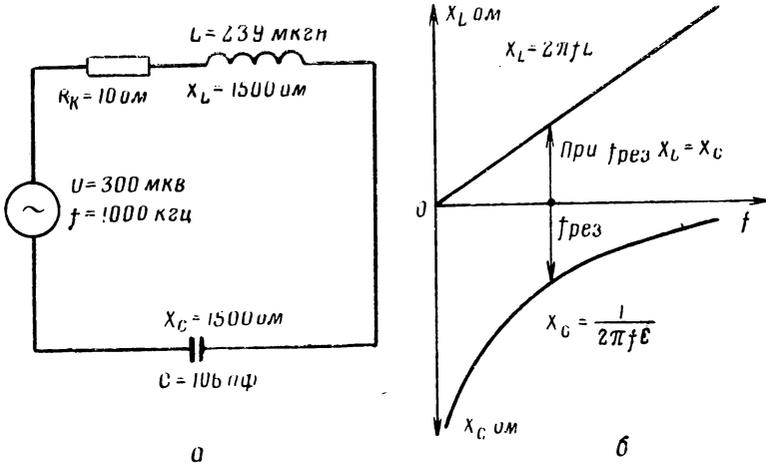


Рис. 194. Резонанс напряжений:

*a* — схема включения сопротивлений; *б* —  $X_L$  и  $X_C$  равны и противоположны при резонансной частоте

нием генератора. Величина тока наибольшая при резонансной частоте. На рис. 195, *б* зависимость амплитуды тока от частоты изображена кривой для частот, близких к резонансной, которую называют **кривой резонанса**. Ее можно рассматривать как очертание увеличивающихся и уменьшающихся амплитуд отдельных колебаний, приведенных на рис. 195, *a*.

Кривая резонанса последовательной цепи показывает, что ток, небольшой перед резонансом, возрастает до максимальной величины при резонансной частоте и затем снова падает до небольших величин.

Для иллюстрации этого в табл. 11 приведены величины сопротивления и тока для цепи рис. 194, *a* при резонансной частоте 1000 кГц и при двух частотах ниже и двух выше резонансной.

При частоте 600 кГц, когда  $X_C$  больше  $X_L$ , реактивное сопротивление, равное их разности, ограничивает ток до относительно небольшой величины. При частоте 800 кГц сопротивле-

Таблица 11

Частота, кГц	$X_L = 2\pi fL$ , ом	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ , ом	Чистое реактивное сопротивление, ом		$Z_{\text{Общ.}}, \text{ Ом}$	$I = \frac{U}{Z_{\text{Общ.}}}$ , мкА	$U_{X_L} = IX_L$ , мкВ	$U_{X_C} = IX_C$ , мкВ
			$X_C - X_L$	$X_L - X_C$				
600	900	2500	1600	--	1600	0,19	171	475
800	1200	1875	675	--	675	0,44	528	825
1000	1500	1500	0	0	10 (активное)	30 (активный)	45000	45000
1200	1800	1250	--	550	550	0,55	990	688
1400	2100	1070	--	1030	1030	0,29	609	310

Примечания: 1.  $L = 239$  мкГн;  $C = 106$  пФ;  $U = 300$  мкВ;  $R = 10$  ом.

2. Сопротивление  $Z_{\text{Общ}}$  и ток  $I$  подсчитаны приблизительно, без учета активного сопротивления  $R$ , которое очень мало по сравнению с реактивным до резонанса.

ние  $X_C$  уменьшается, а  $X_L$  увеличивается, разность сопротивлений становится меньше и ток в цепи возрастает. При резонансной частоте, когда  $X_C = X_L$ , реактивное сопротивление цепи равно нулю и ток становится максимальным, равным  $\frac{U}{R}$ . При частотах выше резонансной (1200 и 1400 кГц), когда  $X_L$  боль-

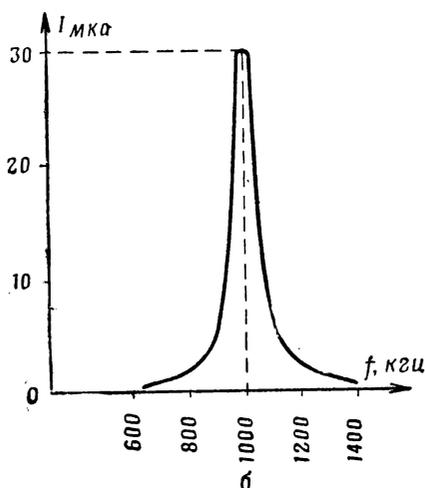
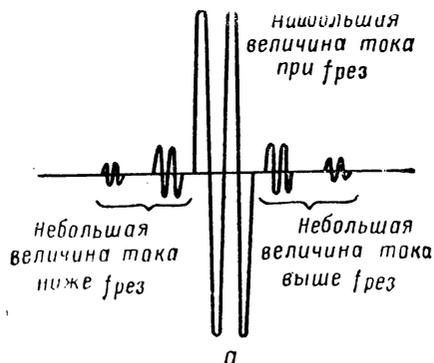


Рис. 195. Ток в цепи максимальный при резонансной частоте:  
 а — амплитуды тока различных частот;  
 б — резонансная кривая

ше  $X_C$ , разностное реактивное сопротивление вызывает уменьшение тока по сравнению с его величиной при резонансной частоте.

Таким образом, на частотах ниже резонансной сопротивление  $X_L$  маленькое, а  $X_C$  большое, что ограничивает величину тока. На частотах выше резонансной  $X_C$  маленькое, а  $X_L$  боль-

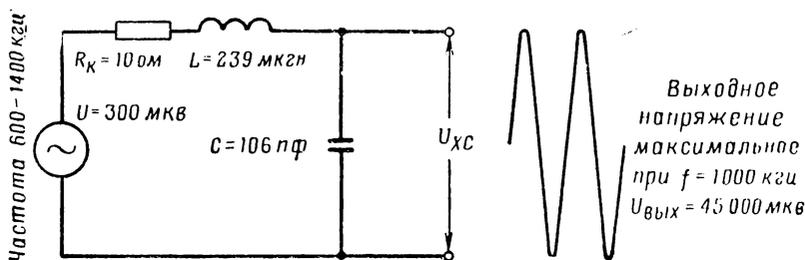
шое, что также ограничивает ток. При резонансной частоте реактивные сопротивления  $X_C$  и  $X_L$ , будучи равными, взаимно компенсируются, вызывая максимальный ток в цепи.

**Общее сопротивление минимальное**

Поскольку реактивные сопротивления компенсируются при резонансной частоте, общее сопротивление последовательной цепи становится минимальным, равным активному сопротивлению, поэтому фазовый угол равен нулю. При резонансе ток находится в фазе с напряжением генератора.

**Напряжение на зажимах  $L$  и  $C$  при резонансе**

Максимальный ток в последовательной цепи при резонансе весьма желателен, потому что он создает максимальное напряжение на зажимах катушки индуктивности и конденсатора.



**Рис. 196.** При резонансной частоте в последовательной цепи создается максимальное напряжение на зажимах конденсатора

Так, в цепи рис. 196 при резонансной частоте 1000 кГц напряжение на конденсаторе  $C$  возрастает до 45000 мкВ при напряжении на зажимах цепи 300 мкВ.

Последовательно-резонансная цепь как бы «избирает» резонансную частоту.

Максимальный ток при резонансной частоте создает максимальные напряжения —  $IX_C$  на конденсаторе  $C$  и  $IX_L$  на катушке индуктивности  $L$ . Изменения напряжения на зажимах конденсатора  $C$  при частотах ниже и выше резонансной показаны на рис. 197.

Хотя напряжения на зажимах катушки индуктивности и конденсатора реактивные, они реальные — их можно измерять. Например, в цепи на рис. 198 при резонансе падения напряжения на конденсаторе  $C$  и катушке индуктивности  $L$  — по 45000 мкВ, а на резисторе  $R$  — 300 мкВ.

Напряжение на зажимах резистора равно напряжению генератора и имеет ту же фазу. Напряжение на зажимах последовательно включенных катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (в точках 1 и 2) равно нулю, так как напряжения на

катушке индуктивности и на конденсаторе равны и противоположны по фазе. Чтобы использовать возросшее при резонансе напряжение, его следует снимать с зажимов катушки индуктив-

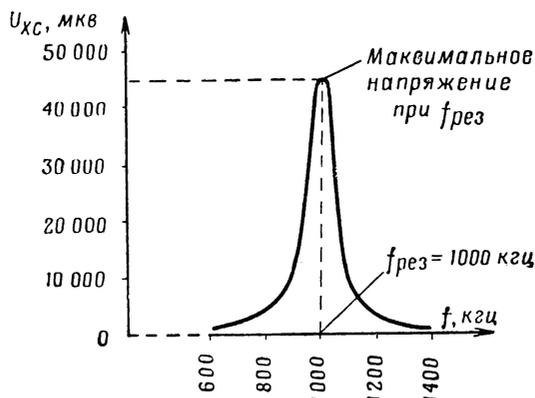


Рис. 197. Кривая напряжения на зажимах конденсатора

ности или конденсатора. Практически оно снимается с зажимов конденсатора  $C$ .

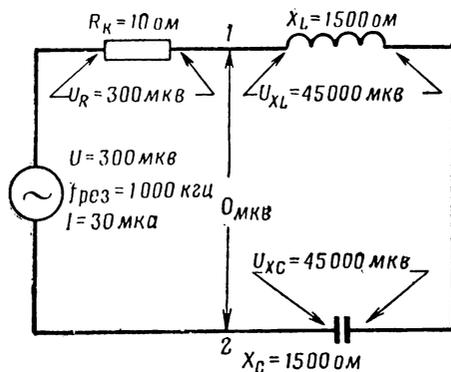


Рис. 198. Падение напряжений в последовательной цепи при резонансе

## 12. Резонанс токов

В параллельной  $L-C$ -цепи (рис. 199), когда  $X_L = X_C$ , т. е. при резонансе, реактивные токи ветвей равны по величине и противоположны по направлению, вследствие чего общий ток

минимален, а общее сопротивление цепи (на зажимах генератора) максимально.

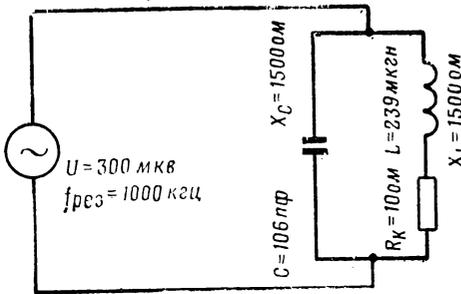
**Общий ток минимален**

Так как катушка  $L$ , конденсатор  $C$  и генератор включены параллельно, напряжение, приложенное к ветвям цепи, равно напряжению генератора  $U$ . Поэтому токи в каж-

дой ветви  $I_L = \frac{U}{X_L}$  и  $I_C = \frac{U}{X_C}$ .

Ток емкостной ветви опережает напряжение генератора на  $90^\circ$ , а ток индуктивной ветви отстает от этого напряжения на  $90^\circ$ , т. е. они сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  и поэтому компенсируются в неразветвленном участке цепи.

По мере того как частота повышается, приближаясь к резонансной, ток емкостной ветви возрастает из-за уменьшения со-



**Рис. 199.** Резонанс токов

противления  $X_C$ , а ток индуктивной ветви уменьшается вследствие увеличения сопротивления  $X_L$ . Общий реактивный ток в неразветвленной части цепи

$$I_X = I_L - I_C.$$

При резонансной частоте токи индуктивной и емкостной ветвей равны и поэтому полностью компенсируются. При частоте выше резонансной ток в емкостной ветви больше, чем в индуктивной, и общий реактивный ток цепи возрастает.

Когда нет резонанса, активным током в индуктивной ветви можно пренебречь, поскольку он очень маленький по сравнению с реактивным током в неразветвленной цепи. При резонансной частоте, когда реактивные токи уничтожаются, активная составляющая тока имеется во внешней цепи. Общий ток равен активной составляющей и совпадает по фазе с приложенным напряжением.

При параллельном резонансе общее сопротивление цепи на зажимах генератора максимально. При частотах ниже или выше резонансной оно меньше.

**Общее сопротивление максимально**

**При параллельном резонансе общее сопротивление цепи на зажимах генератора максимально.** При частотах ниже или выше резонансной оно меньше.

Параллельно-резонансная  $L-C$ -цепь «избирает» частоту, при которой получается максимальное общее сопротивление.

Ток неразветвленного участка цепи может быть очень небольшим, хотя токи реактивных ветвей значительны (рис. 200).

На рис. 200 активная составляющая общего тока представлена в виде отдельной ветви, по которой протекает от генератора в общую цепь. активный ток, равный току, определяемому

сопротивлением катушки. Реактивный ток каждой ветви равен напряжению генератора, деленному на соответствующее реактивное сопротивление. Поскольку эти токи равны и противоположны по фазе, они взаимно компенсируются.

На первый взгляд может показаться странным, почему при резонансе общий ток в неразветвленной части цепи очень мал, тогда как токи в ветвях очень велики.

Физическая сущность процессов при резонансе следующая. При резонансе токов, как и при резонансе напряжений, происходит обмен энергии между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. Колебаний энергии между контуром, образуемым катушкой и конденсатором, и источником

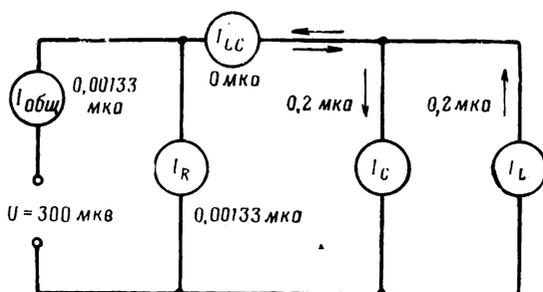


Рис. 200. Распределение токов при резонансе в параллельной цепи

питания нет, энергия последнего расходуется только на покрытие потерь активного сопротивления контура. Контур представляет для генератора чисто активное сопротивление, величина которого тем больше, чем меньше потери в контуре. Если бы не было потерь в контуре, он представлял бы бесконечно большое сопротивление. Генератор, сообщив однажды энергию цепи (контур), оказался как бы изолированным от нее. Ток в разветвленной части цепи поддерживался бы за счет запасенной энергии. Напряжение на зажимах цепи оставалось бы равным напряжению генератора.

Явления, возникающие в параллельном контуре при равенстве реактивных сопротивлений ветвей, называются **резонансом токов**.

Параллельный колебательный контур отличается от последовательного только тем, что он замкнутый: генератор, создающий колебания, не включен непосредственно в него.

Значения  $L$ ,  $C$  и  $f$ , при которых наступает резонанс токов, определяются так же, как и при резонансе напряжений. Изменяя любую из трех величин, можно добиться равенства  $X_L$  и  $X_C$ , т. е. настроить колебательный контур в резонанс.

Последовательный и параллельный колебательные контуры — важнейшие элементы каждого радиотехнического устройства.

### Краткие выводы

1. При наличии одних резисторов расчет цепей переменного тока ничем не отличается от расчета цепей постоянного тока — используется действующая величина переменного напряжения. Когда нет реактивного сопротивления, фазовый угол равен  $0^\circ$ .

2. Емкостные сопротивления, так же как и индуктивные, складываются при последовательном соединении и определяются по обратной формуле при параллельном соединении.

3. Сравнение параметров цепей при последовательном и параллельном соединении катушки и резистора:

Последовательное соединение	Параллельное соединение
<p>Ток <math>I</math> в катушке и резисторе один и тот же</p> $U_{\text{прил}} = \sqrt{U_R^2 + U_{XL}^2}$ $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ $\text{tg } \varphi = \frac{X_L}{R}$ <p>Угол <math>\varphi</math> увеличивается с возрастанием <math>X_L</math>, которое делает цепь более индуктивной</p>	<p>Напряжение <math>U</math> на зажимах катушки и резистора одно и то же</p> $I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_{XL}^2}$ $Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}}$ $\text{tg } \varphi = \frac{-I_{XL}}{I_R} = \frac{R}{-X_L}$ <p>Отрицательный угол <math>\varphi</math> уменьшается с возрастанием <math>X_L</math>, которое уменьшает ток индуктивной ветви</p>

4. Сравнение параметров цепей при последовательном и параллельном соединении конденсатора и резистора:

Последовательное соединение	Параллельное соединение
<p>Ток <math>I</math> один и тот же в конденсаторе и резисторе</p> $U_{\text{прил}} = \sqrt{U_R^2 + U_{XC}^2}$ $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ $\text{tg } \varphi = \frac{-X_C}{R}$	<p>Напряжение <math>U</math> одно и то же на зажимах конденсатора и резистора</p> $I_{\text{общ}} = \sqrt{I_R^2 + I_{XC}^2}$ $Z = \frac{U}{I_{\text{общ}}}$ $\text{tg } \varphi = \frac{I_{XC}}{I_R}$

При последовательном соединении компенсируются емкостное и индуктивное сопротивления одинаковой величины, а при параллельном соединении — одинаковые токи емкостной и индуктивной ветвей.

5. Цепь переменного тока с активным  $R$ , индуктивным  $X_L$  и емкостным  $X_C$  сопротивлениями можно преобразовать в цепь с одним эквивалентным активным и одним индуктивным или емкостным сопротивлениями в зависимости от того, какое из двух последних преобладает в цепи. После этого для последовательной цепи геометрически складываются общее активное  $R$  и общее реактивное  $X$  сопротивления. Фазовый угол определяют из формулы  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$ . Для параллельной цепи геометрически складывают общий ток активной ветви и суммарный ток реактивной. Фазовый угол определяют по формуле  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_X}{I_R}$ .

#### 6. Сравнение сопротивлений $R$ , $X_L$ , $X_C$ и $Z$ :

Активное сопротивление $R$ , ом	Индуктивное сопротивление $X_L$ , ом	Емкостное сопротивление $X_C$ , ом	Общее сопротивление $Z$ , ом
Напряжение на резисторе в фазе с током (переменным и постоянным)	Напряжение на катушке опережает ток на $90^\circ$	Напряжение на конденсаторе отстает от тока на $90^\circ$	Суммарное значение активного $R$ и реактивного $X$ сопротивлений $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
Величина $R$ одна и та же для всех частот	Величина $X_L$ увеличивается с повышением частоты	Величина $X_C$ уменьшается с повышением частоты	Составляющая $X_L$ увеличивается, а $X_C$ уменьшается при увеличении частоты При последовательном соединении $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$ , при параллельном соединении $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_X}{I_R}$

7. В цепях переменного тока с реактивным сопротивлением активная мощность измеряется в ваттах:  $P_a = I^2 R = UI \cos \varphi$ , где  $\varphi$  — фазовый угол. Эта мощность является полезной. Она определяет ту часть электрической энергии, которая превращается в энергию другого вида (тепловую, механическую, световую, химическую).

Величина  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$  называется коэффициентом мощности.

Реактивная мощность в цепи не используется. Она идет от источника к приемнику и оттуда возвращается к источнику тока.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В цепи с индуктивным сопротивлением при синусоидальном переменном токе:

а — фазовый угол тока равен  $90^\circ$ ; б — напряжение, приложенное к катушке индуктивности, сдвинуто по фазе на  $90^\circ$  по сравнению с напряжением источника тока; в — ток через катушку отстает от приложенного напряжения на  $90^\circ$ ; г — ток через катушку индуктивности и напряжение на ее зажимах сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

2. В цепи переменного тока при  $X_L$  и  $R$ , включенных последовательно: а — напряжения на зажимах  $X_L$  и  $R$  находятся в фазе; б — напряжения на зажимах  $X_L$  и  $R$  сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ ; в — напряжение на зажимах  $R$  отстает от напряжения на зажимах  $X_L$  на  $90^\circ$ ; г — напряжение на зажимах  $R$  опережает напряжение на зажимах  $X_L$  на  $90^\circ$ .

3. В цепи переменного тока с активным сопротивлением  $40 \text{ ом}$ , включенным последовательно с индуктивным сопротивлением  $30 \text{ ом}$ , общее сопротивление  $Z$  равно:

а —  $30 \text{ ом}$ ; б —  $40 \text{ ом}$ ; в —  $50 \text{ ом}$ ; г —  $70 \text{ ом}$ .

4. В цепи переменного тока с активным сопротивлением  $90 \text{ ом}$ , включенным последовательно с индуктивным сопротивлением  $90 \text{ ом}$ , фазовый угол  $\varphi$  равен:

а —  $0^\circ$ ; б —  $30^\circ$ ; в —  $45^\circ$ ; г —  $90^\circ$ .

5. Активное сопротивление  $1000 \text{ ом}$  включено параллельно с индуктивным сопротивлением  $1000 \text{ ом}$ . Общее сопротивление равно:

а —  $500 \text{ ом}$ ; б —  $707 \text{ ом}$ ; в —  $1000 \text{ ом}$ ; г —  $2000 \text{ ом}$ .

6. В цепи переменного тока, состоящей из параллельно включенных резистора  $R$  и катушки индуктивности  $L$ :

а — напряжение на зажимах катушки опережает напряжение на зажимах резистора на  $90^\circ$ ; б — токи в активной и индуктивной ветвях сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ ; в — токи в ветвях с  $R$  и  $L$  имеют одну фазу; г — токи в ветвях с  $R$  и  $L$  сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

7. В цепи синусоидального переменного тока с соединенными последовательно конденсатором и резистором:

а — фазовый угол цепи равен  $-90^\circ$  при большом сопротивлении резистора; б — напряжение на зажимах конденсатора сдвинуто по фазе на  $90^\circ$  по отношению к току заряда и разряда; в — напряжение на зажимах конденсатора в фазе с током заряда и разряда; г — ток заряда и разряда конденсатора сдвинут по фазе на  $90^\circ$  по отношению к приложенному напряжению.

8. В цепи синусоидального переменного тока при параллельном включении резистора и конденсатора:

а — напряжение на зажимах конденсатора отстает от напряжения на зажимах резистора на  $90^\circ$ ; б — ток в ветви с резистором сдвинут по фазе на  $90^\circ$  по отношению к току в ветви с конденсатором; в — токи в обеих ветвях имеют одну и ту же фазу; г — токи в обеих ветвях сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

9. В цепи синусоидального переменного тока включены последовательно резистор с активным сопротивлением  $90 \text{ ом}$  и конденсатор с емкостным сопротивлением  $90 \text{ ом}$ . Фазовый угол  $\varphi$  равен:

а —  $-90^\circ$ ; б —  $-45^\circ$ ; в —  $0^\circ$ ; г —  $90^\circ$ .

10. Резистор с активным сопротивлением  $1000 \text{ ом}$  и конденсатор с емкостным сопротивлением  $1000 \text{ ом}$  включены параллельно. Общее сопротивление цепи равно:

а —  $500 \text{ ом}$ ; б —  $707 \text{ ом}$ ; в —  $1000 \text{ ом}$ ; г —  $2000 \text{ ом}$ .

11. В цепи синусоидального переменного тока при последовательном включении  $X_C$  и  $R$ :

а — напряжение на них находится в фазе; б — напряжение на них сдвинуто по фазе на  $180^\circ$ ; в — напряжение на  $R$  опережает напряжение на  $X_C$  на  $90^\circ$ ; г — напряжение на  $R$  отстает от напряжения на  $X_C$  на  $90^\circ$ .

12. В цепь переменного тока включены последовательно реактивные сопротивления  $X_{C1}=100 \text{ ом}$ ,  $X_{C2}=50 \text{ ом}$ ,  $X_{L1}=40 \text{ ом}$  и  $X_{L2}=30 \text{ ом}$ . Общее реактивное сопротивление равно:

а —  $80 \text{ ом } X_L$ ; б —  $220 \text{ ом } X_L$ ; в —  $80 \text{ ом } X_C$ ; г —  $220 \text{ ом } X_C$ .

13. В цепь переменного тока включены последовательно сопротивления  $R=40 \text{ ом}$ ,  $X_L=90 \text{ ом}$  и  $X_C=60 \text{ ом}$ . Общее сопротивление равно:

а —  $50 \text{ ом}$ ; б —  $70,7 \text{ ом}$ ; в —  $110 \text{ ом}$ ; г —  $190 \text{ ом}$ .

14. В цепь переменного тока включены параллельно сопротивления  $R=100 \text{ ом}$ ,  $X_L=100 \text{ ом}$  и  $X_C=100 \text{ ом}$ . Общее сопротивление  $Z$  равно:

а —  $33\frac{1}{3} \text{ ом}$ ; б —  $70,7 \text{ ом}$ ; в —  $100 \text{ ом}$ ; г —  $300 \text{ ом}$ .

15. В цепь переменного тока включены последовательно сопротивления  $R=100 \text{ ом}$ ,  $X_L=200 \text{ ом}$  и  $X_C=300 \text{ ом}$ . Фазовый угол цепи равен:

а —  $0^\circ$ ; б —  $37^\circ$ ; в — минус  $45^\circ$ ; г —  $90^\circ$ .

16. Коэффициент мощности цепи переменного тока равен: а —  $\cos \varphi$ , б —  $\operatorname{tg} \varphi$ ; в — нулю для цепи с одним активным сопротивлением; г — единице для реактивной цепи.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. Изобразите графически два напряжения, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , каждое с амплитудой  $100 \text{ в}$ . Чему равна их сумма векторов? Когда сумма двух последовательных падений напряжений по  $100 \text{ в}$  будет равна  $200 \text{ в}$ ?

2. Нарисуйте схему цепи с индуктивным  $X_L$  и активным  $R$  сопротивлениями, подключенными последовательно к зажимам источника  $100 \text{ в}$ . Подсчитайте общее сопротивление  $Z$ , ток  $I$ , падения напряжений на резисторе и на катушке индуктивности и фазовый угол  $\varphi$  для следующих цепей:

а —  $R=100 \text{ ом}$ ,  $X_L=1 \text{ ом}$ ; б —  $R=1 \text{ ом}$ ,  $X_L=100 \text{ ом}$ ; в —  $R=50 \text{ ом}$ ,  $X_L=50 \text{ ом}$ .

3. Что такое фазовый угол переменного тока? Напишите формулу фазового угла для цепи с последовательно включенными индуктивным и активным сопротивлениями.

4. Нарисуйте схему цепи с индуктивным  $X_L$  и активным  $R$  сопротивлениями, подключенными параллельно к зажимам источника  $100 \text{ в}$ . Подсчитайте  $I_R$ ,  $I_{X_L}$ ,  $I_{\text{общ}}$  и  $Z$  для следующих случаев:

а —  $R=100 \text{ ом}$ ;  $X_L=1 \text{ ом}$ ; б —  $R=1 \text{ ом}$ ;  $X_L=100 \text{ ом}$ ; в —  $R=50 \text{ ом}$ ;  $X_L=50 \text{ ом}$ .

5. Резистор с сопротивлением  $40 \text{ ом}$  и конденсатор с емкостным сопротивлением  $30 \text{ ом}$  подключены последовательно к зажимам источника синусоидального напряжения  $100 \text{ в}$ .

а) Нарисуйте схему цепи. б) Подсчитайте общее сопротивление  $Z$  и ток  $I$ . в) Определите напряжение на резисторе  $R$  и конденсаторе  $C$ . г) Каков фазовый угол  $\varphi$  цепи? д) Сравните фазу тока в резисторе и конденсаторе.

6. Резистор с сопротивлением  $40 \text{ ом}$  и конденсатор с емкостным сопротивлением  $30 \text{ ом}$  подключены параллельно к зажимам источника синусоидального напряжения  $100 \text{ в}$ .

а) Нарисуйте схему цепи. б) Подсчитайте ток каждой ветви. в) Каков общий ток в неразветвленной части цепи? г) Подсчитайте общее сопротивление  $Z$ . д) Каков фазовый угол  $\varphi$ ? е) Сравните фазы напряжения на зажимах резистора и конденсатора.

7. Нарисуйте схему, в которой конденсатор  $C$  последовательно с резистором  $R=1\text{ Мом}$  подключен к зажимам источника переменного тока  $10\text{ в}$ . Какая потребуется емкость конденсатора  $C$ , чтобы получить равное падение напряжения на резисторе и конденсаторе при частотах  $100\text{ гц}$  и  $100\text{ кгц}$ ?

8. Почему индуктивное и емкостное сопротивления при последовательном соединении взаимно компенсируются? Почему при параллельном соединении компенсируются токи индуктивной и емкостной ветвей?

9. Приведите различие в электрических свойствах между  $R$  и  $X_C$ ;  $R$  и  $X_L$ ;  $R$  и  $Z$ ;  $X_C$  и  $C$ ;  $X_L$  и  $L$ .

10. В чем разница между вольт-амперами и ваттами.

11. Параллельная цепь состоит из следующих пяти ветвей: трех ветвей с активным сопротивлением по  $30\text{ ом}$ , ветви с индуктивным сопротивлением  $600\text{ ом}$  и ветви с емкостным сопротивлением  $400\text{ ом}$ .

а) Нарисуйте схему цепи. б) Каково общее сопротивление цепи? в) Чему равен фазовый угол  $\varphi$ ? г) Какова величина общего тока в неразветвленной части цепи при  $100\text{ в}$  приложенного напряжения?

12. В последовательной цепи переменного тока, состоящей из  $R=20\text{ ом}$ ,  $X_L=40\text{ ом}$  и  $X_C=60\text{ ом}$ , протекает ток  $2\text{ а}$ .

а) Нарисуйте схему цепи. б) Подсчитайте падение напряжения на зажимах каждого элемента. в) Какова величина приложенного напряжения? г) Подсчитайте коэффициент мощности цепи.



Источник электрического тока, в котором химическая энергия преобразуется в электрическую, называется **гальваническим элементом**. Такие элементы иногда называют также **первичными**.

Гальванические элементы просты по устройству, имеют небольшие размеры и вес. Поэтому они получили широкое распространение, несмотря на свою малую мощность.

Всякий гальванический элемент состоит из двух разнородных проводящих пластин (электродов) и электролита. В качестве электродов используются главным образом цинк и медь или цинк и уголь, а в качестве электролита — растворы солей и кислот.

Электролиты являются проводниками электрического тока. Так же как и металлические проводники, они характеризуются проводимостью. Проводимость их называется **ионной**, она прямо пропорциональна числу расщепленных молекул, т. е. количеству ионов в одном кубическом сантиметре.

С возрастанием температуры проводимость электролитов (в отличие от металлов) увеличивается, потому что скорость движения молекул возрастает и некоторые из них при столкновении распадаются на ионы — происходит так называемая ионизация толчками, повышающая проводимость.

Вследствие электрической нейтральности атомов, образующих молекулы, всякий электролит в общей массе электрически нейтрален (так же как и металлический проводник при наличии в нем свободных электронов).

В результате химической реакции, которая происходит между электролитом и погруженными в него электродами, в гальваническом элементе возникает э. д. с. Величина ее не зависит от размеров электродов и количества электролита, она определяется только материалом электродов и химическим составом электролита.

Элемент расходует свою энергию при подключении к его электродам внешней цепи. Как только химическая энергия, запасенная в электролите и электродах, израсходуется, элемент приходит в негодность.

Существует много типов гальванических элементов, но наиболее распространены элементы марганцевой системы с угольно-цинковыми электродами.

## 1. Принцип действия гальванического элемента

Простейший гальванический элемент (рис. 201) состоит из медной (Cu) и цинковой (Zn) пластин, погруженных в раствор серной кислоты ( $H_2SO_4$ ). Медная пластина служит положительным полюсом элемента, а цинковая — отрицательным.

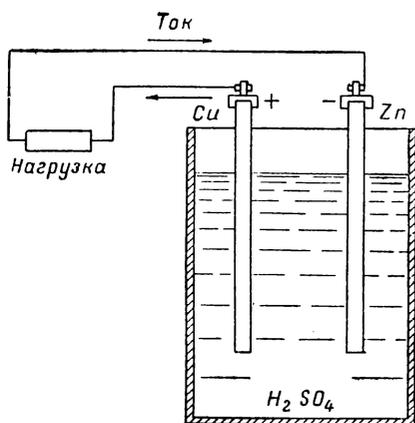


Рис. 201. Простейший гальванический элемент

Известно, что молекула серной кислоты в водном растворе распадается (расщепляется) на два положительно заряженных иона водорода ( $H^+$ ), в котором недостает по одному электрону, и один отрицательно заряженный ион ( $SO_4^-$ ), в котором имеются два избыточных электрона. Между отрицательными ионами, в состав которых входит сера и кислород, и цинковым электродом происходит химическая реакция, в результате которой образуется серноокислый цинк. При этом освобождаются два электрона, которые при расщеплении молекул серной кислоты были «захвачены» у водорода. На цинковой пластине возникает избыток свободных электронов.

При разомкнутой внешней цепи элемента дальнейшая химическая реакция прекращается, поскольку электроны, скопившиеся на цинковой пластине, отталкивают отрицательные ионы. Между медной и цинковой пластинами устанавливается определенная разность потенциалов, которая для данного элемента равна 1,1 в.

При подключении нагрузки во внешней цепи возникает электрический ток, проходящий от медной пластины к цинковой (движение электронов происходит наоборот); внутри элемента ток течет от цинковой пластины к медной. Положительные ионы водорода, находящиеся в электролите, соединяются

на поверхности медного электрода с электронами и образуют пузырьки водорода, которые покрывают пластину тонким слоем. Происходит так называемая **поляризация элемента**.

Наличие пузырьков водорода на медной пластине увеличивает внутреннее сопротивление элемента и создает дополнительную э. д. с. поляризации (слой водорода совместно с медным электродом создает как бы другой элемент), направленную против основной э. д. с. и поэтому ухудшающую электрические свойства элемента.

При замкнутой внешней цепи элемента химическая реакция на цинковом электроде протекает непрерывно, так же непрерывно образуются и свободные электроны взамен уходящих во внешнюю цепь. В цепи устанавливается постоянный ток. Во внешней цепи происходит движение электронов в одном направлении, а во внутренней цепи движение положительных и отрицательных ионов в разных направлениях.

Таким образом, работа гальванических элементов основана на превращении химической энергии в электрическую.

Для практических целей такой элемент непригоден из-за сильного влияния поляризации. Для устранения этого явления положительный электрод элемента окружают веществами, способными поглощать водород, — так называемыми **деполяризаторами**. Ими могут быть вещества, богатые кислородом или хлором. Кислород (или хлор) соединяется с водородом, образуя воду (или соляную кислоту), поэтому пленка из пузырьков водорода на поверхности медной пластины не появляется.

Продолжительность работы элемента на внешнюю нагрузку зависит от величины разрядного тока. Количество электричества в ампер-часах, которое элемент отдает при разряде нормальным током до некоторого конечного напряжения, называется емкостью элемента. Она зависит от его размера, т. е. от массы электродов и количества электролита (в рассмотренном элементе — от массы цинкового электрода, который растворяется в электролите).

Емкость элемента подсчитывается по формуле

$$Q = I_p t, \quad (78)$$

где  $I_p$  — нормальный разрядный ток в цепи элемента в амперах;

$t$  — продолжительность разряда в часах.

## 2. Элементы марганцевой системы

Среди гальванических элементов широко применяются марганцевые (марганцево-цинковые) элементы. Они просты по конструкции и надежны в эксплуатации при различных условиях.

Угольный электрод является положительным полюсом, цинковый — отрицательным; э. д. с. элемента равна 1,45—1,5 в; внутреннее сопротивление (суммарное — электролита и самих электродов) 0,3—3 ом (в зависимости от размеров элемента).

При длительной непрерывной работе элемент поляризуется, но если разомкнуть цепь и дать ему «отдохнуть», то э. д. с. постепенно восстановится почти до прежней величины (выделившийся на положительном электроде водород соединится с перекисью марганца).

Имеются водоналивные и сухие элементы марганцевой системы.

Водоналивной элемент в разрезе изображен на рис. 202. Отрицательным электродом у него служит цинковая коробка, внутри которой помещен угольный стержень с деполяризатором, представляющим собой смесь двуокиси марганца, графита и особой сажи. Для придания деполяризатору большей прочности его обертывают миткалем (тонкой тканью) и обвязывают нитками.

Отрицательным полюсом элемента служит гибкий медный многожильный изолированный проводник, припаянный к одной из стенок цинковой коробки, а положительным полюсом — латунный колпачок, туго насаженный на угольный стержень и имеющий вывод в виде гибкого проводника.

Между стенками коробки и деполяризатором плотно проложена фильтровальная бумага или картон, которые хорошо поглощают раствор электролита при заряде элемента. Для изоляции угольного стержня от цинка на дно коробки кладут парафинированный картон. Сверху деполяризатор засыпают порошком нашатыря, который покрывают картонной прокладкой, после чего элемент заливают изолирующей смолкой до края коробки. Через смолку и картонную прокладку проходят две стеклянные трубки. Одна трубка (большого диаметра) служит для заливки воды при заряде элемента, а другая (меньшего диаметра) — для выхода воздуха при заливке воды и выхода газов при работе элемента.

Снаружи цинковую коробку покрывают слоем парафина и вставляют ее в картонный футляр для защиты от механических повреждений.

Незалитые водоналивные элементы можно хранить длительное время в сухом и прохладном помещении. Чтобы внутрь элемента не попала влага, узкую стеклянную трубку заливают на заводе смолкой, а широкую закрывают пробкой.

На зажимах незалитого элемента не должно быть напряжения. Появление его показывает, что произошел частичный саморазряд вследствие попадания влаги внутрь элемента (из-за использования сырых материалов при изготовлении, хранения в сыром помещении, неплотной закупорки стеклянных трубок).

Такой элемент для длительного хранения непригоден: он будет терять емкость вследствие саморазряда (внутреннего разряда) элемента.

Перед тем как использовать элемент, его необходимо залить чистой водой. Нашатырь, растворяясь в воде, образует электролит. Перед заливкой нужно вынуть пробку из водоналивной трубки и тонкой проволокой или иглой прочистить узкую газоотводную трубку. Заливать электролит желательно водой, имеющей температуру 15—20° Ц. После первой заливки надо дать элементу постоять не менее часа, затем снова доливать воду небольшими порциями до тех пор, пока впитывание не прекратится. Окончив заливку, закрыть широкое отверстие пробкой. Через 5—6 часов элемент приобретает требуемые электрические свойства и готов к эксплуатации.

Электродвижущая сила элемента 1,45—1,5 в, внутреннее сопротивление колеблется от 0,2 ом в начале работы до 3,5 ом в конце. Ниже чем до напряжения 0,7 в элементы разряжать нельзя, так как после такого разряда они становятся практически непригодными.

Внутреннее сопротивление элемента зависит от химического состава веществ, образующих элемент, от размеров элемента, его конструктивного исполнения и степени разряда. Чем больше геометрические размеры элемента, тем меньше его внутреннее сопротивление. В процессе разряда сопротивление элемента повышается.

Водоналивные элементы, залитые водой, при температуре около —18° Ц замерзают и перестают работать. Чтобы они могли работать при более низких температурах (до —40° Ц), их заливают холодостойким электролитом (только новые элементы: доливка холодостойкого электролита в элементы, ранее залитые чистой водой, не дает положительных результатов).

В настоящее время водоналивные элементы используются редко.

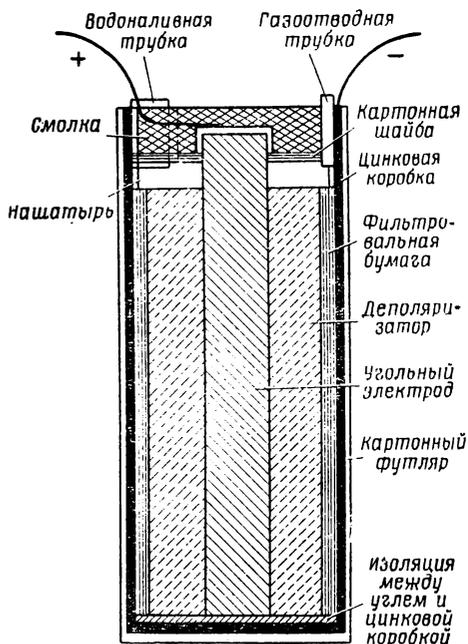


Рис. 202. Устройство водоналивного элемента марганцевой системы

### Сухие элементы

Сухие элементы по своей конструкции мало отличаются от водоналивных (рис. 203). При изготовлении сухого элемента деполяризатор не просушивают, а пропитывают раствором нашатыря. Пространство между цинковой коробкой и деполяризатором заполняют электролитом в виде пасты, состоящей в основном из

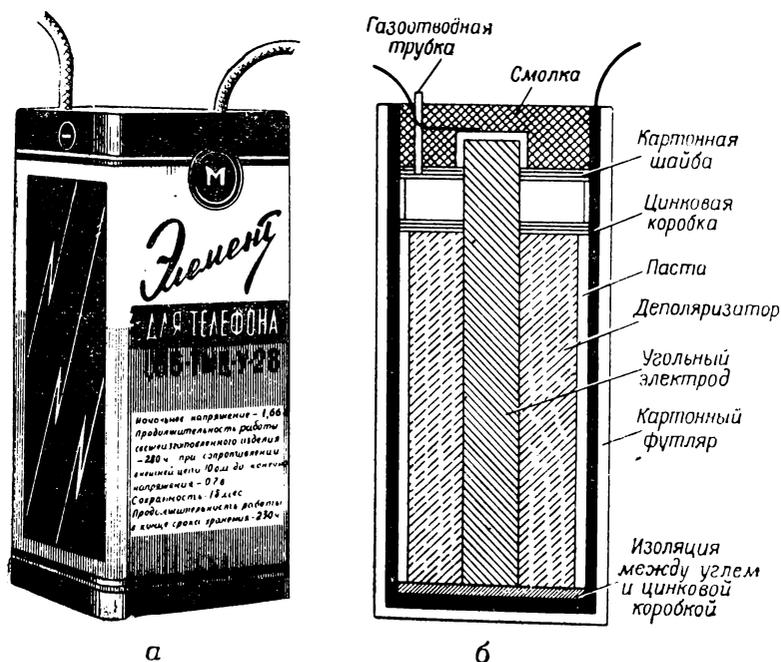


Рис. 203. Сухой элемент марганцевой системы:  
а — внешний вид; б — устройство элемента

раствора нашатыря с примесью небольшого количества хлористого цинка, причем в качестве сгустителя электролита применяют картофельную или пшеничную муку. Введение в электролит хлористого цинка предохраняет пасту от порчи.

Сухие элементы всегда готовы к действию (не нуждаются в заливке водой), в этом их преимущество перед водоналивными. К длительному хранению они непригодны вследствие саморазряда, который происходит все время с момента их изготовления независимо от того, включена внешняя цепь или нет. Объясняется это тем, что в цинковом электроде имеются примеси других металлов, образующие на нем множество короткозамкнутых мельчайших элементов, которые и разрушают электрод.

Электродвижущая сила элемента 1,45—1,5 в, емкость 30 а·ч.

Для уменьшения размеров сухих элементов при одной и той же их емкости изготовляют так называемую набивную конструкцию: пространство для сгущенного электролита ограничивают картонной гильзой с дном, которую хорошо пропитывают электролитом. Объем таких элементов используется более полно.

На смоляной слой набивного элемента (он имеет круглую форму) накладывают еще одну шайбу и края цинкового сосуда зафальцовывают внутрь.

По устройству элементы с воздушно-марганцевой деполяризацией (элементы типа ВМЦ) мало отличаются от сухих элементов марганцевой системы. Деполяризация в них осуществляется двуокисью марганца и кислородом воздуха. В состав деполяризатора входят двуокись марганца, графит и активированный уголь; последний поглощает из воздуха кислород, который и участвует в токообразующей реакции.

Применение смешанной воздушно-марганцевой деполяризации резко повышает емкость элементов благодаря увеличению количества кислорода, поступающего из воздуха. Так как поступление кислорода из воздуха не ограничено, а количество цинка (масса цинковой корбки) берется с запасом, емкость элемента типа ВМЦ ограничивается объемом электролита.

Для свободного доступа воздуха к деполяризатору, который сверху не обвязывают, служат две широкие стеклянные трубки. Во время работы элемента они должны быть открыты, а в остальное время — плотно закрыты пробками для предохранения пасты от высыхания.

В элементы с воздушно-марганцевой деполяризацией запрещается наливать воду или электролит, так как смоченный уголь перестает поглощать кислород воздуха.

Для каждого элемента типа ВМЦ устанавливается максимально допустимый разрядный ток. В случае его превышения емкость электролита резко снижается, поскольку токообразующая реакция с участием кислорода воздуха нормально протекает лишь при сравнительно небольших плотностях тока.

Широкое распространение получили малогабаритные сухие элементы (рис. 204).



Рис. 204. Малогабаритные сухие элементы марганцевой системы

### 3. Соединение элементов в батарее

Источники электрического тока для их совместной работы можно соединять последовательно, параллельно или смешанно.

Несколько соединенных тем или другим образом элементов называются батареей.

**Последовательное  
соединение**

Электродвижущая сила одного элемента равна 1,5 в. Если для питания цепи требуется источник тока с большей э. д. с., то элементы надо соединить последовательно (рис. 205): отрицательный полюс первого элемента — с положительным второго, отрицательный полюс второго — с положительным третьего и т. д.

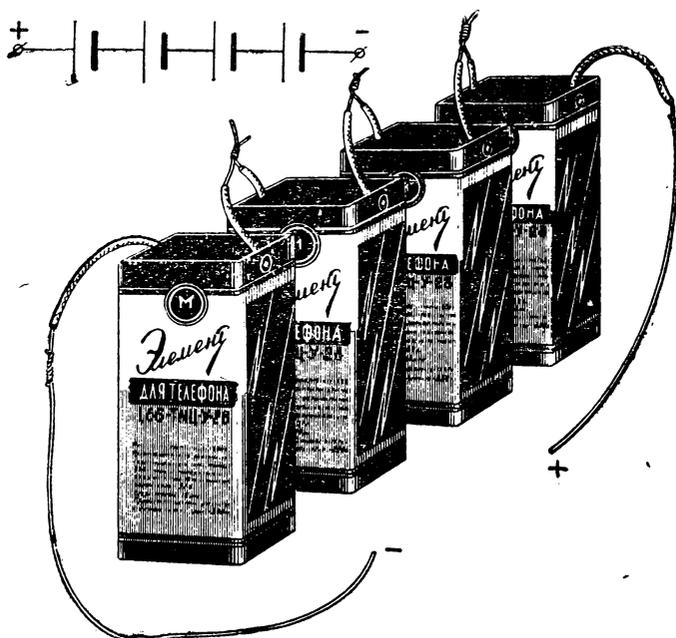


Рис. 205. Последовательное соединение элементов в батарею

При последовательном соединении элементов э. д. с. батареи равна сумме их э. д. с., а внутреннее сопротивление — сумме их внутренних сопротивлений. Емкость же батареи равна емкости одного элемента.

Если батарея состоит из  $n$  одинаковых элементов, то величина тока во внешней цепи определяется по формуле

$$I = \frac{En}{R_{0n} + R}, \quad (79)$$

где  $E$  и  $R_0$  — э. д. с. и внутреннее сопротивление одного элемента;

$R$  — сопротивление внешней цепи.

**Параллельное  
соединение**

При параллельном соединении элементов их положительные полюсы образуют «плюс» батареи, а отрицательные — «минус» (рис. 206). Параллельно можно соединять только однотипные элементы, имеющие одинаковую э. д. с. и одинаковое внутреннее сопротивление, иначе одни элементы будут разряжаться через другие и срок службы батареи сократится.

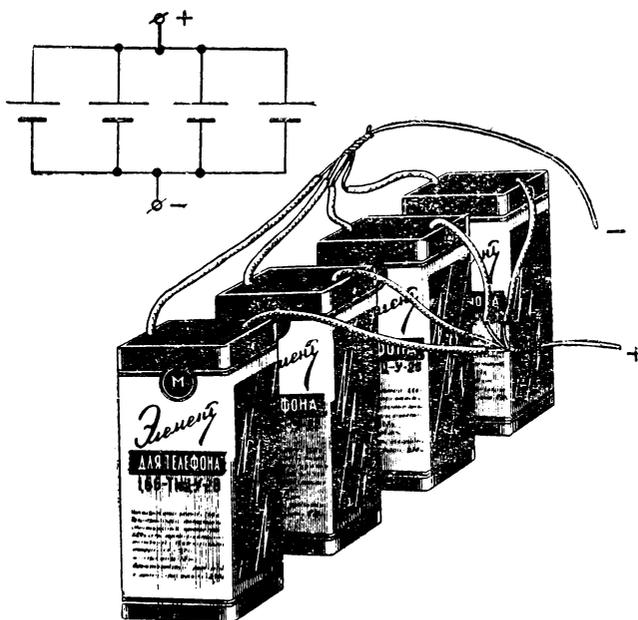


Рис. 206. Параллельное соединение элементов в батарее

При параллельном соединении э. д. с. батареи равна э. д. с. одного элемента. Внутреннее сопротивление батареи уменьшается во столько раз, сколько включено элементов; во столько же раз увеличивается ее емкость.

Ток во внешней цепи

$$I = \frac{E}{\frac{R_0}{n} + R}, \quad (80)$$

где  $n$  — число элементов в батарее.

### Смешанное соединение

При смешанном соединении элементы соединяют последовательно (параллельно) в несколько групп, а группы между собой соединяют параллельно (последовательно). На рис. 207 схематически изображена батарея, которая состоит из двух групп, соединенных параллельно; элементы в каждой группе соединены последовательно.

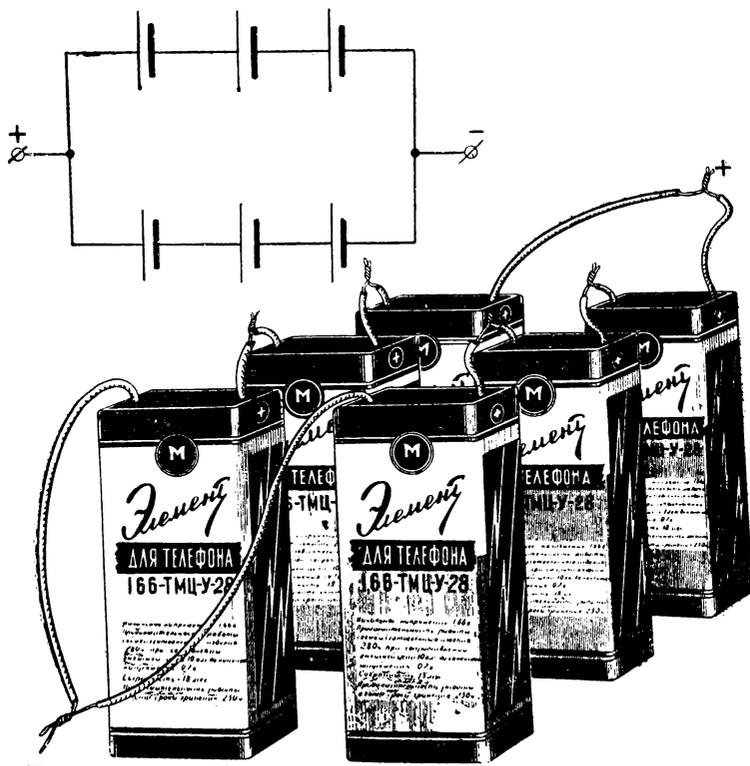


Рис. 207. Смешанное соединение элементов в батарею

Число групп в батарее может быть самое разнообразное, но число элементов в каждой группе должно быть одно и то же.

#### 4. Сухие анодные батареи

Сухие анодные батареи применяются для питания анодных цепей маломощных переносных радиостанций, величина тока в которых не превышает 10—12 ма. Если батареи разряжать большим током, то их емкость резко снизится.

Часто применяются сухие анодные батареи типа 102-АМЦ-1,0 и 68-АМЦ-0,6 (ранее именовались БАС-80 и БАС-60 соответственно). Эти батареи состоят из определенного количества небольших по размеру элементов марганцевой системы, соединенных между собой последовательно. По устройству такой элемент отличается от ранее рассмотренного лишь тем, что цинковый сосуд его имеет цилиндрическую форму (так называемую стаканчиковую конструкцию) и малые размеры, а следовательно, и емкость его меньше.

При сборке элементов в батарею их изолируют один от другого парафинированной бумагой и картоном и размещают в картонной коробке, которую сверху заливают изоляционной смолкой.

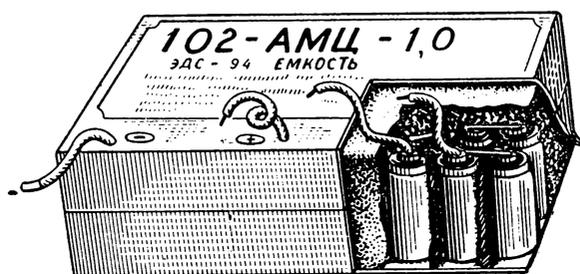


Рис. 208. Устройство сухой анодной батареи АМЦ

Батарея 102-АМЦ-1,0 (рис. 208) имеет четыре вывода: общий «минус», +60 в, +80 в и +100 в. Обычно эта батарея используется для получения 80 в. Это напряжение получается не от всех элементов. Когда в процессе эксплуатации батарея несколько разряжается, дополнительным подключением оставшихся элементов напряжение вновь поднимают до 80 в.

Остальные анодные батареи отличаются от 102-АМЦ-1,0 только числом включенных элементов и их размером.

При работе необходимо следить за правильным соединением батарей между собой и с нагрузкой. Места соединений и свободные выводы должны быть тщательно изолированы.

Не всегда уменьшение напряжения ниже допустимого при длительной и непрерывной работе свидетельствует о непригодности батареи. Напряжение может понижаться и вследствие поляризации. В этом случае батарею не следует выбрасывать, а нужно дать ей «отдохнуть» 2—3 дня; после этого напряжение ее повышается, и она может еще некоторое время работать.

Хранить батареи надо в сухом и прохладном помещении (желательно при температуре около 0°С). Влажность способствует саморазряду батареи, а высокая температура вызывает быстрое высыхание электролита.

При получении батареи со склада необходимо проверить ее напряжение вольтметром, но ни в коем случае не путем короткого замыкания («на искру»). Переносить батареи за выводные концы категорически запрещается.

### Галетные батареи

Наряду с батареями стаканчиковой конструкции наша промышленность выпускает сухие анодные батареи галетного типа. Такое название эти батареи получили потому, что их элементы имеют вид плоских лепешек — галет.

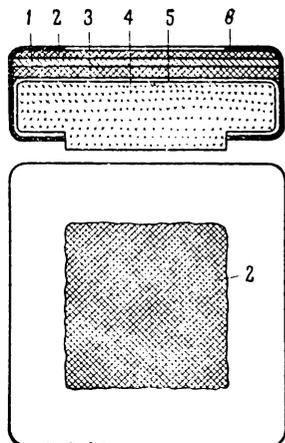


Рис. 209. Устройство галетного элемента:

- 1 — цинковая пластина (отрицательный электрод); 2 — электропроводящий слой;
- 3 — картонная диафрагма, пропитанная электролитом;
- 4 — прессованный брикет (положительный электрод);
- 5 — бумажная прокладка;
- 6 — хлорвиниловое кольцо

Рассмотрим устройство элемента галетной конструкции (рис. 209). Отрицательным электродом служит цинковая пластина 1, покрытая снаружи электропроводящим слоем 2. Этот слой создает надежный контакт с другим элементом батареи и предохраняет элемент от короткого замыкания (не пропускает влаги и электролита). С внутренней стороны на цинковую пластину наложена картонная диафрагма 3, пропитанная электролитом. Положительным электродом элемента служит прессованный брикет 4, состоящий из смеси двуокиси марганца и графита (агломерат). Прессованный брикет частично покрыт тонкой бумагой 5, которая предотвращает попадание крошек агломерата на цинк.

Составные части элемента спрессованы и скреплены тонкой хлорвиниловой пленкой, надеваемой в виде кольца 6. Пленочное кольцо, будучи эластичным, плотно облегает элемент, надежно изолируя его с боковых сторон. Кроме того, оно предотвращает вытекание и высыхание электролита. Торцовые стороны элемента (поверхности электропроводящего слоя и положительного электрода) остаются частично открытыми.

Изолирующая хлорвиниловая пленка очень тонкая. Она обладает свойством пропускать через себя газы, которые образуются в элементе при работе. Это позволяет не делать газовой камеры и газоотводной трубки в элементе, что значительно уменьшает объем элемента и упрощает его конструкцию.

Галетные элементы соединяют в батареи так, чтобы агломерат одного элемента, несколько выступающий над плоскостью галеты, имел хороший контакт с электропроводящим слоем другого элемента. К крайним элементам набранного столбика (блока) прикладывают цинковые пластины с припа-

янными к ним выводными проводниками. На цинковые пластины кладут изолирующие прокладки из парафинированного картона. Для надежности контактов между отдельными элементами блоки стягивают и перевязывают. Готовый блок покрывают парафином и обертывают парафинированной бумагой. Затем блоки соединяют между собой и укладывают в картонный футляр.

Внешне собранные в футляр галетные анодные батареи ничем не отличаются от стаканчиковых — последние только больше.

В галетных батареях активный материал положительного электрода используется лучше, чем в стаканчиковых, у которых до 40% объема занято веществами, не участвующими в токообразующем процессе. Поэтому батареи галетной конструкции обладают относительно большей емкостью. Однако внутреннее сопротивление у них более высокое. Кроме того, в галетных элементах затруднена диффузия электролита, которым пропитаны картонные диафрагмы, что повышает поляризацию электродов; впрочем, при небольших токах нагрузки этот недостаток несуществен.

**Деление по температурному режиму** Гальванические элементы предназначены для работы в различных температурных условиях. Поэтому электролит (паста) и агломератную массу для каждого из них изготавливают по разным рецептам. По конструкции же они ничем не отличаются.

Летние элементы предназначены для работы в интервале температур от  $-20$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ . При температуре, близкой к  $-20^{\circ}\text{C}$ , их емкость не превышает 30—40% номинальной. При более высоких температурах элементы обладают повышенной отдачей, но при этом ускоряется высыхание электролита (пасты) и агломерата, что приводит к преждевременному выходу элемента из строя. Это прежде всего относится к элементам типа ВМЦ, у которых имеются отверстия для доступа воздуха к агломерату.

Холодостойкие элементы предназначены для работы в интервале температур от  $-40$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Около низшей из указанных температур емкость их снижается до 20% номинальной.

Универсальные элементы используются как при низких, так и при высоких температурах (от  $-40$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ).

**Проверка элементов и батарей** В эксплуатацию элементы и батареи поступают со склада после хранения, поэтому перед установкой их нужно проверить.

Наиболее правильно это делать при подключенной нагрузке спустя некоторое время.

Элементы можно испытывать вольтметром с внутренним сопротивлением не менее 1000 *ом* и шкалой на 3 *в*, анодные ба-

тарей — вольтметром с внутренним сопротивлением не менее 50 ком и шкалой на 150—200 в.

Следует иметь в виду, что подключение недоброкачественного элемента может испортить работу всего комплекта питания.

**Маркировка элементов и батарей** дает возможность по условному обозначению определять основные данные элемента и батареи. Первое число по новой системе маркировки обозначает номинальное напряжение. Первая буква (или сочетание двух, а иногда и трех букв) указывает назначение источника тока: А — анодная, С — сеточная, Н — накальная, Ф — фонарная, Т — телефонная, П — приборная, АН — анодно-накальная, АС — анодно-сеточная, СА — слуховая, СН — слуховая накальная, ГР — геологоразведывательная, РЗА — радиозондовая анодная, РЗН — радиозондовая накальная, АНС — анодно-накально-сеточная и т. п.

Элементы различных систем обозначаются следующими сочетаниями букв: МЦ — марганцево-цинковые, ВМЦ — воздушно-марганцево-цинковые, ВДЦ или В — воздушной деполяризации цинковые, МЭО — медноокисные с цинковым отрицательным электродом.

Марганцево-цинковые элементы и батареи по своей конструкции могут быть трех видов: стаканчиковые, галетные и чашечковые. Буквы означают: Г — галетные, Ч — чашечковые. Стаканчиковые дополнительных обозначений не имеют. Буквы Х или У указывают соответственно холодостойкие или универсальные. При отсутствии этих букв тип батареи — «летний». Буква П в обозначениях батарей указывает на то, что выводные провода батареи подведены к панели, в которую вставляется переходная колодка шланга питания. Цифры в конце условного обозначения или перед буквой П соответствуют номинальной емкости в ампер-часах.

Указанное в таблицах время гарантийной сохранности элементов и батарей — это время, в течение которого их можно хранить до начала использования.

Иногда маркировка батарей несколько упрощается (например, «102-А-1», «65-АН-1,3»). Первое число при этом показывает начальное напряжение, число в конце — емкость или продолжительность работы, а буквами обозначается только назначение батарей.

Маркировка элементов и батарей наносится на стенки футляров у элементов и на крышки футляров у батарей. Там же указываются необходимые электрические данные (э. д. с., емкость), а для сухих элементов — дата выпуска заводом и срок сохранности в месяцах (срок, в течение которого электрические данные элементов ухудшаются в пределах установленных норм).

К водоналивным элементам придается краткая инструкция по заливке водой.

Основные данные наиболее распространенных элементов приведены в табл. 12, а сухих батарей — в табл. 13.

Таблица 12

Основные данные некоторых элементов

Обозначение элементов		Начальное на- пряжение, в	Начальная емкость, а·ч	Срок хранения, месяцы	Емкость в конце срока хранения, а·ч	Сопротивление разрядной цепи, ом	Конечное напря- жение, в	Максимальный вес, кг
новое	старое							
1,50-ТМЦ-29,5	ЗС-Л-30	1,5	29,5	18	22,0	10,0	0,7	0,7
1,66-ТМЦ-У-28	ЗС-У-30	1,66	28,0	18	23,0	10,0	0,7	0,7
1,60-ТМЦ-У-8	2КС-У-8	1,6	8,0	12	7,5	10,0	0,7	0,3
1,48-ПМЦ-9	2С-Л-9	1,48	9,0	12	6,0	10,0	0,7	0,3
1,35-ТВМЦ-50	ЗСМВД	1,35	45,0	15	30,0	10,0	0,7	0,6
1,30-НВМЦ-150	6СМВД	1,3	150,0	15	80	5,0	0,7	1,7
1,60-ФМЦ-У-3,2	1КС-У-3	1,6	3,2	12	2,6	10,0	0,7	0,105
1,3-ФМЦ-0,25	ФБС-0,25	1,3	0,25	4	0,14	Ток 150 ма	0,6	0,022

Таблица 13

Основные данные некоторых сухих батарей

Обозначение батарей		Начальное на- пряжение, в	Начальная емкость, а·ч	Срок хранения, месяцы	Емкость в конце срока хранения, а·ч	Сопротивление внешней цепи, ом	Конечное напря- жение, в	Максимальный вес, кг
новое	старое							
102-АМЦ-У-1,0	БАС-80-У-1,0	102	1,0	15	0,75	7000	60	3,0
102-АМЦ-Х-1,0	БАС-80-Х-1,0	102	1,0	15	0,70	7000	60	3,0
68-АМЦ-Х-0,6	БАС-60-Х-0,6	68	0,6	12	0,40	4680	40	1,3
160-АМЦГ-0,35	БАС-Г-60	160	0,35	6	0,24	11700	100	1,8
102-АМЦГ-1,2	БАС-Г-90	102	1,2	12	0,85	7000	60	2,5
100-АМЦГ-У-2,0	БАС-Г-80-У2,1	100	2,0	15	1,6	7000	60	3,35
100-АМЦГ-2,0	БАС-Г-80-Л2,0	100	2,0	15	1,6	7000	60	3,35
70-АМЦГ-У-1,3	БАС-Г-60-У1,3	70	1,3	15	1,05	4680	40	1,6
70-АМЦГ-1,3	БАС-Г-60-Л1,3	70	1,3	15	1,05	4680	40	1,6
4,1-ФМЦ-Х-0,7	КБС-Х-0,7	4,1	0,7	8	0,38	10	2	0,16
3,7-ФМЦ-0,5	КБС-Л-0,5	3,7	0,5	6	0,27	10	2	0,16

**Пример 82.** Батарея состоит из восьми сухих элементов, соединенных последовательно; э. д. с. каждого элемента  $E=1,5$  в. Определить э. д. с. батареи.

**Решение.**

$$E_{\text{бат}} = E_{\text{эл}} n = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ в.}$$

**Пример 83.** Батарея из восьми сухих элементов включена во внешнюю цепь, сопротивление которой  $R=56$  ом; э. д. с. каждого элемента  $E=1,5$  в; внутреннее сопротивление каждого элемента  $R_0=0,5$  ом. Определить ток в цепи и напряжение на зажимах батареи.

**Решение.** По формуле (79)

$$I = \frac{En}{R_0 n + R} = \frac{1,5 \cdot 8}{0,5 \cdot 8 + 56} = \frac{12}{4 + 56} = \frac{12}{60} = 0,2 \text{ а;}$$

$$U = IR = 0,2 \cdot 56 = 11,2 \text{ в.}$$

**Пример 84.** Батарея, состоящая из четырех параллельно соединенных элементов, подключена к внешней цепи с сопротивлением  $R=2,3$  ом; э. д. с. каждого элемента  $E=1,4$  в, внутреннее сопротивление  $R_0=2$  ом. Определить ток в цепи.

**Решение.** По формуле (80)

$$I = \frac{E}{\frac{R_0}{n} + R} = \frac{1,4}{\frac{2}{4} + 2,3} = \frac{1,4}{2,8} = 0,5 \text{ а.}$$

## 5. Некоторые другие элементы и батареи

### Марганцево-магниевые элементы

Характеристики марганцево-магниевых элементов выше характеристик марганцево-цинковых; напряжение их достигает 2 в на элемент, гарантийный срок хранения — до двух лет.

Положительный электрод состоит из смеси пиролюзита, ацетиленовой сажи и хромата бария. Отрицательный электрод выполнен из магниевого сплава и имеет форму стакана. Электролит — бромистый магний.

### Железо-угольные элементы

Стремление удешевить источники тока, заменив цветные металлы менее дефицитными материалами, привело к появлению железо-угольного элемента с воздушной деполаризацией ВДЖ.

Положительным электродом служит смесь активированной угольной пыли с каучуком и парафином, отрицательным — губчатое железо. Электролит — раствор щелочи большой плотности.

Простота конструкции железо-угольных элементов и их эксплуатационная неприхотливость способствуют их широкому применению.

Существенный недостаток этих элементов — невысокое напряжение (0,75 в) и непригодность к работе при температуре ниже нуля.

#### **Окиснортутные элементы**

Появлению окиснортутных элементов в значительной степени способствовало развитие портативной радиоприемной и звукозаписывающей аппаратуры, где вес источника тока и стабильность напряжения во время разряда играют решающую роль.

Положительный электрод состоит из окиси ртути с добавлением графита, отрицательный — из порошка цинка с небольшим количеством ртути. Электролитом служит щелочной раствор.

Благодаря отсутствию токоотводов потери напряжения внутри элемента сведены к минимуму, что позволяет производить разряд относительно большим током без заметного понижения напряжения.

Хорошо работая при повышенной температуре (до +50° Ц), окиснортутные элементы практически неработоспособны уже при температуре —10°.

#### **Наливные элементы**

Очень большую группу гальванических элементов составляют наливные, или, как их еще называют, резервные элементы. Они отличаются от сухих тем, что электролит в них заливают непосредственно перед их использованием, вследствие чего срок хранения наливных элементов, не залитых электролитом, весьма велик — несколько лет. Зато срок службы залитых электролитом элементов в зависимости от их типа колеблется от нескольких минут до 6—9 месяцев.

#### **Атомные батареи**

В атомной электростанции электрическая энергия получается за счет использования тепловой энергии, выделяющейся при делении ядер урана. Электрическую энергию можно получить и не превращая энергию деления ядер в тепловую. В настоящее время уже созданы батареи, непосредственно преобразующие внутриядерную энергию в электрическую.

Имеются два типа атомных батарей: высоковольтные и низковольтные.

Действие высоковольтной батареи основано на использовании явления радиоактивного распада некоторых элементов. Например, радиоактивным элементом может быть стронций 90, который содержится в отходах атомного производства. Стронций 90 — очень активный источник излучения быстрых бета-частиц (электронов). Энергия этих частиц достаточно велика; они могут пролетать в атмосфере большое расстояние и создавать отрицательный потенциал на электроде, находящемся на некотором расстоянии от радиоактивного вещества. Само же радиоактивное вещество, испуская отрицательно заряженные частицы, становится положительно заряженным электродом.

Максимальное напряжение, которое можно получить от атомной батареи, зависит от энергии испускаемых электронов и качества изоляции между электродами; оно может достигать десятков тысяч вольт. Максимальный ток зависит от числа атомов, распадающихся в течение одной секунды. Величина тока этих батарей ничтожно мала.

Рассмотрим принцип работы низковольтной атомной батареи. На поверхности полупроводника, например германия или кремния, наносится слой радиоактивного вещества. Излучаемый этим слоем поток бета-частиц бомбардирует атомы полупроводника, выбивая из него очень большое количество медленных электронов. Так как выбитые электроны в полупроводнике могут двигаться только в одном направлении, то они накапливаются на металлическом коллекторе, приваренном к другой стороне полупроводника. Между коллектором и полупроводником возникает разность потенциалов. Электродвижущая сила такого элемента достигает 0,2 в при величине тока в несколько микроампер.

Характерные особенности атомных батарей — большой срок службы, небольшие размеры, высокая стабильность напряжения и надежность в эксплуатации.

**Солнечные батареи** Солнечная батарея представляет собой устройство, способное превращать солнечную энергию в электрический ток. Рассмотрим солнечную батарею, состоящую из кремниевых пластин. На одну поверхность кремниевой пластины, размером с лезвие безопасной бритвы, путем нагревания в газовой атмосфере наносят весьма чувствительный к свету тонкий слой бора. В результате как бы образуется полупроводниковый прибор, дающий ток под действием солнечных лучей. Напряжение, создаваемое одной пластиной (элементом), — около 0,5 в. Пластины соединяют последовательно; замыкаются они через нагрузку. Срок службы батареи практически неограниченный.

От солнечных батарей, устанавливаемых на искусственных спутниках Земли и космических кораблях, питается вся бортовая аппаратура.

**Печатные батареи** Для питания радиотехнических схем на полупроводниковых приборах применяются печатные батареи.

Электролитом такой батареи служит специальная печатная краска. На изоляционное основание (из специальной бумаги или пластмассы) методом типографского печатания наносят сначала первый слой краски, к которому примешивают мелкие кусочки железа. Под влиянием сильного магнитного поля железные частички располагаются в ряд так, что они начинают касаться друг друга. Когда первый слой высохнет, на него наносят второй слой краски, к которому примешаны мелкие кусочки никеля. Частички никеля также подвергаются воздействию магнитного

поля. В результате получается сухой элемент с электродами из железа (минус) и никеля (плюс). Нанося таким образом слой краски один на другой, можно получить батарею необходимого напряжения. Первый и последний слои служат для подключения батареи к схеме.

## 6. Щелочные аккумуляторы

**Источником тока, в котором первоначально происходит превращение электрической энергии в химическую, а затем — химической в электрическую, называется электрическим аккумулятором** или вторичным гальваническим элементом (так как для превращения в источник тока он нуждается в предварительном заряде).

Аккумулятор сам электрической энергии не производит, он может ее накапливать (аккумуляировать) при заряде. При разряде аккумулятора накопленная электрическая энергия расходуется в подключенной к нему внешней цепи.

Аккумуляторы имеют значительно больший срок службы, чем гальванические элементы. После израсходования химической энергии, запасенной в гальваническом элементе при изготовлении, он приходит в негодность. Химическую энергию аккумулятора можно восстанавливать при заряде. При правильной эксплуатации аккумулятор выдерживает несколько сотен циклов заряда и разряда.

**В зависимости от рода электролита аккумуляторы разделяются на щелочные и кислотные.**

Для питания телефонно-телеграфных цепей и радиостанций широко применяются щелочные аккумуляторы.

**Щелочной аккумулятор** (рис. 210) состоит из стальной банки, в которой находятся залитые электролитом положительные и отрицательные пластины в виде стальных решеток, заполненных активной массой.

Отрицательные пластины размещены между положительными. Чтобы пластины не касались одна другой, между ними вставлены эбонитовые палочки. Положительные пластины соединены отдельно от отрицательных, и их всегда на одну больше, чем отрицательных, для получения большего объема активной массы.

Сверху к банке плотно приварена крышка с тремя отверстиями. В два крайних отверстия выведены болты; один болт, соединенный с положительными пластинами (корпусом) служит положительным полюсом аккумулятора, другой, соединенный с отрицательными пластинами и изолированный от корпуса, — отрицательным полюсом. Через среднее отверстие зали-

вают электролит. Это отверстие закрывают пробкой, которая также имеет отверстие, закрываемое резиновым кольцом. Кольцо не позволяет проникать внутрь аккумулятора воздуху и вместе с тем не препятствует выходу наружу образующимся при работе аккумулятора газам.

### Электролит

Электролитом в щелочных аккумуляторах служит раствор щелочи (едкого кали или едкого натра); этим и объясняется их название.

Плотность электролита зависит от окружающей температуры.

При температуре свыше  $+15^{\circ}\text{C}$  применяют раствор едкого натра плотностью 1,17—1,19 грамма на кубический сантиметр ( $\text{г/см}^3$ ) чистой (дистиллированной) воды. Если дистиллированной воды нет, то можно использовать чистую дождевую или снеговую и вообще любую пресную воду, пригодную для питья.

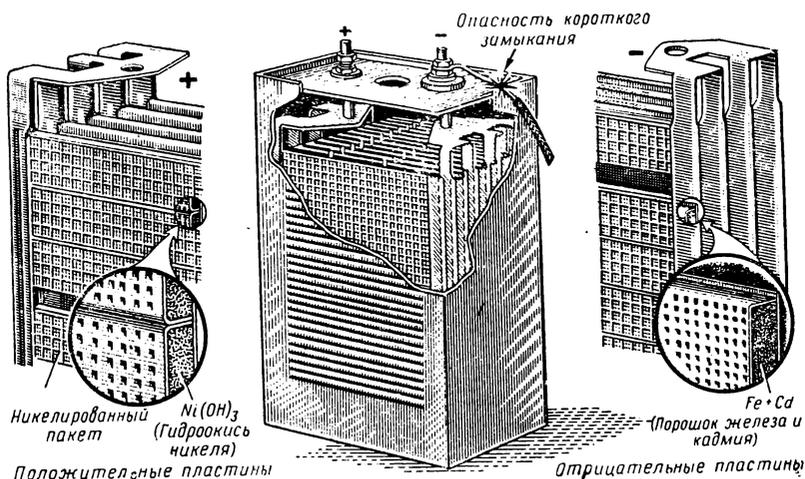


Рис. 210. Устройство щелочного аккумулятора

В этом случае приготовленному электролиту нужно дать отстояться 6—12 ч, чтобы самые вредные примеси (кальций, железо, марганец и др.) осели на дно сосуда, после чего электролит осторожно перелить в другой сосуд, а затем в аккумуляторы.

Если нет едкого натра, то можно использовать едкий кали.

При температуре от  $+15^{\circ}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  применяют раствор едкого кали плотностью 1,19—1,21  $\text{г/см}^3$ , при температуре ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  — раствор едкого кали плотностью 1,27—1,3  $\text{г/см}^3$ .

Для увеличения срока службы щелочного аккумулятора часто в электролит добавляют некоторое количество едкого лития. При этом сопротивление аккумулятора немного увеличивается и

он становится менее пригодным для работы в условиях более низких температур.

Электролит готовят в чистой стальной, чугунной или стеклянной посуде, куда сначала кладут едкий кали, а затем осторожно вливают воду (на 1 кг едкого кали 2 л воды). Раствор перемешивают до полного растворения едкого кали. При этом температура электролита повышается. После того как электролит остынет, нужно измерить его плотность и довести ее до нужной величины. Заливать в аккумулятор горячий электролит (температурой выше 30° Ц) нельзя, так как при этом портится активная масса.

Заливают электролит в аккумулятор через стеклянную воронку. Уровень его должен быть выше верхней кромки пластин на 5—10 мм.

**Если раствор электролита попадет на кожу или одежду, то нужно немедленно смыть его раствором борной кислоты, а затем водой.**

Запрещается пользоваться для приготовления электролита луженой, алюминиево-оцинкованной, медной или свинцовой посудой, а также посудой, в которой готовится электролит для свинцовых аккумуляторов: кислота даже в небольшом количестве разрушает щелочные аккумуляторы.

Углекислота, находящаяся в воздухе, легко соединяется с едким кали, вследствие чего емкость аккумулятора уменьшается, а внутреннее сопротивление его увеличивается. Для предотвращения этого рекомендуется в аккумулятор добавлять несколько капель чистого вазелинового масла, которое образует тонкую защитную пленку. Кроме того, отверстие для заливки электролита необходимо плотно закрывать пробкой при разряде аккумулятора. Несмотря на эти меры предосторожности, углекислота с течением времени проникает из воздуха в аккумулятор и загрязняет электролит. Поэтому через 100 циклов «заряд—разряд» аккумулятора (но не реже одного раза в год) необходимо заменять электролит.

Емкость щелочного аккумулятора определяется по формуле

$$C = It, \quad (81)$$

где  $C$  — емкость в ампер-часах;

$I$  — величина разрядного тока в амперах;

$t$  — время разряда в часах.

Емкость аккумулятора зависит от количества активной массы. Чем больше поверхность пластин, тем больше емкость. От величины разрядного тока емкость практически не зависит.

Коэффициент полезного действия щелочных аккумуляторов равен 0,65. Значит, 65% количества электричества, затраченного на заряд аккумулятора, используется полезно при его разряде, а остальные 35% расходуются бесполезно.

При эксплуатации аккумуляторов следует учитывать так называемый нормальный саморазряд. Заряженный аккумулятор, находясь в бездействии, постепенно разряжается, вследствие чего емкость его уменьшается. Особенно сильный саморазряд наблюдается в течение первого месяца после заряда аккумулятора.

**Электрические данные** Среднее рабочее напряжение щелочного аккумулятора равно 1,25 в. Однако оно не остается постоянным. При заряде оно сначала медленно увеличивается от 1,4 до 1,5 в, затем быстро — до 1,7 в и потом опять медленно — до 1,8 в. При разряде напряжение быстро падает до 1,25 в, затем медленно — до 1,1 в. В случае необходимости щелочной аккумулятор можно без вреда разрядить до напряжения 0,9—0,8 в, но часто это делать не рекомендуется, чтобы не вызвать преждевременного уменьшения емкости.

Проверять степень заряженности аккумулятора необходимо под нагрузкой. Быстрое снижение напряжения аккумулятора при включении нагрузки показывает, что аккумулятор разряжен.

Внутреннее сопротивление аккумулятора в отличие от гальванических элементов очень мало (для одного аккумуляторного элемента составляет около 0,03 ом). К концу разряда оно увеличивается примерно в два раза.

**Типы аккумуляторов** Отечественная промышленность выпускает аккумуляторы различных типов, например НКН-100, НКН-60, НКН-45, НКН-22, НКН-10, АКН-2,25. Первая буква указывает назначение: Н — накальный, А — анодный; вторая и третья буквы (КН) — кадмиево-никелевый, цифрами указывается емкость аккумулятора в ампер-часах.

Аккумуляторы соединяют последовательно в батарее. Общее напряжение батареи равно напряжению одного элемента, умноженному на их число, а емкость равна емкости одного аккумулятора.

На рис. 211 изображены три аккумуляторные батареи: 5НКН-45, 4НКН-10 и 64АКН-2,25. Цифра перед буквами означает число аккумуляторов в батарее.

Величина зарядного тока определяется делением емкости аккумулятора на 4; величина разрядного тока — делением на 8.

В последнее время деревянные ящики для размещения батарей заменяют легкими открытыми металлическими контейнерами (рис. 212).

**Заряд и разряд аккумуляторов** Аккумуляторы заряжают только постоянным током от выпрямительных устройств, преобразующих переменный ток в постоянный, или от генераторов постоянного тока.

При заряде положительный полюс батареи подключают к положительному полюсу источника тока, а отрицательный — к

отрицательному. Если батарею подключить наоборот, то вместо заряда будет происходить ее разряд.

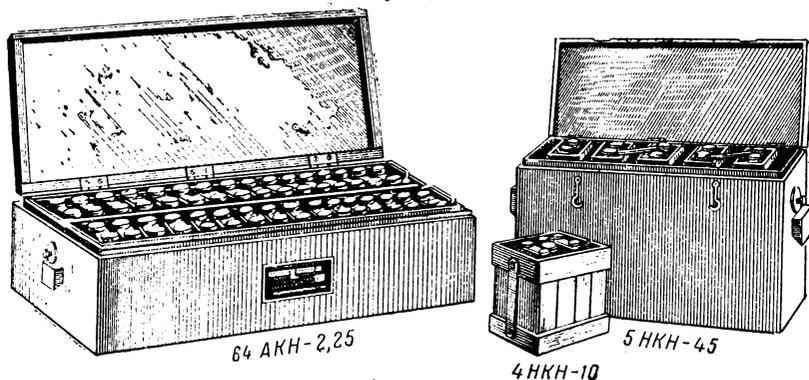


Рис. 211. Общий вид аккумуляторных батарей

Перед зарядом батарею необходимо очистить от налета соли и грязи, затем открыть отверстия для заливки электролита (иначе выделяющиеся при заряде водород и кислород могут покоробить банки) и проверить уровень электролита в аккумуляторах.

Обычно заряд ведут в течение 6 ч током нормальной величины согласно инструкции. При необходимости разрешается ускоренный, 4-часовой заряд: 2,5 ч — током двойной величины и 1,5 ч — нормальным током. Например, аккумулятор емкостью 60 а·ч нужно заряжать 2,5 ч током 30 а и 1,5 ч — током 15 а.

Емкость щелочного аккумулятора при частых недозарядах уменьшается, а перезарядов он не боится. Поэтому лучше аккумулятор перезарядить, чем недозарядить.

Новые аккумуляторы заряжают несколько иначе, чем эксплуатируемые. Впервые залитые аккумуляторы необходимо оставить на 2 ч, чтобы электролит пропитал активную массу пластин, и только после доливки электролита до нормального уровня зарядить. Сначала аккумуляторы заряжают 6 ч током нормальной величины и еще 6 ч

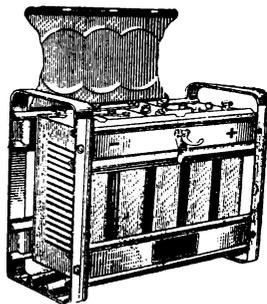
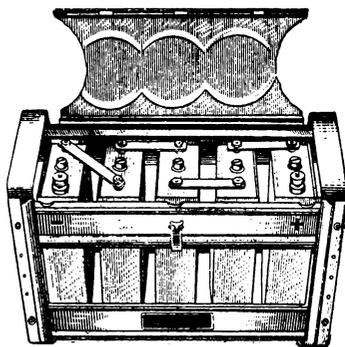


Рис. 212. Общий вид аккумуляторных батарей в металлическом контейнере

током, в два раза меньшим, потом разряжают в течение 4 ч током нормальной величины. После двух — трех таких циклов аккумуляторы годны к эксплуатации.

Примерно через 100 циклов «заряд—разряд», но не реже одного раза в год электролит заменяют. Перед этим аккумуляторы разряжают током нормальной величины в течение 8 ч (до 1 в на каждом аккумуляторе). Старый электролит выливают и аккумуляторы промывают три—четыре раза дистиллированной водой. Затем заливают новый электролит, несколько повышен-

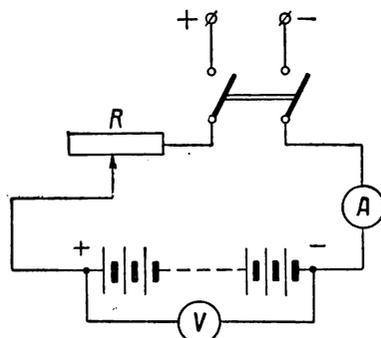


Рис. 213. Принципиальная схема заряда аккумуляторов

ной плотности (вода, оставшаяся внутри банок, разбавит электролит), и ставят аккумуляторы на первичный заряд (6 ч током нормальной величины и 6 ч — половинным).

**Соединение батарей для заряда**

Аккумуляторные батареи заряжают по схеме, изображенной на рис. 213. Сопротивление  $R$  рассчитывается по формуле

$$R = \frac{U - U_6}{I_{\text{зар}}}, \quad (82)$$

где  $U$  — напряжение на зажимах сети;  
 $U_6$  — напряжение на зажимах батареи;  
 $U - U_6$  — падение напряжения на реостате в начале заряда;  
 $I_{\text{зар}}$  — зарядный ток.

Напряжение на зажимах батарей в начале заряда

$$U_6 = 1,4n,$$

где 1,4 — напряжение в вольтах, подводимое к одному аккумулятору в начале заряда;

$n$  — число аккумуляторов.

Определим, сколько аккумуляторных батарей типа 4НКН-45 можно зарядить одновременно от источника тока, напряжение которого  $U = 36$  в и допустимый ток  $I = 25$  а.

К одному аккумулятору (независимо от его емкости) в конце заряда должно быть приложено напряжение 1,8 в (при заряде на морозе 2—2,2 в). Значит, к источнику тока можно подключить  $36 : 1,8 = 20$  аккумуляторов. Таким образом, максимальное число последовательно включаемых аккумуляторов

$$n = \frac{U}{U_{к.з}},$$

где  $U$  — напряжение источника тока;

$U_{к.з}$  — напряжение одного аккумулятора в конце заряда.

Возвратимся к нашему примеру. Мы определили, что можно включить 20 аккумуляторов, а так как батарея типа 4НКН-45

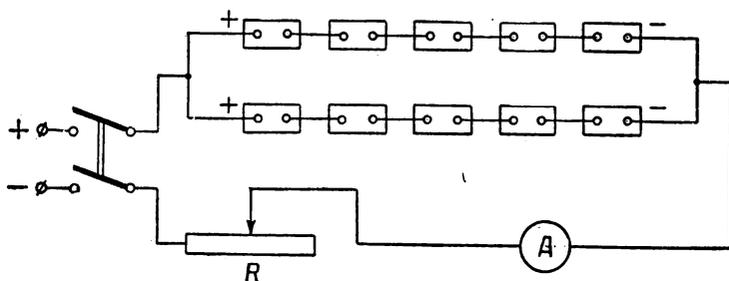


Рис. 214. Схема параллельного включения аккумуляторных батарей для заряда

имеет четыре аккумулятора, значит, для одновременного заряда можно включить пять батарей.

Если ограничиться включением последовательно пяти батарей, то источник тока не будет полностью использован.

Нормальный зарядный ток

$$I_n = \frac{45}{4} \approx 11 \text{ а},$$

а источник тока допускает нагрузку до 25 а. Следовательно, можно параллельно присоединить еще пять батарей типа 4НКН-45 (рис. 214).

Сопротивление реостата по формуле (82)

$$R = \frac{U - U_6}{I_{зар}} = \frac{U - 1,4n}{I_{зар}} = \frac{36 - 1,4 \cdot 20}{22} \approx 0,37 \text{ ом}.$$

При этом через реостат протекает суммарный ток параллельных ветвей 22 а.

При параллельном соединении число аккумуляторов в

ветвях должно быть одинаковым и аккумуляторы должны иметь одну емкость.

#### **Эксплуатация аккумуляторов**

Как уже отмечалось, высокая температура понижает емкость аккумулятора. Особенно вредное действие оказывает на него заряд в жаркое время. Поэтому в жаркое время рекомендуется производить заряд вечером или ночью. Плотность электролита из едкого кали с наступлением жары необходимо снизить до 1,16—1,18 г/см<sup>3</sup>.

Надо избегать ставить аккумуляторы на раскаленные камни, землю, оставлять на солнце.

Так как вода сильно испаряется, необходимо чаще открывать пробки для выпуска газов и доливать электролит или дистиллированную воду.

Аккумуляторы, работающие в условиях низких температур, следует укрывать теплыми тканями. Продолжительность заряда при температуре ниже —10° Ц необходимо увеличить до 7 ч.

### **7. Другие типы аккумуляторов**

Среди щелочных выпускаются кадмиево-никелевые аккумуляторы, например НКН-14, НКН-32, НКН-55, с ламельными тонкими электродами и щелочестойкой хлорвиниловой изоляцией. Расстояние между пластинами в них уменьшено, а число активных пластин и, следовательно, номинальная емкость увеличены.

Хлорвиниловая ткань впитывает в свои поры значительную часть электролита. Благодаря этому, а также путем удлинения пробки удалось создать аккумуляторы, из которых в любом положении электролит не вытекает. Пробка имеет две резьбы — верхнюю и нижнюю. При заряде аккумуляторов пробки вывинчивают на несколько оборотов, улучшая отвод газов наружу. После заряда пробки завинчивают до отказа — аккумулятор готов к работе.

Нормальное время заряда аккумуляторов — 10 ч, однако их можно заряжать в исключительных случаях и ускоренным зарядом в течение 3—4 ч.

#### **Безламельные аккумуляторы**

Безламельные аккумуляторы иногда называют аккумуляторами с повышенной емкостью. Наиболее широкое распространение получили безламельные кадмиево-никелевые аккумуляторы.

Само название «безламельный» говорит о том, что в этом аккумуляторе нет ламелей, т. е. пакетов, которые запрессовываются в пластины. Пластины такого аккумулятора изготовляют прессовкой порошкообразной массы на стальную рамку.

Принцип действия и химические процессы в безламельных аккумуляторах такие же, как и в ламельных.

Изменение конструкции пластин безламельного аккумулятора позволило увеличить его емкость, одновременно уменьшив размеры, а следовательно, и вес.

К недостаткам безламельных аккумуляторов относится небольшой срок их службы и относительно высокая стоимость.

С развитием полупроводниковой техники, которая позволила уменьшить размеры электронных устройств, появилась необходимость в создании малогабаритных источников питания, и прежде всего малогабаритных герметичных аккумуляторов.

В настоящее время промышленность выпускает два типа герметичных кадмиево-никелевых аккумуляторов: дисковые и цилиндрические. И те и другие могут быть ламельные и безламельные.

При нормальной эксплуатации (нормальном зарядном и разрядном токе) ламельные аккумуляторы допускают до 500 циклов заряда — разряда, теряя при этом до 50% емкости.

Нормальное напряжение аккумулятора 1,2 в. Конечное напряжение разряда не должно быть ниже 1 в, иначе емкость аккумулятора снизится и он преждевременно выйдет из строя.

Из дисковых аккумуляторов наиболее широко распространены Д-0,06, Д-0,1 и Д-0,2. Расшифруем для примера название батареи 7Д-0,1: 7 — число аккумуляторов в батарее; Д — дисковый; 0,1 — емкость аккумулятора в ампер-часах.

По конструкции герметичные дисковые аккумуляторы совершенно одинаковы, различаются они только размерами.

Дисковый аккумулятор (рис. 215) состоит из корпуса 1, в котором находятся положительный 5 и отрицательный 6 электроды, разделенные сепаратором 4. Отрицательный электрод прижимается к сепаратору и положительному электроду пружиной 3. Крышка корпуса 2 зафальцована с корпусом 1 через изолирующую прокладку 7.

Свободный объем внутри аккумулятора заполнен строго ограниченным количеством электролита.

Дисковые аккумуляторы герметичны, а поэтому не требуют добавки или смены электролита в течение всего срока службы и хранения.

На емкость аккумуляторов значительно влияет температура окружающей среды. Аккумуляторы предназначены для работы

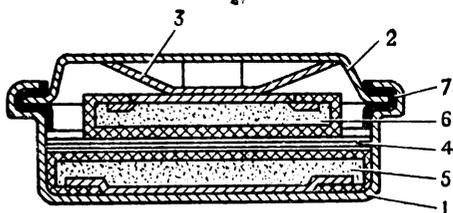


Рис. 215. Разрез дискового аккумулятора:

1 — корпус; 2 — крышка корпуса; 3 — пружина; 4 — сепаратор; 5 — положительный электрод; 6 — отрицательный электрод; 7 — изолирующая прокладка

при температурах от +5 до +50° Ц. При 0° аккумулятор отдает лишь 50% емкости.

В табл. 14 приведены основные характеристики дисковых аккумуляторов.

Таблица 14

Основные характеристики дисковых аккумуляторов

Тип	Емкость, <i>а · ч</i>	Режим заряда		Ток разряда, <i>ма</i> , за время			Вес, <i>г</i>
		ток, <i>Ма</i>	время, <i>ч</i>	10 <i>ч</i>	3 <i>ч</i>	1 <i>ч</i>	
Д-0,06	0,06	5	15	6	20	60	3,6
Д-0,12	0,12	12	15	12	40	120	6,8
Д-0,2	0,2	25	15	20	65	200	14,2

**Цилиндрические аккумуляторы**

Промышленностью выпускаются цилиндрические аккумуляторы следующих типов: ЦНК-0,2; ЦНК-0,45; ЦНК-0,85. Названия их расшифровываются так: ЦНК — цилиндрический, никель-кадмиевый, цифры — емкость аккумулятора в ампер-часах.

Устройство цилиндрического кадмиево-никелевого аккумулятора ЦНК-0,45 изображено на рис. 216.

В отличие от дискового в цилиндрическом аккумуляторе с корпусом связан отрицательный электрод.

Крышка 7 изготовлена из пластмассы, и в нее запрессован вывод положительного электрода. Корпус имеет гофры, благодаря которым между отрицательным электродом и корпусом создаются газовые мешки, предотвращающие повышение давления при заряде аккумулятора.

Температурный диапазон работы цилиндрических аккумуляторов находится в пределах от -10 до +35° Ц.

Относительно невысокая стоимость герметических аккумуляторов, значительные сроки службы и хранения, высокая стойкость к ударным нагрузкам,

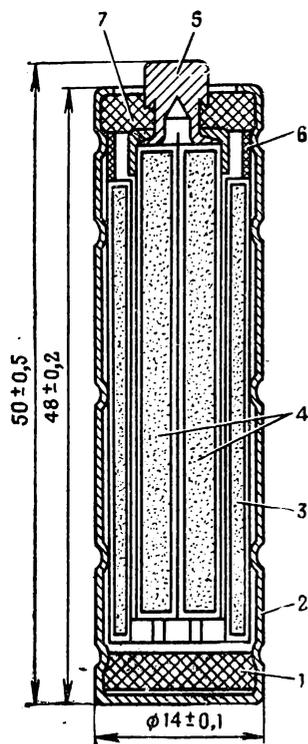


Рис. 216. Аккумулятор ЦНК-0,45:

1 — дно; 2 — корпус сосуда; 3 — отрицательная пластина; 4 — блок положительных электродов с сепарацией; 5 — положительный вывод; 6 — кольцо; 7 — крышка

исключительная простота эксплуатации делают их незаменимыми для питания аппаратуры на транзисторах.

В табл. 15 приведены основные характеристики цилиндрических аккумуляторов.

Таблица 15

Основные характеристики цилиндрических аккумуляторов

Тип	Емкость, <i>а · ч</i>	Режим заряда		Ток разряда, <i>ма</i>			Вес, <i>г</i>
		ток, <i>ма</i>	время, <i>ч</i>	10 <i>ч</i>	3 <i>ч</i>	1 <i>ч</i>	
ЦНК-0,2	0,2	20	15	20	65	200	15
ЦНК-0,45	0,45	45	15	45	150	450	21
ЦНК-0,85	0,85	85	15	85	280	850	41

Рассмотренные выше малогабаритные аккумуляторы могут быть соединены в батареи. Промышленность выпускает следующие батареи, собранные из дисковых и цилиндрических аккумуляторов: 6Д-0,07; 7Д-0,12; 2Д-0,2; 5ЦНК-0,2; 12ЦНК-0,85.

К недостаткам существующих кислотных и щелочных аккумуляторов относятся: небольшая удельная емкость (у кислотных аккумуляторов  $8 \text{ а} \cdot \text{ч/кг}$ , у щелочных — всего  $3 \text{ а} \cdot \text{ч/кг}$ ), сравнительно большой саморазряд, невысокий к. п. д. (особенно у щелочных аккумуляторов), невозможность использования при пониженном атмосферном давлении. Серебряно-цинковые аккумуляторы этих недостатков не имеют.

На рис. 217 показано устройство серебряно-цинкового аккумулятора. Собирают его в пластмассовой банке. Отрицательным электродом служат пластины из смеси окиси цинка и цинкового порошка, положительным — пластины из чистого серебра. Каждая отрицательная пластина помещена в пакет из целлюлозного вещества, имеющего хорошую проницаемость для электролита, а каждая положительная пластина — в капроновую ткань, стойкую к щелочи. Это надежно предохраняет разноименные пластины от короткого замыкания и в то же время создает достаточную площадь соприкосновения электролита с активной массой пластин. При сборке аккумулятора электроды плотно прижимают один к другому и устанавливают непосредственно на дно банки. Ввиду высокой проводимости и прочности материала пластин отпадает надобность в применении специальных решеток. Вибраций и ударов аккумулятор не боится.

Электролитом служит раствор едкого кали. Для работы аккумулятора требуется небольшое количество электролита. Это дает возможность использовать аккумулятор в любом положении — горизонтальном или вертикальном. Во время заряда аккумулятор должен находиться только в вертикальном положении. Пробка водонепроницаема. Открывается она во время заряда.

Нормальное напряжение аккумулятора зависит от величины разрядного тока и в среднем равно 1,5 в. После заряда напря-

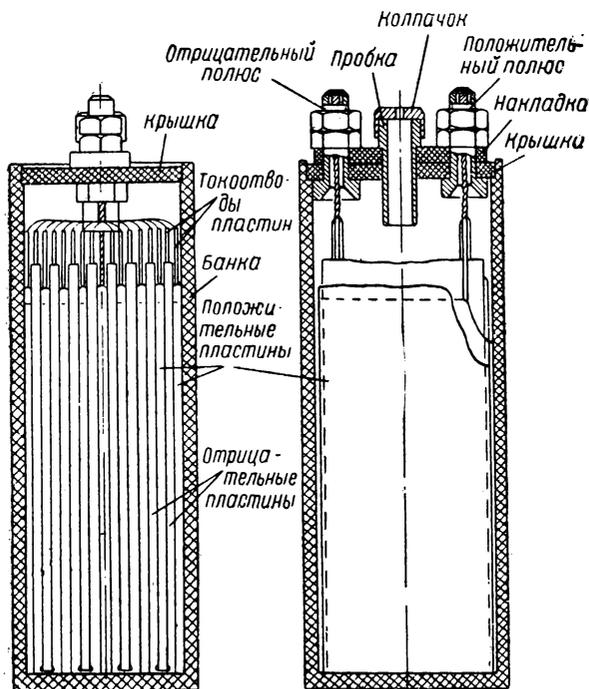


Рис. 217. Устройство серебряно-цинкового аккумулятора

жение достигает 2 в, однако оно быстро снижается до 1,6 в. Заряжается аккумулятор при напряжении 2,1 в. Внутреннее сопротивление его ничтожно — десятитысячные доли ома. В силу незначительного внутреннего сопротивления эти аккумуляторы устойчиво работают при кратковременных разрядах очень большими токами (до 1000 а), при этом напряжение практически остается нормальным.

Обычное время заряда аккумуляторов — 8 ч. Заряд следует прекращать, когда напряжение на каждой банке достигает 2 в.

Недостатки этих аккумуляторов — большая стоимость и относительно малый срок службы.

Нашей промышленностью выпускается большое количество различных типов серебряно-цинковых аккумуляторов и батарей емкостью от 0,5 до 120 а·ч.

## 8. Кислотные аккумуляторы

### Устройство аккумулятора

Кислотный аккумулятор состоит из свинцовых положительных и отрицательных пластин, помещенных в сосуд с водным раствором серной кислоты. Сосуд (бак) изготовляют из материала, не подверженного действию серной кислоты (стекла, эбонита, дерева, целлулоида).

Положительные пластины аккумулятора состоят из свинца, покрытого слоем двуокиси свинца, отрицательные — из чистого губчатого свинца. Поэтому кислотные аккумуляторы иногда называют свинцовыми.

Внешний вид стартерной батареи; состоящей из трех кислотных аккумуляторов, изображен на рис. 218.

Все положительные пластины соединяют параллельно в одну группу (блок), а отрицательные — в другую (рис. 219). От каждой группы делают вывод на крышку банки. Вывод от положительных пластин служит положительным полюсом аккумулятора, вывод от отрицательных — отрицательным полюсом. Отрицательных пластин всегда на одну больше, чем положительных. Положительные пластины вставляют между отрицательными; для предотвращения замыкания их изолируют прокладками.

Разрядный ток кислотного аккумулятора гораздо больше, чем щелочного. Поэтому кислотные аккумуляторы применяются в качестве стартерных (для запуска двигателей внутреннего сгорания). При этом ток (при кратковременной работе) может достигать до десятков и сотен ампер.

С завода стартерные батареи выпускаются без электролита и в таком виде могут храниться до двух лет.

Расшифруем обозначение стартерной батареи 3-СТП-80: цифра 3 — число аккумуляторов в батарее; СТ — стартерная

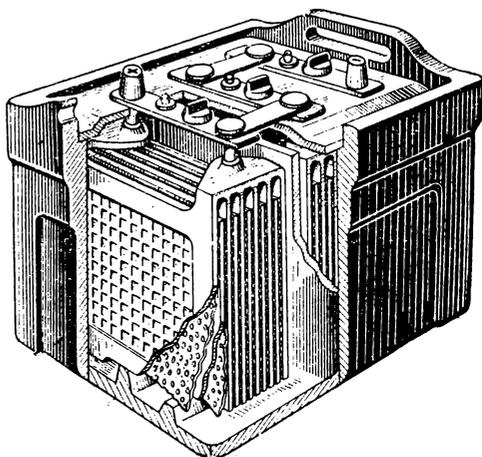


Рис. 218. Общий вид стартерной кислотной аккумуляторной батареи

батарея; П — бак (моноблок) пластмассовый; цифра 80 — емкость батареи в ампер-часах.

Электролит

Электролитом для кислотных аккумуляторов служит серная кислота, растворенная в дистиллированной воде. При необходимости дистиллированную воду можно заменить чистой дождевой водой или водой, полученной от таяния чистого снега. В крайнем случае можно использовать чистую пресную воду (только не хлорированную). От чистоты электролита зависит исправность работы аккумулятора, поэтому вода и кислота не должны содержать вредных примесей.

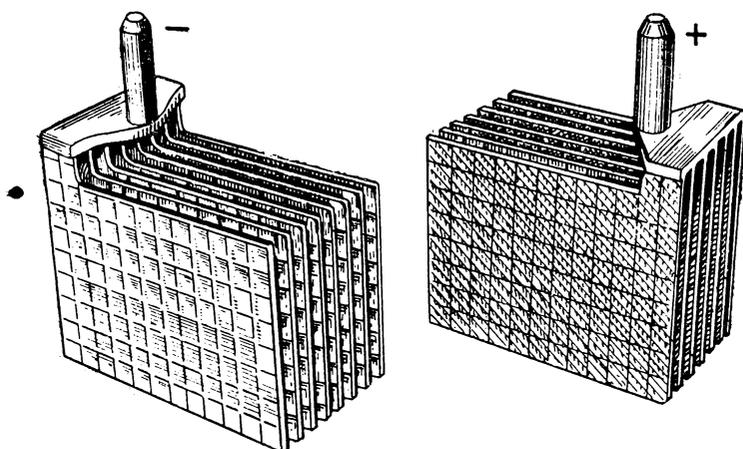


Рис. 219. Пластины стартерного аккумулятора

Серная кислота представляет собой бесцветную густую жидкость с удельным весом (плотностью)  $1,84 \text{ г/см}^3$ . В химическом отношении серная кислота — одна из самых сильных: она обугливает органические вещества, растворяет большинство металлов; попадая на кожу, вызывает сильные ожоги.

В зависимости от назначения аккумуляторов и от окружающей температуры плотность электролита (устанавливаемая заводом-изготовителем) меняется от  $1,12$  до  $1,29 \text{ г/см}^3$ .

Плотность электролита измеряют ареометром. Ареометр (рис. 220) представляет собой стеклянную трубку, расширенную снизу. На дно трубки залито небольшое количество ртути или помещена дробь. Внутри трубки имеется бумажная шкала с делениями, указывающими плотность электролита. Чем меньше плотность электролита, тем больше погружается ареометр, и наоборот.

Приготавливать электролит нужно в чистой стеклянной, свинцовой, пластмассовой, фарфоровой или эбонитовой посуде. Запрещается пользоваться посудой, разъедаемой серной кислотой

(оцинкованной, алюминиевой, медной, луженой). Сначала необходимо налить определенное количество дистиллированной воды, а затем тонкой струйкой осторожно вливать кислоту, размешивая раствор стеклянной или эбонитовой палочкой.

При смешивании серной кислоты с водой выделяется тепло, вследствие чего раствор нагревается. Заливать аккумулятор горячим электролитом (температурой выше  $30^{\circ}\text{C}$ ) нельзя, это уменьшает емкость аккумулятора.

Когда раствор остынет до  $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ , его плотность измеряют ареометром. Если плотность меньше нормальной, то добавляют кислоту, если больше, — воду. После того как плотность элек-



Рис. 220.  
Ареометр

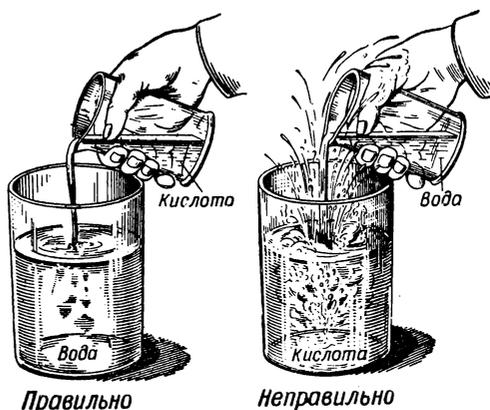


Рис. 221. Правильное и неправильное  
приготовление электролита

тролита станет нормальной, его заливают в аккумулятор. Уровень электролита в банке должен быть выше верхних краев пластин на  $15\text{--}20\text{ мм}$ .

Приготавливая электролит, ни в коем случае нельзя наливать воду в кислоту, потому что при этом капли воды превращаются в пар, кислота разбрызгивается (рис. 221) и, попадая на кожу, вызывает ожог. Для предотвращения ожогов необходимо места, на которые попала кислота, промыть сначала слабым раствором соды, а затем холодной водой и смазать вазелином. Кислоту, попавшую на одежду, нейтрализовать нашатырным спиртом или раствором соды.

Напряжение заряженного аккумулятора в среднем равно  $2\text{ в}$ , причем оно почти не изменяется в течение разряда. Величина э. д. с. аккумулятора зависит от плотности электролита.

Напряжение кислотных аккумуляторов ввиду ничтожно малого внутреннего сопротивления почти равно э. д. с.

Величина внутреннего сопротивления чрезвычайно мала: для аккумуляторов большой и средней емкости — тысячные доли ома, а для аккумуляторов малой емкости — сотые.

Емкость аккумулятора зависит от количества активной массы: чем она больше, тем больше емкость. При увеличении разрядного тока выше нормальной емкость уменьшается. При повышении окружающей температуры выше нормальной (выше  $+25^{\circ}\text{C}$ ) емкость увеличивается (электролит легче проникает в поры активной массы), при понижении — уменьшается. Вследствие постоянного разрушения пластин емкость со временем уменьшается. При снижении емкости до 75% аккумулятор считается негодным.

Саморазряд у кислотных аккумуляторов значительно больше, чем у щелочных, потому что электролит взаимодействует с активной массой пластин. При этом чем выше температура и удельный вес электролита, тем быстрее проходит реакция.

Причиной большого саморазряда служит также разнородность отрицательных пластин.

**Заряд и разряд аккумуляторов** Аккумулятор заряжают током, величина которого указывается заводом-изготовителем. Когда напряжение на заряженном аккумуляторе достигает 2,4 в, величину зарядного тока необходимо снизить реостатом в два раза и продолжать заряд.

Конец заряда определяют по следующим признакам:

— напряжение на зажимах достигает 2,7—2,8 в и больше не повышается;

— электролит начинает «кипеть» вследствие большого выделения газов (идет интенсивное разложение воды, сопровождающееся бурным выделением кислорода и водорода);

— плотность электролита не повышается.

Во время заряда необходимо:

— вентилировать помещение;

— не входить в помещение с огнем или зажженной папиросой (во время заряда образуется гремучий газ, который легко взрывается);

— не допускать повышения температуры электролита больше чем до  $+40^{\circ}\text{C}$ , в противном случае снижать величину зарядного тока или временно прекращать заряд.

Разряжать аккумулятор следует током не выше максимального (указанного в паспортных данных) до напряжения не ниже 1,8 в. С увеличением разрядного тока емкость аккумулятора уменьшается, так как не используются активные массы в глубоких порах пластин. Разряженный аккумулятор нужно ставить на заряд не позже чем через 24 ч после его разряда.

Разряд аккумулятора до напряжения ниже 1,8 в, длительное хранение его в разряженном виде, систематические недозаряды

приводят к увеличению внутреннего сопротивления аккумулятора и уменьшению его емкости.

Проверять степень заряженности аккумулятора следует под нагрузкой, поскольку э. д. с. отключенного разряженного аккумулятора с течением времени поднимается до 2,27 в, но стоит только включить такой аккумулятор на нагрузку, как напряжение его быстро снизится до 1,8 в.

#### Сравнение аккумуляторов

Щелочные аккумуляторы по сравнению с кислотными имеют следующие преимущества:

- имеют более прочную конструкцию;
- не боятся перегрузки;
- не выделяют вредных газов при заряде;
- имеют малый саморазряд; их можно длительное время хранить в полуразряженном или разряженном состоянии.

Недостатки щелочных аккумуляторов:

- меньшее рабочее напряжение;
- меньший коэффициент полезного действия;
- большее внутреннее сопротивление.

#### Краткие выводы

1. Гальванический элемент состоит из двух разнородных проводящих пластин (электродов), погруженных в электролит. Выходное напряжение определяется только материалом электродов и химическим составом электролита. Емкость элемента зависит от его размера, т. е. от массы электродов и количества электролита.

Первичный гальванический элемент перезаряжать нельзя. Аккумулятор (вторичный элемент) можно перезаряжать.

2. Несколько элементов, соединенных последовательно, параллельно или смешанно, называются батареей. При последовательном соединении электродвижущие силы и внутренние сопротивления элементов складываются, а емкость всей батареи остается равной емкости одного элемента. При параллельном соединении  $n$  однотипных элементов общее внутреннее сопротивление всей батареи уменьшается в  $n$  раз, а емкость ее увеличивается во столько же раз, при этом э. д. с. батареи остается равной э. д. с. одного элемента.

3. Наибольшее распространение получили элементы марганцевой системы с угольно-цинковыми электродами. Цинк является отрицательным электродом, уголь — положительным. Э. д. с. элемента равна 1,45—1,5 в.

4. Образование водорода вокруг угольного электрода вызывает поляризацию сухого элемента. Поляризация снижает выходное напряжение. Деполяризация осуществляется двуокисью марганца.

5. К длительному хранению сухие элементы непригодны вследствие саморазряда.

6. Сухие батареи широко используют для питания портативной радиоаппаратуры. Батареи накала имеют низкое напряжение и большую емкость. Анодные батареи имеют высокое напряжение и относительно небольшую емкость.

7. Для питания телефонно-телеграфных цепей и радиостанций широко применяются щелочные аккумуляторы. Рабочее напряжение элемента от 1 до 1,4 в.

8. Разрядный ток кислотного аккумулятора гораздо больше, чем щелочного. Поэтому кислотные аккумуляторы применяются в качестве стартерных (для запуска двигателей внутреннего сгорания). Напряжение аккумулятора в среднем равно 2 в.

9. Заряд щелочных и кислотных аккумуляторов производится от источника постоянного напряжения. Положительный зажим батареи подключается к плюсу источника напряжения, отрицательный зажим — к минусу.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Сухой элемент карманного фонаря 1,5 в:  
а — первичный элемент; б — вторичный элемент; в — имеет неограниченный срок хранения; г — допускает максимальный ток разряда до 200 а.
2. Кислотный аккумулятор 2,2 в:  
а — первичный элемент; б — вторичный элемент; в — имеет неограниченный срок хранения; г — допускает максимальный ток разряда до 150 ма.
3. Образование пузырьков водорода вокруг угольного электрода в сухом элементе представляет:  
а — местное явление, вызываемое нежелательными примесями в электроде; б — поляризацию, вызываемую электролизом; в — деполяризацию, вызываемую двуокисью марганца; г — преимущество, поскольку это увеличивает напряжение элемента.
4. При заряде кислотной батареи:  
а — напряжение батареи должно быть больше, чем напряжение источника; б — соединить положительный зажим батареи с отрицательным зажимом источника напряжения; в — ток заряда должен совпадать с направлением тока разряда; г — соединить положительный зажим батареи с положительным зажимом источника напряжения, а отрицательный — с отрицательным.
5. Элементы соединяются последовательно, чтобы:  
а — увеличить выходное напряжение; б — увеличить емкость батареи; в — уменьшить внутреннее сопротивление батареи; г — уменьшить величину напряжения заряда батареи.
6. Элементы соединяются параллельно, чтобы:  
а — увеличить выходное напряжение; б — увеличить емкость батареи; в — увеличить внутреннее сопротивление батареи; г — увеличить напряжение заряда батареи.
7. Щелочные аккумуляторы по сравнению с кислотными имеют следующее преимущество:  
а — меньшее рабочее напряжение; б — меньший коэффициент полезного действия; в — большее внутреннее сопротивление; г — малый саморазряд; можно длительное время хранить в полуразряженном или разряженном состоянии.

8. Источник напряжением  $45 \text{ в}$  и внутренним сопротивлением  $2 \text{ ом}$  подключен к зажимам проволочного сопротивления. При какой величине сопротивления будет рассеиваться максимальная мощность?  
а —  $0 \text{ ом}$ ; б —  $2 \text{ ом}$ ; в —  $45 \text{ ом}$ ; г —  $\infty$ .

### УПРАЖНЕНИЯ

1. Как соединить шесть кислотных аккумуляторов, чтобы получить напряжение  $12 \text{ в}$ ?

2. В чем преимущество последовательного включения элементов?

3. В чем преимущество параллельного соединения элементов? Почему можно подключать нагрузку к любому из параллельно включенных элементов?

4. Сколько нужно элементов в батарее, чтобы удвоить напряжение и номинальный ток одного элемента? Изобразите на рисунке.

5. Почему напряжение сухого элемента измеряется под нагрузкой?

6. Как включить две кислотные батареи по  $6 \text{ в}$  для заряда от источника напряжения  $7,5 \text{ в}$ ?

7. Почему генератор с очень малым внутренним сопротивлением называется источником постоянного напряжения?

8. Анодная батарея состоит из 60 элементов, соединенных последовательно. Э. д. с. элемента  $1,4 \text{ в}$ , а внутреннее сопротивление  $1 \text{ ом}$ .

Определить общее внутреннее сопротивление батареи, общую э. д. с. и напряжение на зажимах для тока  $0,2 \text{ а}$ ?

9. Автомобильный аккумулятор состоит из трех банок, соединенных последовательно. Э. д. с. каждой банки  $2,15 \text{ в}$ . При токе  $1,5 \text{ а}$  напряжение на зажимах внешнего сопротивления  $6 \text{ в}$ . Какова величина внутреннего сопротивления каждой банки?

10. Два сопротивления  $30$  и  $60 \text{ ом}$ , соединенные параллельно, подключены к двум элементам по  $1,5 \text{ в}$  каждый, соединенным параллельно. Какой ток протекает через каждое сопротивление (внутренним сопротивлением элементов можно пренебречь)?



### 1. Назначение и классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы предназначаются для измерения различных электрических величин.

По принципу действия электроизмерительные приборы бывают следующих основных систем:

- **магнитоэлектрические**, работающие на основе взаимодействия между магнитным полем катушки, по которой проходит ток, и магнитным полем постоянного магнита;
- **электромагнитные**, в которых используется взаимодействие соленоида и стального сердечника;
- **тепловые**, действующие по принципу удлинения проволоки при нагревании ее током;
- **электродинамические**, работающие на основе взаимодействия проводников, по которым проходит ток;
- **термоэлектрические**, в которых используется э. д. с., возникающая при нагревании места спая двух разнородных проводников;
- **индукционные**, основанные на использовании вращающего магнитного поля;
- **электростатические**, действующие по принципу взаимодействия электрически заряженных металлических предметов;
- **вибрационные**, в которых используется механический резонанс металлических пластин под действием переменного магнитного поля.

Электроизмерительный прибор должен удовлетворять следующим требованиям:

- быть достаточно точным;

- давать непосредственный отсчет измеряемой величины в практических единицах;
- потреблять незначительную мощность;
- сразу давать нужное показание (стрелка прибора должна сразу устанавливаться на соответствующее деление шкалы);
- выдерживать перегрузку;
- быть простым и удобным в обращении;
- обладать независимостью показаний от внешних влияний (посторонних магнитных полей, температурных изменений и т. д.);
- иметь по возможности равномерную шкалу;
- иметь приспособление, позволяющее устанавливать стрелку на нуль;
- иметь достаточный срок службы.

Часто измерительный прибор предназначен для определенных целей и может измерять ту или иную величину в известных пределах. Так, например, прибором, предназначенным для измерения постоянного тока, нельзя измерять переменный ток, вольтметром нельзя пользоваться для измерения тока и т. д.

На шкале электроизмерительного прибора обычно имеются условные обозначения, указывающие его систему, название, род измеряемой величины и т. д.

В табл. 16 приведены обозначения некоторых приборов по принципу их действия, в табл. 17 — условные обозначения названий приборов, в табл. 18 — условные обозначения их технических характеристик.

Таблица 16

Условные обозначения некоторых приборов по принципу их действия

Условное обозначение	Система прибора	Условное обозначение	Система прибора
	Магнитоэлектрическая (с подвижной рамкой)		Электродинамическая
	Электромагнитная		Индукционная
	Тепловая (с нагреваемой проволокой)		Электростатическая
			Вибрационная

Таблица 17

## Условные обозначения названий приборов

Условное обозначение	Название прибора и род измеряемой величины	Условное обозначение	Название прибора и род измеряемой величины
A	Амперметр (измеряет ток в амперах)	W	Ваттметр (измеряет электрическую мощность в ваттах)
mA	Миллиамперметр (измеряет ток в миллиамперах)	kW	Киловаттметр (измеряет электрическую мощность в киловаттах)
$\mu$ A	Микроамперметр (измеряет ток в микроамперах)	$\Omega$	Омметр (измеряет сопротивление в омах)
V	Вольтметр (измеряет напряжение в вольтах)	M $\Omega$	Мегомметр (измеряет сопротивление в мегомах)
kV	Киловольтметр (измеряет высокое напряжение в киловольтах)	f	Частотомер (измеряет частоту тока в герцах)

Таблица 18

## Условные обозначения технических характеристик приборов

Условное обозначение	Техническая характеристика прибора	Условное обозначение	Техническая характеристика прибора
—	Служит для измерения постоянного тока	—	При измерениях прибор нужно устанавливать горизонтально
~	Служит для измерения переменного тока	$\angle 60^\circ$	При измерении прибор нужно устанавливать под углом $60^\circ$
II	Служит для измерения постоянного и переменного токов		Изоляция прибора испытана напряжением 1,5 кВ (стрелка <b>красного цвета</b> )
↑	При измерениях прибор нужно устанавливать вертикально		Предостерегающий знак высокого напряжения (стрелка <b>красного цвета</b> )

На рис. 222 в качестве примера приведена шкала микроамперметра ( $\mu\text{A}$ ) типа М93 магнитоэлектрической системы  $\square$ .

Он предназначен для измерения постоянного тока (—) с пределами измерений 0—50  $\mu\text{A}$ ; цена деления шкалы 1  $\mu\text{A}$ . Микроамперметр должен устанавливаться вертикально

( $\perp$ ), измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ ( $\star$ ). Класс точности прибора 1,0, выпуск 1960 года, заводской номер 122.

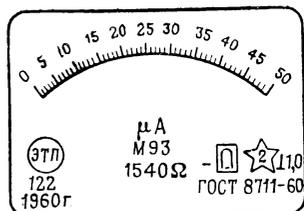


Рис. 222. Шкала электромагнитного амперметра

## 2. Магнитоэлектрические приборы

Магнитоэлектрические приборы предназначены для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока.

Как говорилось выше, работа прибора этой системы основана на взаимодействии магнитного поля подвижной катушки, по которой проходит ток, с магнитным полем постоянного магнита. Следовательно, магнитоэлектрический прибор должен иметь две основные части: неподвижную — магнитную систему и подвижную — катушку.

В магнитную систему входят подковообразный магнит 1 (рис. 223) с полюсными наконечниками 2 и неподвижный стальной цилиндр 3. Цилиндр предназначен для уменьшения сопротивления магнитной цепи между полюсными наконечниками. Благодаря цилиндру в воздушном зазоре между ним и полюсными наконечниками создается сильное и практически равномерное магнитное поле (рис. 224). В неподвижную часть прибора входит магнитный шунт, представляющий собой пластинку из мягкой стали, которую винтом прикрепляют к полюсным наконечникам.

Через магнитный шунт отводится (шунтируется) часть магнитного потока постоянных магнитов. Перемещением шунта достигаются изменение магнитной индукции в воздушном зазоре, а следовательно, подгонка отклонения стрелки по шкале прибора.

Постоянные магниты изготавливаются из специальных сортов стали с высокими величинами задерживающей силы и остаточной магнитной индукции.

Подвижная часть прибора состоит из тонкой алюминиевой рамки 4, на которую намотана изолированная проволока (рис. 223). Рамка может свободно поворачиваться в воздушном

заворе. К оси ее прикреплена стрелка 5 с противовесом 6. С поворотом рамки поворачивается и стрелка.

Кроме стрелки, к оси прикреплены внутренние концы двух спиральных пружин (рис. 225), наружные концы которых прикреплены к неподвижной части прибора. Пружины служат для подведения тока к рамке, противодействия вращению ее при

прохождении тока и для возвращения рамки (стрелки) в первоначальное положение после прекращения тока.

Для установки стрелки на нуль имеется корректор 8 (рис. 223). Установка производится при помощи винта 9, выведенного наружу.

При прохождении тока через катушку рамки возникает магнитное поле. Взаимодейст-

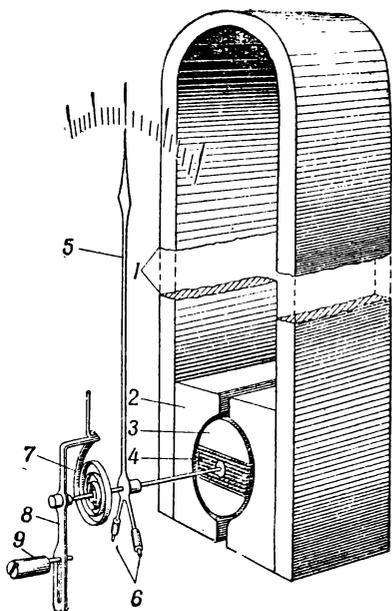


Рис. 223. Устройство магнитоэлектрического измерительного прибора:

1 — подковообразный магнит; 2 — полюсные наконечники; 3 — стальной цилиндр; 4 — подвижная катушка (рамка); 5 — стрелка; 6 — противовесы; 7 — спиральная пружина; 8 — корректор; 9 — винт корректора

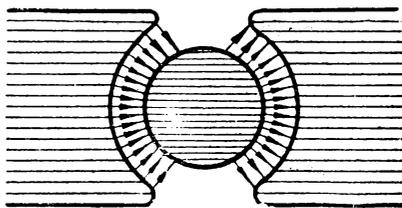


Рис. 224. Магнитное поле в зазоре между полюсными наконечниками и цилиндром

вывая с полем постоянного магнита, оно заставляет рамку поворачиваться до тех пор, пока сила, вращающая рамку, не уравновесится противодействующими силами спиральных пружин. Чем больше ток, проходящий через катушку рамки, тем на больший угол она повернется, т. е. тем больше будет показание стрелки.

Приборы магнитоэлектрической системы имеют шкалу с равномерными делениями, так как угол отклонения стрелки пропорционален величине тока, проходящего по катушке рамки. Эти приборы — наиболее точные из всех.

Стрелка прибора почти без качаний устанавливается против соответствующего деления шкалы. Успокоителем служит сама

алюминиевая рамка, в которой при вращении индуцируется э. д. с., а следовательно, возникает ток. По правилу Ленца направление тока таково, что он препятствует повороту рамки. Когда рамка останавливается, наводимый ток исчезает и не влияет на точность измерения.

Для большей чувствительности прибора рамку делают легкой, а катушку наматывают из тонкой проволоки, через которую можно безопасно пропускать только небольшой ток (несколько миллиампер). **Для расширения пределов измерения магнитоэлектрические амперметры используются с шунтами, а вольтметры — с добавочными сопротивлениями**, о чем подробно сказано ниже.

Направление вращения рамки зависит от направления тока в катушке, поэтому магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения постоянного тока. При изменении направления тока стрелка прибора отклоняется в противоположном направлении. Это позволяет делать магнитоэлектрические приборы с двусторонней шкалой (с нулем в середине шкалы). При наличии односторонней шкалы необходимо соблюдать полярность включения (на одном из зажимов прибора стоит знак «+»), иначе можно погнуть стрелку.

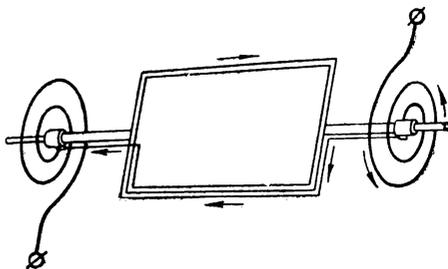


Рис. 225. Прохождение тока в рамке

При включении магнитоэлектрического прибора в цепь переменного тока стрелка его будет только дрожать, оставаясь на нуле. В сочетании же с преобразователями и выпрямителями эти приборы широко используются для измерений в цепях переменного тока.

Достоинства магнитоэлектрических приборов:

- высокая чувствительность и точность показаний;
- равномерная шкала;
- малое потребление энергии;
- стрелка прибора при измерении устанавливается на соответствующее деление шкалы плавно, без качаний.

Недостатки магнитоэлектрических приборов:

- боязнь перегрузок вследствие малого сечения токопроводящих спиральных пружинок и провода катушки;
- возможность измерения только постоянного тока.

### 3. Электромагнитные приборы

Электромагнитные приборы используются для измерения напряжения и тока. Действие их основано на использовании явления втягивания стального сердечника в катушку при прохождении по ней тока.

На рис. 226 показан прибор, состоящий из неподвижной катушки 1, провод которой намотан на рамку, имеющую узкую щель 2. Концы катушки подведены к зажимам 3, служащим для подключения прибора при измерениях.

Когда ток проходит по катушке, вокруг нее создается магнитное поле и пластинка 4 втягивается в щель. Эта пластинка сделана из мягкой стали и эксцентрично укреплена на оси 5. На этой же оси укреплены: стрелка 6 с противовесом 7, предназначенным для уравновешивания подвижной системы; поршень 8 воздушного успокоителя; спиральная пружина 9, служащая для противодействия втягиванию стальной пластинки 4 в щель и для возвращения подвижной системы в исходное положение.

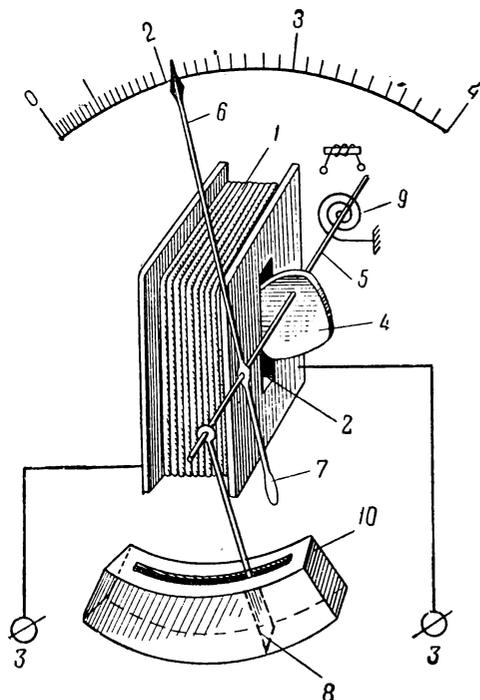


Рис. 226. Устройство электромагнитного измерительного прибора:

1 — неподвижная катушка; 2 — щель; 3 — зажимы; 4 — стальная пластинка; 5 — ось; 6 — стрелка; 7 — противовес; 8 — поршень воздушного успокоителя; 9 — спиральная пружина; 10 — камера успокоителя

Воздушный успокоитель состоит из металлической камеры 10 и поршня 8. Так как поршень связан с осью подвижной системы, то при своем движении он встречает сопротивление воздуха, чем и достигается успокоение стрелки.

Корректор электромагнитного прибора ничем не отличается от корректора магнитоэлектрического прибора, поэтому на рисунке он не показан.

Втягивающее усилие катушки, действующее на сердечник (пластинку), зависит от напряженности магнитного потока (т. е. от тока в катушке) и от магнитной индукции в стальном сердечнике. Величина магнитной индукции зависит от тока по сложному закону. Поэтому при возрастании тока стрелка отклоняется неравномерно: сначала медленно, затем быстрее и опять медленно. Следовательно, электромагнитные приборы имеют неравномерную шкалу.

При изменении направления тока в катушке меняются направление магнитного потока в щели и полярность намагничи-

вания стальной пластинки. Направление силы, действующей на подвижную систему, остается прежним, и стальная пластинка поворачивается в ту же сторону. Таким образом, электромагнитные приборы можно использовать для измерения постоянного и переменного (низкой частоты) токов. Однако прибор, отградуированный для измерения постоянного тока, дает большие погрешности при включении его в цепь переменного тока. Наоборот, прибор, отградуированный для измерения переменного тока, дает большие погрешности при измерении постоянного тока.

Достоинства электромагнитных приборов:

— возможность измерения постоянного и переменного токов;

— способность выдерживать большие перегрузки;

— простота конструкции;

— механическая прочность.

Их недостатки:

— неравномерность шкалы;

— стрелка не сразу устанавливается против соответствующего деления шкалы (она некоторое время колеблется);

— меньшая точность измерения по сравнению с магнитоэлектрическими приборами;

— зависимость показаний от внешних магнитных полей.

#### 4. Тепловые электрические приборы

Тепловые электрические приборы используются для измерения напряжения и тока. Действие их основано на использовании явления удлинения проводника при нагревании его током. По удлинению проводника можно судить о величине проходящего по нему тока.

Основная часть теплового прибора — кусок тонкой проволоки из специального сплава, натянутой между зажимами *A* и *B* (рис. 227). К этой проволоке в точке *B* прикреплена другая, закрепленная вторым концом на корпусе прибора (в точке *Г*). К вертикальной проволоке *BГ* в точке *Д* привязана одним концом шелковая нить, которая перекинута вокруг ролика *P*, а другим концом нить привязана к плоской пружине *ЕЖ*. Пружина *ЕЖ* натягивает проволоки *АВ* и *ВГ*. Ролик *P* и стрелка насажены на одну ось.

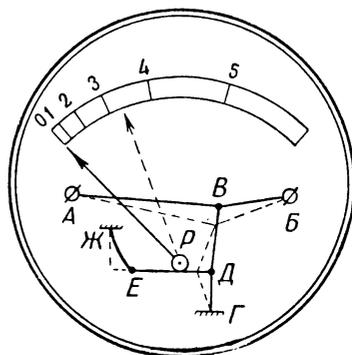


Рис. 227. Устройство теплового электроизмерительного прибора

При прохождении тока по проволоке  $AB$  (при помощи зажимов  $A$  и  $B$  прибор включается в электрическую цепь) она нагревается и удлиняется. Натяжение ее уменьшается и пружина  $EЖ$  перемещает шелковую нить влево, поворачивая ролик, а вместе с ним и стрелку прибора вправо (это положение стрелки показано пунктиром на рис. 227).

Удлинение нити пропорционально квадрату величины тока, поэтому и шкала прибора имеет неравномерные деления: в начале шкалы они сжаты, а затем постепенно расширяются.

После выключения прибора из цепи проволока  $AB$  постепенно охлаждается и укорачивается. Стрелка прибора приходит в исходное положение — на нуль. Первоначальная установка стрелки на нуль производится натяжением или ослаблением проволоки  $AB$  при помощи корректора.

По тонкой проволоке  $AB$  можно пропускать сравнительно небольшие токи. Для расширения пределов измерения применяются шунты и добавочные сопротивления.

Достоинства тепловых приборов:

- возможность измерения постоянного и переменного токов (низкой и высокой частоты);
- независимость показаний от внешних магнитных полей;
- стрелка устанавливается на соответствующее деление шкалы плавно, без качаний.

Их недостатки:

- неравномерность шкалы;
- боязнь перегрузок;
- большее по сравнению с другими приборами потребление энергии;
- зависимость показаний от окружающей температуры.

## 5. Электродинамические приборы

Электродинамические приборы используются для измерения напряжения, тока и мощности.

Работа этих приборов основана на взаимодействии проводников, по которым проходит электрический ток.

Электродинамический прибор (рис. 228) состоит из неподвижной  $1$  и находящейся внутри нее подвижной  $2$  катушек, стрелки  $3$ , поршня  $4$  воздушного успокоителя и двух спиральных пружин  $5$ . Последние подводят ток к подвижной катушке, противодействуют ее вращению при прохождении тока и возвращают катушку (стрелку) в первоначальное положение после выключения прибора.

При прохождении тока по катушкам вокруг них создаются магнитные поля, которые, взаимодействуя, заставляют поворачиваться подвижную катушку, а с нею вместе и стрелку прибора.

Чем больше ток, проходящий через катушки, тем на больший угол повернется подвижная катушка. Так как сила, отклоняющая ее, пропорциональна произведению величин токов в катушках, то приборы этой системы имеют неравномерную шкалу.

Если направление тока в обеих катушках меняется одновременно, то направление вращения подвижной катушки остается неизменным. Поэтому электродинамические приборы пригодны для измерения постоянного и переменного токов.

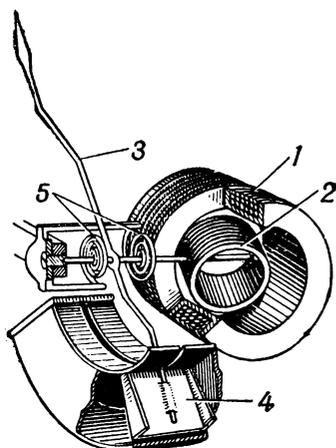


Рис. 228. Устройство электродинамического измерительного прибора:

1 и 2 — неподвижная и подвижная катушки; 3 — стрелка; 4 — поршень успокоителя; 5 — спиральные пружины

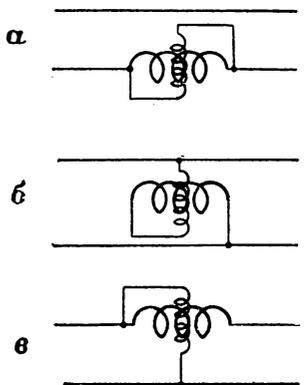


Рис. 229. Включение обмоток электродинамических приборов:

а — параллельное; б — последовательное; в — для измерения электрической мощности

Колебания стрелки гасятся воздушным успокоителем. Установка стрелки на нуль — такая же, как у магнитоэлектрических и электромагнитных приборов.

Сопротивление неподвижной катушки невелико, так как она намотана толстым проводом; сопротивление подвижной катушки очень велико — она состоит из большого числа витков тонкой проволоки.

Амперметры должны иметь небольшое внутреннее сопротивление, поэтому обмотки электродинамических приборов соединяют параллельно и включают в цепь так, как показано на рис. 229, а. Вольтметры, наоборот, должны иметь большое внутреннее сопротивление, поэтому их обмотки соединяют последовательно, а прибор включают в цепь параллельно (рис. 229, б).

Если неподвижную катушку включить последовательно, а подвижную — параллельно внешней цепи (рис. 229, в), то магнитный поток первой катушки будет пропорционален току, а второй — напряжению. Угол поворота подвижной катушки будет

**пропорционален расходуемой в цепи мощности**, т. е. электродинамический прибор может служить ваттметром. Ваттметр имеет четыре зажима. К двум его зажимам, обозначаемым обычно буквой *A*, подведены концы толстой обмотки, к двум другим, обозначаемым *V* или *E*, — концы тонкой обмотки.

Неправильное включение ваттметра может привести к перегоранию обмотки неподвижной катушки.

Амперметры и вольтметры электродинамической системы используются главным образом в качестве контрольных приборов для измерений в цепях переменного тока (низкой частоты). Широкого распространения эти приборы не получили, так как они дороже простых электромагнитных приборов. Почти не применяются они и для измерения постоянного тока. По сравнению с магнитоэлектрическими приборами они дороже и никаких преимуществ не имеют.

Ваттметры электродинамической системы широко используются для измерения мощности в цепях постоянного и переменного токов.

Достоинства электродинамических приборов:

- возможность измерения постоянного и переменного токов;
- достаточная точность.

Их недостатки:

- чувствительность к внешним магнитным полям;
- неравномерность шкалы;
- боязнь перегрузок;
- высокая стоимость.

## **6. Термоэлектрические приборы**

Термоэлектрические измерительные приборы применяются главным образом для измерения тока высокой частоты — от 0,3 до 6 *Мгц*. При частотах выше 6 *Мгц* они служат индикаторами тока. Приборы пригодны также для измерения тока промышленной частоты.

Термоэлектрический прибор состоит из чувствительного прибора магнитоэлектрической системы и термопары.

**Термопарой называются спаянные между собой разнородные металлы, способные при нагревании места спая создавать э. д. с., которую принято называть термоэлектродвижущей силой (т. э. д. с.).** Последняя имеет постоянное направление, а величина ее зависит от материала проволоки, образующих термопару, и от температуры спая.

Термопары изготавливаются из различных металлов. Наиболее распространены пары: медь — константан, железо — константан, висмут — сурьма.

На рис. 230 схематически изображен термоэлектрический прибор. Измеряемый ток, проходя через проволоку (подогреватель) *I—2*, нагревает ее. В термопаре *3* возникает т. э. д. с., ко-

торая вызывает появление тока в цепи миллиамперметра. Величина термотока пропорциональна т. э. д. с., а та — измеряемому току. Поэтому по показаниям миллиамперметра можно судить о величине тока, проходящего через подогреватель.

Термоэлемент обычно помещают в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Два зажима служат для присоединения термоэлемента к электрической цепи, а два других зажима — для присоединения измерительного прибора (миллиамперметра, вольтметра или гальванометра).

Достоинства термоэлектрических приборов:

- возможность измерения постоянного и переменного токов (в том числе и высокой частоты);

- большая точность;

- высокая чувствительность.

Их недостатки:

- неравномерность шкалы;

- боязнь перегрузок и механической встряски;

- малый срок службы.

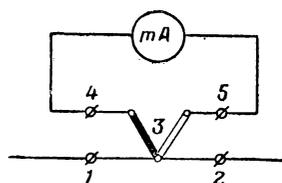


Рис. 230. Схема термоэлектрического измерительного прибора:

1—2 — токопроводящая проволочка (подогреватель);  
3 — термопара; 4 и 5 — зажимы миллиамперметра

## 7. Электрические измерения

### Измерение тока

Ток в цепи в зависимости от его величины измеряют амперметром, миллиамперметром или микроамперметром.

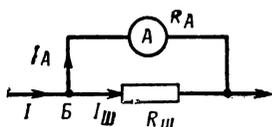


Рис. 231. Подключение шунта к амперметру

Амперметр включается в цепь последовательно, чтобы весь измеряемый ток проходил через прибор. Амперметр должен иметь очень малое сопротивление. Только при этом условии его включение в цепь не вызовет уменьшения измеряемого тока.

Для измерения постоянного тока обычно применяют магнитоэлектрические приборы (как наиболее точные), через которые можно пропускать лишь небольшие токи (десятые и сотые доли ампера). Для измерения больших токов к этим приборам подключают шунты.

**Шунтом называется сопротивление, включаемое параллельно измерительному прибору (рис. 231).** Ток, подходя к точке Б,

разветвляется. Часть его идет через прибор, а часть — через шунт. Величины тока, разветвляющегося в ту и другую ветвь, обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей. Сопротивление

шунта  $R_{ш}$  всегда меньше сопротивления прибора  $R_A$ , поэтому большая часть тока идет через шунт. Если известны сопротивления шунта и прибора, то можно подсчитать общий ток. Если шунт подключен внутри прибора, то шкалу градуируют непосредственно в единицах общего тока.

Для расширения пределов измерения<sup>1</sup> амперметра ему при­дается несколько шунтов.

Чтобы выбрать необходимый шунт, нужно уметь его рас­счи­тать. Для этого пользуются формулой

$$R_{ш} = \frac{I_A}{I_{ш}} R_A, \quad (83)$$

где  $R_{ш}$  и  $R_A$  — сопротивления шунта и прибора;

$I_{ш}$  и  $I_A$  — токи шунта и прибора.

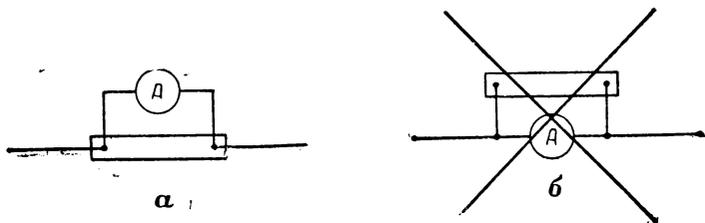


Рис. 232. Включение амперметра с шунтом:  
а — правильное; б — неправильное

Часто расчетную формулу выражают так:

$$R_{ш} = \frac{1}{n-1} R_A,$$

где  $n$  — число, показывающее, во сколько раз измеряемый ток больше тока, проходящего по прибору ( $n = \frac{I}{I_A}$ ).

Измеряемый ток  $I = nI_A$ .

На рис. 232, а показано правильное включение шунта, а на рис. 232, б — неправильное. Включать шунт, как показано на рис. 232, б, нельзя по двум причинам. Во-первых, при этом сопротивление соединительных проводов складывается с сопротивлением шунта, которое может быть очень малым, в результате чего нарушится соотношение между сопротивлениями амперметра и шунта. Во-вторых, при обрыве соединительных проводов можно сжечь катушку амперметра (весь измеряемый ток пойдет через прибор).

<sup>1</sup> Пределом измерения амперметра называют наибольшую величину тока, которую можно измерить (т. е. величину тока, которой соответствуют последние деление и цифра шкалы).

**Пример 85.** Магнитоэлектрический прибор на 50 мка имеет сопротивление 1000 ом. Определить сопротивление шунта, чтобы расширить пределы измерения прибора до 500 мка.

Решение. По формуле (83)

$$R_{\text{ш}} = \frac{I_A}{I_{\text{ш}}} R_A = \frac{50}{450} \cdot 1000 = \frac{1}{9} \cdot 1000 = 111,1 \text{ ом.}$$

## Измерение напряжения

Напряжение в зависимости от величины измеряют вольтметром, киловольтметром или милливольтметром.

**Вольтметр включают параллельно тому участку цепи, на котором требуется измерить напряжение.** Если нужно определить падение напряжения на резисторе  $R$  (рис. 233), то параллельно этому резистору включают вольтметр. Образуются два включенных параллельно сопротивления —  $R$  и  $R_V$  ( $R_V$  — внутреннее сопротивление вольтметра). Так как напряжение на зажимах резистора и вольтметра одинаково, то задача измерения сводится к определению тока, проходящего через вольтметр. Внутреннее сопротивление вольтметра известно, поэтому, определив ток, можно найти напряжение между интересующими нас точками:

$$U = IR_V.$$

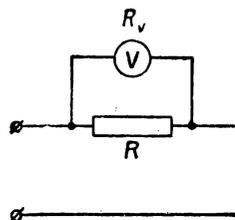


Рис. 233. Включение вольтметра

Эти вычисления при измерении напряжения не производятся, шкала вольтметра проградуирована непосредственно в вольтах.

Вольтметр — это по существу амперметр с большим внутренним сопротивлением. Сопротивление берут большим для того, чтобы включение вольтметра не вносило заметных изменений в сопротивление участка (а значит, и в напряжение), на котором измеряется падение напряжения. При большом сопротивлении вольтметра уменьшается также бесполезная трата энергии внутри прибора.

Для измерения напряжения (как и для измерения тока) в цепях постоянного тока обычно применяют магнитоэлектрические приборы как наиболее точные.

**Для расширения пределов измерений вольтметра последовательно с ним включают добавочное сопротивление, чтобы через подвижную систему прибора проходил ток, не превышающий нормальной (допустимой) величины. Добавочные сопротивления можно включать внутри прибора или снаружи. Меняя их, одним и тем же прибором можно измерять различные напряжения.**

На рис. 234, б добавочное сопротивление  $R$ , включенное последовательно с миллиамперметром, образует вольтметр. При напряжении  $10 \text{ в}$  оно обеспечивает полное отклонение стрелки прибора. В данном случае шкала  $10 \text{ в}$  соответствует шкале  $1 \text{ ма}$  (рис. 234, в).

Добавочное сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_d = \frac{U_{п.ш}}{I_{п.ш}} - R_V, \quad (84)$$

где  $R_d$  — добавочное сопротивление;  
 $R_V$  — сопротивление прибора;  
 $U_{п.ш}$  и  $I_{п.ш}$  — напряжение и ток полной шкалы.

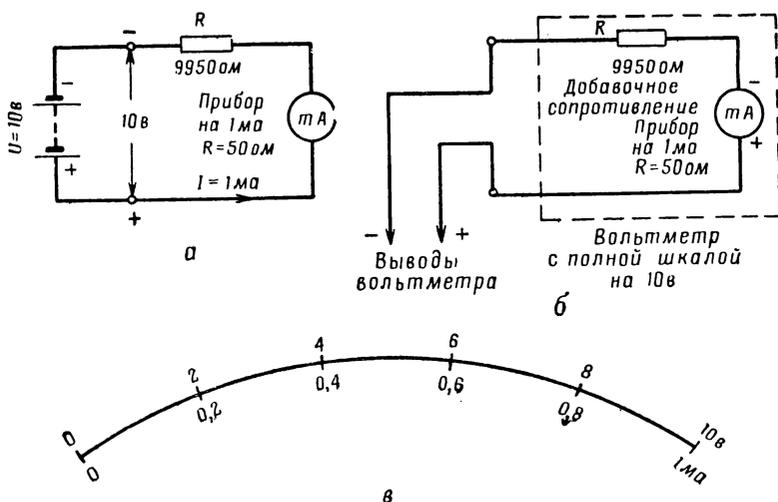


Рис. 234. Амперметр с добавочным сопротивлением образует вольтметр: а — добавочное сопротивление обеспечивает полное отклонение стрелки при напряжении  $10 \text{ в}$ ; б — вольтметр подключается к зажимам цепи для измерения напряжения  $0-10 \text{ в}$ ; в —  $10\text{-в}$  шкала соответствует  $1 \text{ ма}$

Рассчитаем добавочное сопротивление по данным рис. 234, а:

$$R_d = \frac{10 \text{ в}}{0,001 \text{ а}} - 50 \text{ ом} = 10000 - 50 = 9950 \text{ ом}.$$

Часто расчетную формулу выражают в виде

$$R_d = (n - 1) R_V,$$

где  $n$  — число, показывающее, во сколько раз измеряемое напряжение больше напряжения, на которое рассчитан прибор ( $n = \frac{U}{U_V}$ ).

**Пример 86.** Магнитоэлектрический прибор на 50  $\mu\text{ка}$  имеет сопротивление 1000  $\text{ом}$ . Определить добавочное сопротивление, необходимое для измерения напряжения 10  $\text{в}$ .

Решение. По формуле (84)

$$R_d = \frac{10 \text{ в}}{0,000050 \text{ а}} - 1000 \text{ ом} = 200000 - 1000 = 199000 \text{ ом}.$$

Измерение сопротивления при помощи амперметра и вольтметра

При помощи амперметра и вольтметра можно определить сопротивление участка цепи.

Если известны напряжение  $U$  на заданном участке цепи (по показанию вольтметра) и ток  $I$  (по показанию амперметра), то по закону Ома

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

Такой метод определения сопротивления называется методом **амперметра и вольтметра**. Благодаря своей простоте он получил широкое распространение при электроизмерениях.

Измерять сопротивление можно по двум схемам. Разберем, в каких случаях следует пользоваться той или иной схемой.

Если к участку цепи, сопротивление которого нужно определить, подключить амперметр и вольтметр по схеме, представленной на рис. 235, то вольтметр покажет падение напряжения  $U$  на измеряемом сопротивлении  $R_x$ , а амперметр — ток  $I$ , равный сумме двух токов:

$$I = I_x + I_v,$$

где  $I_x$  — ток в измеряемом сопротивлении  $R_x$ ;

$I_v$  — ток, проходящий через вольтметр.

Отсюда

$$I_x = I - I_v,$$

а значит,

$$R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_v}.$$

Так как

$$I_v = \frac{U}{R_v},$$

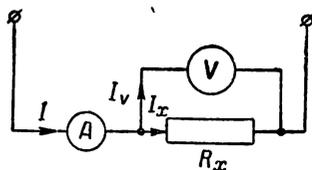


Рис. 235. Схема измерения сопротивления при помощи амперметра и вольтметра (измеряемое сопротивление значительно меньше сопротивления вольтметра)

где  $R_V$  — сопротивление вольтметра, то, подставив вместо  $I_V$  его значение  $\frac{U}{R_V}$  в последнее равенство, получим

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}. \quad (85)$$

Если сопротивление вольтметра  $R_V$  значительно больше измеряемого сопротивления  $R_x$ , то величиной тока  $I_V$  (т. е. величиной  $\frac{U}{R_V}$ ) можно пренебречь по сравнению с током  $I$  и считать, что

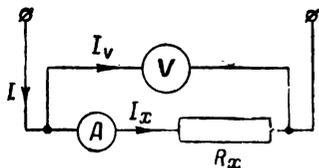


Рис. 236. Схема измерения сопротивления при помощи амперметра и вольтметра (измеряемое сопротивление значительно больше сопротивления вольтметра)

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

Если же  $R_V$  соизмеримо (одного порядка) с  $R_x$ , то пренебрегать величиной  $\frac{U}{R_V}$  нельзя, иначе будет допущена большая ошибка при определении сопротивления  $R_x$ .

Таким образом, если измеряемое сопротивление значительно меньше сопротивления вольтметра, то вольтметр и амперметр следует включать по схеме, показанной на рис. 235.

Рассмотрим теперь включение амперметра и вольтметра по схеме, представленной на рис. 236. В этом случае амперметр покажет ток  $I_x$ , проходящий через измеряемое сопротивление  $R_x$ , а вольтметр — падение напряжения на  $R_x$  и на амперметре, т. е.

$$U = I_x R_x + I_x R_A,$$

где  $R_A$  — сопротивление амперметра.

Отсюда

$$R_x = \frac{U}{I_x} - R_A. \quad (86)$$

Если по величине  $R_A$  значительно меньше  $R_x$ , то сопротивлением  $R_A$  можно пренебречь и считать, что

$$R_x = \frac{U}{I_x}.$$

Если же  $R_A$  соизмеримо с  $R_x$ , то пренебрегать величиной  $R_A$  нельзя, иначе будет допущена большая ошибка при определении сопротивления  $R_x$ .

Таким образом, если измеряемое сопротивление значительно

больше сопротивления амперметра, то вольтметр и амперметр следует включать по схеме рис. 236.

**Пример 87.** Вольтметр, включенный по схеме, приведенной на рис. 235, показывает напряжение  $U=200$  в, а амперметр — ток  $I=10$  а; сопротивление вольтметра  $R_V=10000$  ом. Определить сопротивление  $R_x$ .

**Решение.** По закону Ома

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{200}{10} = 20 \text{ ом.}$$

По формуле (85)

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} = \frac{200}{10 - \frac{200}{10000}} = \frac{200}{10 - 0,02} = \frac{200}{9,98} = 20,04 \text{ ом.}$$

Ошибка, которая получается при определении сопротивления  $R_x$  по приближенной формуле, равна 0,04 ом, что составляет 0,2%. Такая ошибка практически допустима.

**Пример 88.** Вольтметр, включенный по схеме, изображенной на рис. 235, показывает напряжение  $U=200$  в, а амперметр — ток  $I=0,04$  а; сопротивление вольтметра  $R_V=10000$  ом. Определить сопротивление  $R_x$ .

**Решение.** По закону Ома

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{200}{0,04} = 5000 \text{ ом.}$$

По формуле (85)

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} = \frac{200}{0,04 - \frac{200}{10000}} = \frac{200}{0,04 - 0,02} = \frac{200}{0,02} = 10000 \text{ ом.}$$

В данном случае при определении сопротивления  $R_x$  по формуле закона Ома получается ошибка на 100%. Поэтому нужно пользоваться формулой (85).

**Пример 89.** Вольтметр, включенный по схеме, изображенной на рис. 236, показывает напряжение  $U=200$  в, а амперметр — ток  $I_x=0,2$  а; сопротивление амперметра  $R_A=1$  ом. Определить сопротивление  $R_x$ .

**Решение.** По закону Ома

$$R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{200}{0,2} = 1000 \text{ ом.}$$

По формуле (86)

$$R_x = \frac{U}{I_x} - R_A = \frac{200}{0,2} - 1 = 1000 - 1 = 999 \text{ ом.}$$

Ошибка, которая получается при определении сопротивления по приближенной формуле, равна 1 ом (1000—999), т. е. 0,1%; она практически допустима.

**Пример 90.** Вольтметр, включенный по схеме, изображенной на рис. 236, показывает напряжение  $U=5$  в, а амперметр — ток  $I=2,5$  а; сопротивление амперметра  $R_A=1$  ом. Определить сопротивление  $R_x$ .

**Решение.** По закону Ома

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{5}{2,5} = 2 \text{ ом.}$$

По формуле (86)

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A = 2 - 1 = 1 \text{ ом.}$$

В данном случае при определении сопротивления  $R_x$  по приближенной формуле получается ошибка 100%. Поэтому нужно пользоваться формулой (86).

## 8. Ампервольтметр

**Ампервольтметром (авометром) называется комбинированный электроизмерительный прибор, позволяющий измерять величины постоянного тока, постоянного и переменного напряжения, сопротивления, а иногда еще и переменного тока.** В авометре имеется один общий гальванометр (микроамперметр), который в зависимости от рода измерений работает по схеме амперметра, вольтметра или омметра.

Обычно в авометрах используются гальванометры магнитоэлектрической системы.

Важная характеристика гальванометра — его чувствительность, которая показывает, какой ток нужно пропустить через рамку, чтобы стрелка прибора отклонилась до конца шкалы. Этот ток обозначается через  $I_0$ . Чем меньше величина  $I_0$ , тем чувствительней гальванометр.

Для авометра выбирается гальванометр с высокой чувствительностью (50—200 мка).

**Вольтметр постоянного напряжения**

Чтобы измерять напряжение от долей вольта до нескольких сотен вольт, вольтметр делают многошкальным, т. е. как бы объединяют в нем несколько вольтметров с разными пределами измерений. Переход с одного предела измерений на другой производится простым переключением.

В авометре ТТ-1 вольтметр рассчитан на четыре предела измерений: 10, 50, 250 и 1000 в. Чтобы не усложнять шкалу прибора, ее градуируют на 50 в. При измерении на пределе 10 в показания прибора делят на 5, при измерениях на пределах 250 и 1000 в — умножают соответственно на 5 или 20.

Для полного отклонения стрелки гальванометра через рамку нужно пропустить ток, равный  $I_0$ . Чтобы получить такой ток, надо подвести к гальванометру напряжение  $U_0 = I_0 R_0$ ; обычно оно составляет несколько десятых вольта.

Отклонение стрелки гальванометра пропорционально величине тока в рамке, а ток в свою очередь зависит от подводимого к рамке напряжения. Поэтому гальванометр можно использовать в качестве вольтметра с пределом измерений  $U_0$ .

Для расширения пределов измерений вольтметра последовательно с гальванометром включают различные добавочные сопротивления.

Полное, или, как принято называть, входное, сопротивление вольтметра равно  $R_0 + R_{\text{доб}}$ . В основном входное сопротивление определяется добавочным сопротивлением, которое зависит от чувствительности гальванометра. Чем меньше  $I_0$ , тем больше нужно взять  $R_{\text{доб}}$ , тем, следовательно, выше  $R_{\text{вх}}$ . Желание получить вольтметр с высоким входным сопротивлением — одна из причин, по которой для авометра стремятся подобрать гальванометр с высокой чувствительностью, т. е. с малым  $I_0$ .

Величина входного сопротивления определяется также пределом измерения напряжения. Чем выше этот предел, тем больше  $R_{\text{доб}}$ , а следовательно, и  $R_{\text{вх}}$ . Поэтому измерять малые напряжения иногда удается только вольтметром с большим пределом измерений.

Для сравнения многошкальных вольтметров определяют их входное сопротивление  $R'_{\text{вх}}$  для предела измерений 1 в:

$$R'_{\text{вх}} = \frac{1000}{I_0 \text{ (мкА)}} \text{ (в тыс. ом на вольт).}$$

Вольтметры среднего качества имеют входное сопротивление 2000—5000 ом/в, хорошие вольтметры — 10 000—20 000 ом/в.

Зная величину  $R'_{\text{вх}}$ , легко подсчитать входное сопротивление вольтметра для любого предела измерений.

Пусть  $R'_{\text{вх}} = 5000 \text{ ом/в}$ . Вольтметр с таким гальванометром будет иметь следующие входные сопротивления:

$$U_1 = 10 \text{ в; } R_{\text{вх}} = 5000 \cdot 10 = 50000 \text{ ом} = 50 \text{ ком;}$$

$$U_2 = 50 \text{ в; } R_{\text{вх}} = 5000 \cdot 50 = 250 \text{ ком;}$$

$$U_3 = 250 \text{ в; } R_{\text{вх}} = 5000 \cdot 250 = 1,25 \text{ Мом.}$$

**Вольтметр переменного напряжения**

Для измерения переменных напряжений в схему авометра вводят простой полупроводниковый выпрямитель (диод). В результате в рамке появляется пульсирующий ток, пропорционально среднему значению которого отклоняется стрелка гальванометра. Это значение тока тем больше, чем больше переменное напряжение; следовательно, о величине переменного напряжения можно судить по отклонению стрелки прибора. Шкала прибора отградуирована в вольтах переменного напряжения. Для расширения пределов измерения служит ряд добавочных сопротивлений.

В тот момент, когда полупроводниковый диод не пропускает тока, сопротивление его очень велико и поэтому к нему приложена большая часть измеряемого напряжения. При измерении больших напряжений может произойти пробой диода. Чтобы избежать пробоя, в вольтметр вводят защитный диод. В те полупериоды, когда основной диод не пропускает тока, защитный диод проводит его и таким образом замыкает накоротко основ-

ной диод и гальванометр. В этом случае напряжение на основном диоде не превышает долей вольта.

Начало шкалы вольтметра оказывается несколько «сжатым», поскольку крутизна характеристик полупроводниковых диодов в начале меньше.

**Амперметр постоянного тока**

можно получить

Гальванометр можно использовать как амперметр с пределом измерений  $I_0$ . Пределы измерения расширяют при помощи шунта.

Используя систему переключения шунтов, можно получить многопредельный амперметр.

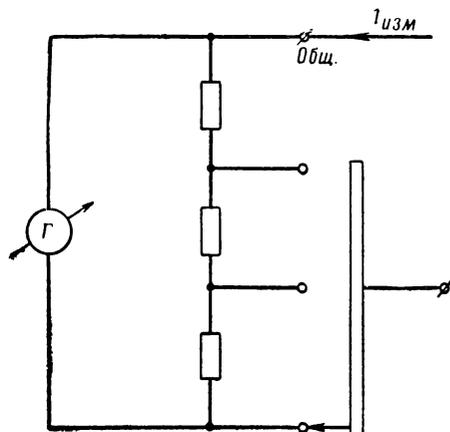


Рис. 237. Подключение универсального шунта

Проводя измерения гальванометром с шунтами, необходимо помнить, что оставлять прибор без шунта нельзя. Если, например, во время переключений пределов измерений прибор хотя бы на мгновение останется без шунта, то по рамке пройдет весь измеряемый ток и гальванометр может выйти из строя. Менять шунт нужно при отключенном приборе.

В многопредельных амперметрах широко применяют универсальный шунт, который всегда подключен к гальванометру (рис. 237).

Этот шунт позволяет довольно просто переходить с одного предела измерений на другой.

**Омметр**

При неизменном напряжении батареи (рис. 238, а) величина тока в цепи  $I_{\Omega}$  зависит только от  $R_x$ , вследствие чего о величине этого сопротивления можно судить по показаниям гальванометра. Чем меньше  $I_{\Omega}$ , тем больше  $R_x$ . Шкалу гальванометра градуируют в омах; таким образом прибор превращается в омметр.

Нулевое деление шкалы соответствует случаю, когда контакты 1 и 2 (рис. 238, а) замкнуты накоротко, т. е.  $R_x = 0$ .

Чтобы нулевое деление шкалы омметра совпало с крайним правым положением стрелки, в цепь включают добавочное сопротивление  $R_{доб}$  (рис. 238, б), величину которого подбирают с таким расчетом, чтобы при замкнутых контактах 1, 2 ток через прибор был равен  $I_0$ . Кроме того, в омметр включают переменное сопротивление  $R_{уст. 0}$  («Установка нуля»), играющее роль шунта прибора. Перед измерением  $R_x$  замыкают контакты 1, 2 и,

изменяя сопротивление  $R_{уст.0}$ , добиваются, чтобы ток через прибор оказался равным  $I_0$ , т. е. устанавливают стрелку на нулевое деление омметра. Благодаря этому сохраняется правильность градуировки прибора, если напряжение батареи несколько снизится.

Шкала омметра имеет пределы от 0 до  $\infty$ . Правое крайнее деление шкалы соответствует значению  $R_x=0$  (контакты 1 и 2 замкнуты накоротко), левое крайнее деление — значению  $R_x=\infty$  (цепь разомкнута). Кажется бы, имеется возможность измерять омметром любые сопротивления от 0 до  $\infty$ . Но это не так. Деле-

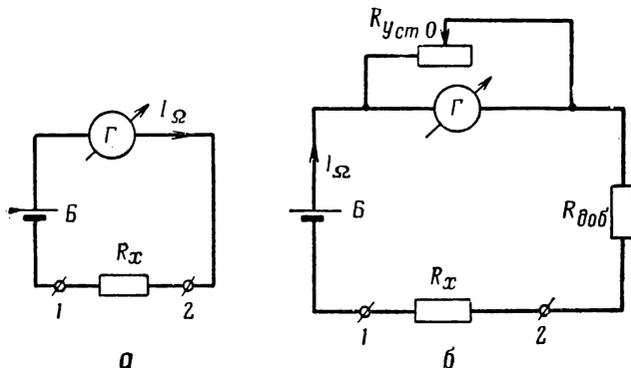


Рис. 238. Схема омметра:

а — принцип действия омметра; б — включение добавочного сопротивления  $R_{доб}$  и сопротивления установки нуля  $R_{уст.0}$

ния шкалы омметра очень неравномерны. Чем больше сопротивление, тем меньше точность отсчета. Очень большие сопротивления определять практически невозможно.

Обычно в авометре делают четыре предела измерений, которые отличаются один от другого в десять раз.

## 9. Измерительный мост

Измерительный мост используют в тех случаях, когда требуется высокая точность измерения сопротивления.

В схему измерительного моста (рис. 239) входят четыре сопротивления:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_x$  — называемые плечами моста, которые образуют замкнутый контур. К участкам замкнутого контура 1—3 и 2—4 (которые называют диагоналями моста) подключают соответственно источник тока и измерительный прибор (гальванометр).

В общем случае в подобной схеме возможны три режима работы:

— потенциал точки 2 выше потенциала точки 4 — через гальванометр течет ток сверху вниз (стрелка прибора отклоняется в одном направлении);

— потенциал точки 2 ниже потенциала точки 4 — через гальванометр течет ток снизу вверх (стрелка прибора отклоняется в другом направлении);

— потенциал точки 2 равен потенциалу точки 4, в гальванометре тока нет (стрелка прибора останется на нуле).

Направление и величина тока в цепи гальванометра зависят от разности потенциалов между точками 2 и 4, а следовательно, и от величин сопротивлений плеч моста.

Когда в диагонали с прибором протекает ток, схема моста называется неуравновешенной. Когда ток равен нулю, схема моста называется уравновешенной.

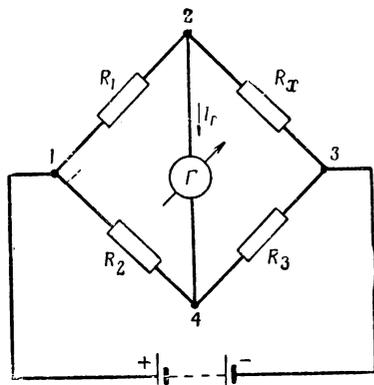


Рис. 239. Схема моста для измерения сопротивления

Рассмотрим, при каком соотношении между сопротивлениями плеч схема моста уравновешена.

Если мост уравновешен, то потенциалы точек 2 и 4 равны. В этом случае

$$I_1 = I_x \text{ и } I_2 = I_3.$$

Кроме того, должны быть соблюдены условия равенства падений напряжений

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \text{ и } I_x R_x = I_3 R_3.$$

Разделив последние два равенства одно на другое, получим

$$\frac{I_1 R_1}{I_x R_x} = \frac{I_2 R_2}{I_3 R_3}.$$

Но так как  $I_1 = I_x$  и  $I_2 = I_3$ , последнее равенство после упрощения примет вид

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3},$$

откуда

$$R_1 R_3 = R_2 R_x.$$

Итак, условием равновесия в схеме моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч.

Из последнего выражения следует, что уравновешенный мост можно применять для измерения сопротивлений. Зная величины трех сопротивлений ( $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ), можно определить величину четвертого ( $R_x$ ):

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3. \quad (87)$$

Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  называются **балансными плечами** моста, сопротивление  $R_3$  — **сравнительным**, а  $R_x$  — **измерительным**.

На практике в измерительных мостах отношение сопротивлений  $\frac{R_1}{R_2}$  берут кратным 10, т. е.  $\frac{R_1}{R_2} = 1$  (или 10; 100; 0,1 и т. д.).

Порядок пользования мостом такой:

- подключить в свободное плечо моста измеряемое сопротивление;
- подбором величины сопротивления  $R_3$  добиться установления стрелки прибора на нуль;
- отсчитать величину определяемого сопротивления.

### *Краткие выводы*

1. Ток обычно измеряют амперметром магнитоэлектрической или электромагнитной системы.

2. Работа магнитоэлектрических приборов основана на действии механической силы на проводник с током, который помещают в магнитное поле. Величина этой силы пропорциональна величине тока и силе магнитного поля.

Вместо проводника используется небольшая подвижная катушка, расположенная в воздушном зазоре постоянного магнита. Стрелка и катушка находятся на одной оси и возвращаются в исходное положение парой спиральных пружин.

Магнитоэлектрический прибор имеет линейную шкалу.

3. В электромагнитных приборах измеряемый ток протекает через неподвижную катушку. Действие этих приборов основано на явлении втягивания стального сердечника в катушку.

Электромагнитный прибор имеет квадратичную шкалу. Придавая определенную форму стальному сердечнику, квадратичную шкалу можно сделать более или менее равномерной.

4. Приборы для измерения тока включают в цепь последовательно. Они имеют небольшое внутреннее сопротивление. Чувствительность их определяется величиной тока, требуемой для отклонения стрелки на полную шкалу.

Для расширения пределов измерения тока применяют шунты, включаемые параллельно к прибору.

5. Прибор для измерения напряжения называется вольтметром. Его всегда подключают параллельно к участку цепи, на зажимах которого определяется напряжение. Внутреннее сопротивление вольтметра очень большое.

Для измерения напряжения в различных диапазонах последовательно с вольтметром включают добавочные сопротивления.

6. Исправность цепей проверяют омметром. При коротком замыкании в цепи показание прибора равно нулю, при разорванной цепи омметр показывает бесконечно большое сопротивление. Для обнаружения разрыва в цепи пользуются шкалой наибольшего сопротивления.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В магнитоэлектрическом приборе стрелка устанавливается на нуль под действием:  
а — спиральных пружин; б — двух складывающихся магнитных полей; в — двух противоположных магнитных полей; г — трения оси.
2. В магнитоэлектрическом приборе отклонение стрелки прибора вызывается:  
а — постоянными магнитами; б — токами катушки; в — взаимодействием между двумя магнитными полями; г — действием алюминиевой рамки.
3. В магнитоэлектрическом приборе отклонение стрелки:  
а — пропорционально току катушки; б — обратно пропорционально току катушки; в — пропорционально квадрату тока катушки; г — не зависит от тока катушки.
4. Величина тока катушки, необходимого для отклонения стрелки на полную шкалу прибора, называется:  
а — диапазоном тока; б — диапазоном напряжения; в — сопротивлением; г — чувствительностью.
5. Для включения амперметра в цепь последовательно необходимо:  
а — разорвать цепь в одной точке и включить прибор; б — разорвать цепь возле зажимов источника напряжения и включить прибор к одному из них; в — замкнуть сопротивление накоротко и подключить прибор к его зажимам; г — разорвать цепь в одной точке и подключить прибор к одному концу провода, а другой конец соединить с землей.
6. Чтобы включить вольтметр для измерения падения напряжения, надо:  
а — разорвать цепь в одной точке и включить вольтметр; б — разорвать цепь в двух точках и подключить к ним прибор; в — подключить прибор к концам сопротивления; г — отключить источник напряжения, а вольтметр включить.
7. Шунт для миллиамперметра:  
а — расширяет пределы измерения и изменяет сопротивление прибора; б — расширяет пределы измерения и увеличивает сопротивление; в — уменьшает пределы измерения и сопротивление; г — уменьшает пределы измерения, но увеличивает сопротивление.
8. При измерении бесконечно большого сопротивления нужно использовать следующий диапазон сопротивлений  $R_x$ :  
а — 1 ом; б — 1000 ом; в — 10000 ом; г — 1000000 ом.
9. При измерении сопротивления 1 Мом на разрыв наиболее целесообразно использовать диапазон сопротивлений  $R_x$ :  
а — 1 ом; б — 1000 ом; в — 10000 ом; г — 1000000 ом.
10. Когда используется омметр, то источник питания цепи отключают, потому что:  
а — источник лишь увеличивает сопротивление; б — ток уменьшает сопротивление; в — омметр имеет свою собственную батарею; г — для магнитоэлектрического прибора не требуется тока в подвижной катушке.
11. Добавочное сопротивление для вольтметра имеет:  
а — большую величину при последовательном соединении с катушкой прибора; б — большую величину при параллельном соединении с катушкой; в — величину меньше 1 Мом при последовательном соединении с рамкой прибора; г — величину меньше 1 Мом при параллельном соединении с катушкой прибора.
12. Диапазон измерения тока может быть расширен при помощи:  
а — шунтов; б — добавочных сопротивлений; в — выпрямителей; г — делителей напряжения.
13. Амперметром с сопротивлением 100 ом, имеющим шкалу 0—1 ма, нужно измерить ток до 100 ма. Сопротивление шунта должно быть равно:  
а — 1 ом; б — 1,1 ом; в — 1,01 ом; г — 2,04 ом.
14. В амперметре на 20000 ом/в для отклонения стрелки на полную шкалу требуется ток:  
а — 50 мка; б — 500 мка; в — 0,005 а; г — 0,001 а.

15. Амперметр сопротивлением 100 *ом*, имеющий шкалу 0—1 *ма*, нужно использовать в качестве вольтметра для измерения напряжения 0—250 *в*. Величина добавочного сопротивления, включая сопротивление прибора, должна быть:

а — 25 *ком*; б — 250 *ком*; в — 2500 *ком*; д — 500 *ком*.

16. Прибор на 1 *ма*, 100 *ом* используется совместно с батареей 6 *в* для измерения сопротивления. Общее сопротивление прибора должно быть:

а — 450 *ом*; б — 4500 *ом*; в — 6000 *ом*; г — 60000 *ом*.

## УПРАЖНЕНИЯ

1. а) Почему амперметр включают последовательно в цепь? б) Почему он должен иметь небольшое сопротивление? в) Почему вольтметр подключают параллельно к цепи? г) Почему он должен иметь большое сопротивление?

2. Цепь имеет батарею, подключенную к двум последовательно соединенным сопротивлениям.

а) Нарисуйте схему включения миллиамперметра с соблюдением полярности между двумя сопротивлениями для измерения тока.

б) Нарисуйте схему включения вольтметра с соблюдением полярности, чтобы измерить напряжение на зажимах одного сопротивления.

3. Объясните коротко, почему шунт прибора, равный сопротивлению подвижной катушки, удваивает шкалу измерения тока?

4. Какое сопротивление шунта миллиамперметра при сопротивлении подвижной катушки 5 *ом* необходимо для расширения диапазона с 0—1 до 5 и 50 *ма*?

5. Для шкалы 0—1 *ма* при сопротивлении подвижной катушки 50 *ом* подсчитайте добавочное сопротивление, необходимое для диапазонов 10, 30, 100 и 300 *в*.

6. Вольтметр имеет диапазон 0—120 *в* и общее сопротивление 360 *ком*. Какое сопротивление необходимо включить последовательно для измерения напряжения до 480 *в*?

7. Миллиамперметр с диапазоном 0—20 *ма* имеет сопротивление шунта 20/9999 *ом*. Сопротивление подвижной катушки равно 20 *ом*. Какова величина максимального тока, который может быть измерен прибором с этим шунтом?

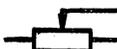
8. Измеряется напряжение, порядок величины которого неизвестен. Почему необходимо вначале переключатель прибора поставить на наибольший диапазон, а затем переключать его на более низкие диапазоны?

9. Какие две предосторожности следует соблюдать при использовании миллиамперметра?

10. Какие две предосторожности следует соблюдать при использовании ометра?



**УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ**

	Постоянный ток, постоянное напряжение
	Переменный ток, переменное напряжение
	Трехфазный переменный ток частотой 50 гц
	Постоянный и переменный ток
	Соединение обмоток в звезду
	Соединение обмоток в треугольник
	Соединительный провод, кабель
	Провод или кабель экранированный
	Электрически не соединенные провода
	Электрически соединенные провода
	Ответвление провода
	Постоянный резистор (общее обозначение)
	Переменный резистор (общее обозначение)
	Переменный резистор (потенциометр)
	Переменный резистор (реостат)



Катушка индуктивности, обмотка трансформатора



Катушка индуктивности с отводами



Конденсатор постоянной емкости



Конденсатор подстроечный



Конденсатор переменной емкости



Конденсатор электролитический



Дроссель с ферромагнитным сердечником



Трансформатор с ферромагнитным сердечником



Осветительная лампа



Сигнальная лампа



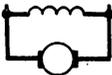
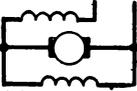
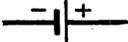
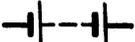
Зажим (разъемное электрическое соединение)



Однополюсный выключатель



Двухполюсный выключатель

	Вольтметр переменного тока
	Амперметр постоянного тока
	Обмотка реле
	Электромагнит
	Электродвигатель или генератор с параллельным возбуждением
	Электродвигатель или генератор с последовательным возбуждением
	Электродвигатель или генератор со смешанным возбуждением
	Химический источник электрической энергии (элемент, аккумулятор)
	Батарея элементов, аккумуляторная батарея
	Плавкий предохранитель
	Провод, соединенный с корпусом прибора
	Заземление
	Нагревательный элемент (электрическая печь)

**НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ МАТЕМАТИКИ**

Если при вычислениях приходится иметь дело с очень большими или очень малыми числами, то умение работать с показателями степеней намного облегчает работу.

**Возведение в степень**

Действие, посредством которого находят произведение нескольких равных сомножителей, называется возведением в степень.

Число (сомножитель), возводимое в степень, называется основанием, а число, показывающее, в какую степень возводится основание (показывающее число равных сомножителей), — показателем степени. Например, в выражении  $2^4 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$  основание — число 2, показатель степени — 4, а произведение равных сомножителей (результат возведения в степень) — 16.

Первой степенью числа принято считать само это число:  $2^1 = 2$ . Показатель степени 1, как правило, не пишется.

Вторую степень числа называют квадратом этого числа, третью — кубом, а возведение во вторую и третью степень — соответственно возведением в квадрат и в куб.

$10^2$  — десять в квадрате,  $10^3$  — десять в кубе.

Полезно запомнить результаты возведения в степень основания 10:

$10^1 = 10;$	$10^{-1} = 0,1;$
$10^2 = 100;$	$10^{-2} = 0,01;$
$10^3 = 1000;$	$10^{-3} = 0,001;$
$10^4 = 10000;$	$10^{-4} = 0,0001;$
$10^5 = 100000;$	$10^{-5} = 0,00001;$
$10^6 = 1000000;$	$10^{-6} = 0,000001.$

Для десятичных дробей меньше единицы отрицательный показатель степени означает число десятичных знаков, отсчитываемых вправо от запятой.

Любое число для удобства возведения в степень можно представить в виде сомножителей, одним из которых является 10 с соответствующим показателем степени:

$10 = 1 \cdot 10 = 1 \cdot 10^1$	$750 = 7,5 \cdot 100 = 7,5 \cdot 10^2$
$50 = 5 \cdot 10 = 5 \cdot 10^1$	$1000 = 1 \cdot 1000 = 1 \cdot 10^3$
$98 = 9,8 \cdot 10 = 9,8 \cdot 10^1$	$5000 = 5 \cdot 1000 = 5 \cdot 10^3$
$100 = 1 \cdot 100 = 1 \cdot 10^2$	$9000 = 9 \cdot 1000 = 9 \cdot 10^3$
$200 = 2 \cdot 100 = 2 \cdot 10^2$	$9800 = 9,8 \cdot 1000 = 9,8 \cdot 10^3$

Для дробей

$0,01 = 1 \cdot 0,01 = 1 \cdot 10^{-2}$
$0,02 = 2 \cdot 0,01 = 2 \cdot 10^{-2}$
$0,009 = 9 \cdot 0,001 = 9 \cdot 10^{-3}$

Число целесообразно использовать в том виде, который наиболее удобен для каждого конкретного случая. Так, дробь 0,089 можно представить в двух видах:  $89 \cdot 10^{-3}$  и  $8,9 \cdot 10^{-2}$ .

Умножение и деление чисел, выраженных сомножителями, одним из которых является основание 10 в степени, производятся по следующим правилам.

**Правило умножения.** Показатели степеней сомножителей 10 сложить, другие сомножители умножить. Например:

$$\begin{aligned}(2 \cdot 10^4) \cdot (3 \cdot 10^2) &= (2 \cdot 3) \cdot 10^{4+2} = 6 \cdot 10^6; \\ (2 \cdot 10^{-2}) \cdot (4 \cdot 10^{-3}) &= (2 \cdot 4) \cdot 10^{(-2)+(-3)} = 8 \cdot 10^{-5}; \\ (2 \cdot 10^{-5}) \cdot (3 \cdot 10^2) &= (2 \cdot 3) \cdot 10^{(-5)+(2)} = 6 \cdot 10^{-3}; \\ (2 \cdot 10^7) \cdot (2 \cdot 10^{-5}) &= (2 \cdot 2) \cdot 10^{7+(-5)} = 4 \cdot 10^2.\end{aligned}$$

**Правило деления.** Из показателя степени сомножителя 10 делимого вычесть показатель степени сомножителя 10 делителя, а другие сомножители разделить. Например:

$$\begin{aligned}(8 \cdot 10^6) : (4 \cdot 10^3) &= (8 : 4) \cdot 10^{6-3} = 2 \cdot 10^3; \\ (4 \cdot 10^5) : (2 \cdot 10^{-3}) &= (4 : 2) \cdot 10^{5-(-3)} = 2 \cdot 10^8; \\ (4 \cdot 10^{-5}) : (2 \cdot 10^{-3}) &= (4 : 2) \cdot 10^{(-5)-(-3)} = 2 \cdot 10^{-2}; \\ (6 \cdot 10^{-4}) : (3 \cdot 10^2) &= (6 : 3) \cdot 10^{(-4)-(2)} = 2 \cdot 10^{-6}.\end{aligned}$$

### Извлечение корня

Извлечение корня — действие, обратное возведению в степень. Квадратный корень числа есть величина, которая при умножении на себя (при возведении в квадрат) равна данному числу. Обозначают квадратный корень знаком  $\sqrt{\quad}$ , называемым радикалом, например:

$$\sqrt{36} = 6 \quad (6^2 = 36).$$

Для облегчения читателю решения задач в табл. 19 приводятся числа ( $N$ ) от 1 до 120, их квадраты ( $N^2$ ) и квадратные корни ( $\sqrt{N}$ ).

### Преобразование уравнений

Во многих случаях, перед тем как решить задачу, необходимо преобразовать алгебраическое уравнение, поменяв местами его множители. Для этого пользуются следующим правилом: если обе части уравнения умножить или разделить на одну и ту же величину, то равенство не изменится. Например, преобразуем уравнение  $U=IR$  для определения силы тока  $I$ . Для этого разделим обе части уравнения на  $R$ :

$$\frac{U}{R} = \frac{IR}{R} = I, \text{ или } I = \frac{U}{R}.$$

Не имеет значения, в какой части уравнения находится  $I$  — равенство сохраняется в том и другом случае.

Рассмотрим еще один случай. Перед нами формула

$$X_L = 2\pi fL.$$

Нужно определить, чему равна индуктивность  $L$ . Разделим обе части уравнения на величину  $2\pi f$ . Тогда получим

$$\frac{X_L}{2\pi f} = \frac{2\pi f L}{2\pi f}, \text{ или } L = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

Это правило можно применять к любому виду уравнений.

### Тригонометрия

Тригонометрия — это отдел геометрии, посвященный изучению соотношений между сторонами и углами треугольника.

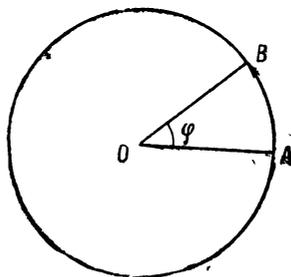


Рис. 240

Изучение зависимости углов необходимо, когда приходится иметь дело с переменным током или напряжением.

Если линия  $OA$  (рис. 240) переместится вокруг точки  $O$  в положение  $OB$ , то образуется угол  $AOB$ . Линии  $OA$  и  $OB$  представляют собой стороны угла, а точка  $O$  — его вершину. Угол принято обозначать буквой  $\varphi$ . Для удобства угол  $\varphi$  считают положительным, если он создается движением линии против часовой стрелки, и отрицательным — по часовой стрелке. Полное вращение линии за один период образует угол  $360^\circ$ . Углы называются острыми, если они меньше  $90^\circ$ , и тупыми, если они больше  $90^\circ$ . Угол  $90^\circ$  — прямой.

Из шести тригонометрических функций в электротехнике для характеристики цепей переменного тока наиболее часто используются три:  $\sin \varphi$ ,  $\cos \varphi$  и  $\operatorname{tg} \varphi$ .

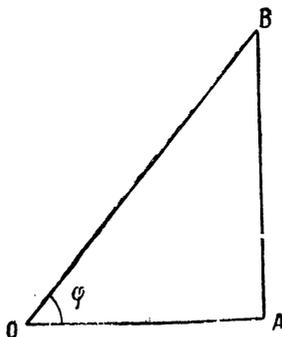


Рис. 241

В прямоугольном треугольнике  $AOB$  (рис. 241) сторона  $OB$ , лежащая против прямого угла, называется гипотенузой, стороны  $OA$  и  $AB$  называются катетами.

$$\sin \varphi = \frac{\text{противолежащая сторона}}{\text{гипотенуза}} = \frac{AB}{OB};$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{прилежащая сторона}}{\text{гипотенуза}} = \frac{OA}{OB};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{противолежащая сторона}}{\text{прилежащая сторона}} = \frac{AB}{OA}.$$

Синус  $0^\circ$  равен нулю и с увеличением угла до  $90^\circ$  возрастает до максимальной величины, равной единице. Косинус, наоборот, равен единице при  $0^\circ$  и уменьшается до нуля при  $90^\circ$ . Тангенс  $0^\circ$  равен нулю; тангенс  $45^\circ$  — единице и затем возрастает до  $\infty$  при  $90^\circ$ .

Если известно, что  $\sin \varphi = 0,7071$ , тогда по таблице функций находим, что соответствующий угол равен  $45^\circ$ .

В табл. 20 приводятся значения синусов, косинусов, тангенсов и соответствующих им углов.

Таблица 19

**Квадраты и квадратные корни чисел от 1 до 120**

$N$	$N^2$	$\sqrt{N}$	$N$	$N^2$	$\sqrt{N}$
<b>1</b>	1	1	<b>21</b>	441	4,5826
<b>2</b>	4	1,414	<b>22</b>	484	4,6904
<b>3</b>	9	1,732	<b>23</b>	529	4,7958
<b>4</b>	16	2	<b>24</b>	576	4,8990
<b>5</b>	25	2,236	<b>25</b>	625	5
<b>6</b>	36	2,449	<b>26</b>	676	5,0990
<b>7</b>	49	2,646	<b>27</b>	729	5,1962
<b>8</b>	64	2,828	<b>28</b>	784	5,2915
<b>9</b>	81	3	<b>29</b>	841	5,3852
<b>10</b>	100	3,162	<b>30</b>	900	5,4772
<b>11</b>	121	3,3166	<b>31</b>	961	5,5678
<b>12</b>	144	3,4641	<b>32</b>	1024	5,6569
<b>13</b>	169	3,6056	<b>33</b>	1089	5,7446
<b>14</b>	196	3,7417	<b>34</b>	1156	5,8310
<b>15</b>	225	3,8730	<b>35</b>	1225	5,9116
<b>16</b>	256	4	<b>36</b>	1296	6
<b>17</b>	289	4,1231	<b>37</b>	1369	6,0828
<b>18</b>	324	4,2426	<b>38</b>	1444	6,1644
<b>19</b>	361	4,3589	<b>39</b>	1521	6,2450
<b>20</b>	400	4,4721	<b>40</b>	1600	6,3246

$N$	$N^2$	$\sqrt{N}$	$N$	$N^2$	$\sqrt{N}$
41	1681	6,4031	81	6561	9
42	1764	6,4807	82	6724	9,0554
43	1849	6,5574	83	6889	9,1104
44	1936	6,6332	84	7056	9,1652
45	2025	6,7082	85	7225	9,2195
46	2116	6,7823	86	7396	9,2736
47	2209	6,8557	87	7569	9,3274
48	2304	6,9282	88	7744	9,3808
49	2401	7	89	7921	9,4340
50	2500	7,0711	90	8100	9,4868
51	2601	7,1414	91	8281	9,5394
52	2704	7,2111	92	8464	9,5917
53	2809	7,2801	93	8649	9,6437
54	2916	7,3485	94	8836	9,6954
55	3025	7,4162	95	9025	9,7468
56	3136	7,4833	96	9216	9,7980
57	3249	7,5498	97	9409	9,8489
58	3364	7,6158	98	9604	9,8995
59	3481	7,6811	99	9801	9,9499
60	3600	7,7460	100	10000	10
61	3721	7,8102	101	10201	10,0499
62	3844	7,8740	102	10404	10,0995
63	3969	7,9373	103	10609	10,1489
64	4096	8	104	10816	10,1980
65	4225	8,0623	105	11025	10,2470
66	4356	8,1240	106	11236	10,2956
67	4489	8,1854	107	11449	10,3441
68	4624	8,2462	108	11664	10,3923
69	4761	8,3066	109	11881	10,4403
70	4900	8,3666	110	12100	10,4881
71	5041	8,4261	111	12321	10,5357
72	5184	8,4853	112	12544	10,5830
73	5329	8,5440	113	12769	10,6301
74	5476	8,6023	114	12996	10,6771
75	5625	8,6603	115	13225	10,7238
76	5776	8,7178	116	13456	10,7703
77	5929	8,7750	117	13689	10,8167
78	6084	8,8318	118	13924	10,8628
79	6241	8,8882	119	14161	10,9087
80	6400	8,9443	120	14400	10,9545

**Некоторые тригонометрические функции углов  
от 0 до 90°**

Углы, °	Синусы	Косинусы	Тангенсы	Углы, °	Синусы	Косинусы	Тангенсы
<b>0</b>	0,0000	1,0000	0,0000	<b>40</b>	0,6428	0,7660	0,8391
<b>1</b>	0175	0,9998	0175	<b>41</b>	6561	7547	8693
<b>2</b>	0349	9994	0349	<b>42</b>	6691	7431	9004
<b>3</b>	0523	9986	0524	<b>43</b>	6820	7314	9325
<b>4</b>	0698	9976	0699	<b>44</b>	6947	7193	9657
<b>5</b>	0,0872	0,9962	0,0875	<b>45</b>	0,7071	0,7071	1,0000
<b>6</b>	1045	9945	1051	<b>46</b>	7193	6947	0355
<b>7</b>	1219	9925	1228	<b>47</b>	7314	6820	0724
<b>8</b>	1392	9903	1405	<b>48</b>	7431	6691	1106
<b>9</b>	1564	9877	1584	<b>49</b>	7547	6561	1504
<b>10</b>	0,1736	0,9848	0,1763	<b>50</b>	0,7660	0,6428	1,1918
<b>11</b>	1908	9816	1944	<b>51</b>	7771	6293	2349
<b>12</b>	2079	9781	2126	<b>52</b>	7880	6157	2799
<b>13</b>	2250	9744	2309	<b>53</b>	7986	6018	3270
<b>14</b>	2419	9703	2493	<b>54</b>	8090	5878	3764
<b>15</b>	0,2588	0,9659	0,2679	<b>55</b>	0,8192	0,5736	1,4281
<b>16</b>	2756	9613	2867	<b>56</b>	8290	5592	4826
<b>17</b>	2924	9563	3057	<b>57</b>	8387	5446	5399
<b>18</b>	3090	9511	3249	<b>58</b>	8480	5299	6003
<b>19</b>	3256	9455	3443	<b>59</b>	8572	5150	6643
<b>20</b>	0,3420	0,9397	0,3640	<b>60</b>	0,8660	0,5000	1,732
<b>21</b>	3584	9336	3839	<b>61</b>	8746	4848	1,804
<b>22</b>	3746	9272	4040	<b>62</b>	8829	4695	1,881
<b>23</b>	3907	9205	4245	<b>63</b>	8910	4540	1,963
<b>24</b>	4067	9135	4452	<b>64</b>	8988	4384	2,050
<b>25</b>	0,4226	0,9063	0,4663	<b>65</b>	0,9063	0,4226	2,145
<b>26</b>	4384	8988	4877	<b>66</b>	9135	4067	2,246
<b>27</b>	4540	8910	5095	<b>67</b>	9205	3907	2,356
<b>28</b>	4695	8829	5317	<b>68</b>	9272	3746	2,475
<b>29</b>	4848	8746	5543	<b>69</b>	9336	3584	2,605
<b>30</b>	0,5000	0,8660	0,5774	<b>70</b>	0,9397	0,3420	2,747
<b>31</b>	5150	8572	6009	<b>71</b>	9455	3256	2,904
<b>32</b>	5299	8480	6249	<b>72</b>	9511	3090	3,078
<b>33</b>	5446	8387	6494	<b>73</b>	9563	2924	3,271
<b>34</b>	5592	8290	6745	<b>74</b>	9613	2756	3,487
<b>35</b>	0,5736	0,8192	0,7002	<b>75</b>	0,9659	0,2588	3,732
<b>36</b>	5878	8090	7265	<b>76</b>	9703	2419	4,011
<b>37</b>	6018	7986	7536	<b>77</b>	9744	2250	4,331
<b>38</b>	6157	7880	7813	<b>78</b>	9781	2079	4,705
<b>39</b>	6293	7771	8098	<b>79</b>	9816	1908	5,145

Продолжение

Углы, °	Синусы	Косинусы	Тангенсы	Углы, °	Синусы	Косинусы	Тангенсы
<b>80</b>	0,9848	0,1736	5,671	<b>85</b>	0,9962	0,0872	11,43
<b>81</b>	9877	1564	6,314	<b>86</b>	9976	0698	14,30
<b>82</b>	9903	1392	7,115	<b>87</b>	9986	0523	19,08
<b>83</b>	9925	1219	8,144	<b>88</b>	9994	0349	28,64
<b>84</b>	9945	1045	9,514	<b>89</b>	9998	0175	57,29
				<b>90</b>	1,0000	0,0000	∞

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

<b>Глава 1</b>	9, б	22, а	5, в	<b>Глава 8</b>	11, да	12, в
	10, в	23, б	6, б		12, нет	13, а
1, г	11, г	24, г	7, г	I	13, да	14, в
2, г	12, а	25, а	8, г		14, "	15, в
3, в	13, в	26, б	9, а	1, б	15, "	16, а
4, а	14, б		10, б	2, б	16, "	
5, б	15, г	<b>Глава 4</b>	11, а	3, в	17, "	<b>Глава 10</b>
6, а	16, б		12, в	4, в	18, "	1, а
7, а	17, б	1, б		5, б	19, нет	2, б
8, б		2, б	<b>Глава 6</b>	6, в	20, да	3, б
9, в	<b>Глава 3</b>	3, б		7, б	21, "	4, г
10, б		4, б	1, б	8, в	22, "	5, а
11, а	1, в	5, а	2, в	9, в	23, "	6, б
12, а	2, в	6, г	3, в	10, б	24, "	7, г
13, б	3, г	7, а	4, г	11, г	25, "	8, б
14, а	4, в	8, б	5, в	12, а		
15, г	5, в	9, г	6, г	13, б	<b>Глава 11</b>	
16, б	6, б	10, а	7, г	14, а		1, а
17, б	7, а	11, б	8, а	15, а		2, в
18, в	8, в	12, а	9, а	16, б		3, а
19, б	9, а	13, б	10, б	17, б	<b>Глава 9</b>	4, г
20, в	10, а	14, а	11, а			5, а
21, в	11, а	15, б	12, в	II	1, в	6, в
<b>Глава 2</b>	12, в	16, г	13, в		2, в	7, а
	13, б	17, а	14, б	1, да	3, в	8, г
1, а	14, в	18, б	15, г	2, "	4, в	9, г
2, б	15, б	19, г	16, а	3, "	5, б	10, в
3, г	16, в		17, в	4, "	6, б	11, а
4, б	17, в	<b>Глава 5</b>	18, в	5, "	7, б	12, а
5, а	18, г		19, б	6, "	8, б	13, в
6, б	19, в	1, в	20, г	7, "	9, б	14, а
7, г	20, г	2, в	21, в	8, нет	10, б	15, б
8, б	21, г	3, г	22, б	9, да	11, в	16, в
		4, г		10, "		

ОТВЕТЫ НА УПРАЖНЕНИЯ

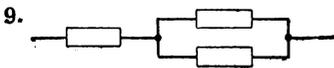
**Глава 1. 13.** Диаметр (толщина провода) измеряется в *мм*, *см* и т. д. Поперечное сечение (площадь) измеряется в *мм<sup>2</sup>*, *см<sup>2</sup>*. Диаметр можно измерить микрометром, поперечное сечение подсчитывается по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

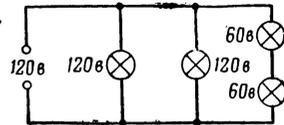
где *d* — диаметр. **14.** 0,56 *ком*.

**Глава 2. 3.** б) 4 *а*; в) и г) 4 *а*. **5.** б) и в) 36 *вт*; г) 18 *вт*. **7.** 0,012 *а* или  $12 \cdot 10^{-3}$  *а*; 0,5 *кв*; 500000 *ом* или  $5 \cdot 10^5$  *ом*; 0,1 *Мом*; 500 *ма*. **8.** 5 *мм<sup>2</sup>*; 0,39 *ом*; 0,2 *в*. **9.** 56,4 *в*. **10.** 5 *ма*. **11.** 12 *вт*. **12.** 66,6 *ом*.

**Глава 3. 2.** а) 60 *ом*; б) 2 *а*; в) 20, 40 и 60 *в*; г) 40, 80 и 120 *вт*. **4.** а) 90 *в*; б) 3 и 1 *а*; в) 4 *а*; г) 22,5 *ом*; д) 360 *вт*. **5.** а) 6 *а*; б) 3 *ом*. **6.** а) 30 *в*; б) 2 и 3 *а*. **8.** а) 0; 2 *а*; 2 *а*; б) 12 *ом*; в) 48 *вт*.

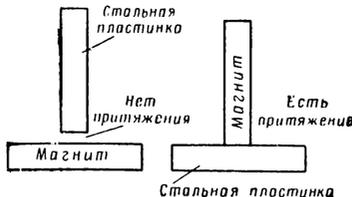


10. б) 12 *ом*. 11.

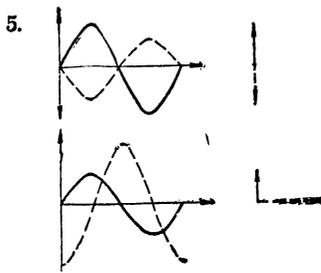
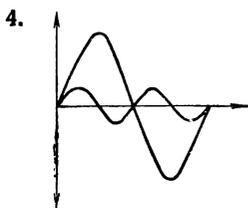


**12.** 1 *вт*; 2 *вт*. **13.** 10000 *ом*; 0,01 *вт*; можно использовать угольный резистор. **14.**  $R_{\text{общ}} = 4412$  *ом*;  $I_{\text{общ}} = 23,8$  *ма*;  $I_1 = 1,05$  *ма*;  $I_2 = 21$  *ма*;  $I_3 = 1,75$  *ма*. **15.** 220 *ом*; 55 *вт*. **16.** 0,2 *а*; 7 *ом*. **17.** 56 *ом*. **18.** 49 *ма*; около 2 *ом*.

**Глава 4. 5.** 8 *а·в*; 80 *ма*. **6.** 6,3 *э*; 1260 *гс*. **10.** 9000 *в*. **11.** а) 800 *м*; б) 6,36 *см*; в) 445 *ом*; г) 22, 4 *ма*; д) 90 *а·в*. **12.**



**Глава 5.** 2.  $360^\circ$  или  $2\pi$  радиан;  $180^\circ$  или  $\pi$  радиан;  $90^\circ$  или  $\pi/2$  радиан;  $270^\circ$  или  $3\pi/2$  радиан. 3. 0,637 в; 0,707 в; 2 в.



6. 12 а; 50 гц;  $\varphi = 0^\circ$ .

**Глава 6.** 3.  $250 \cdot 10^{-6}$  гн;  $40 \cdot 10^{-6}$  гн;  $40 \cdot 10^{-3}$  гн;  $5 \cdot 10^{-3}$  гн. 7. а) 50 гц; б) 960 в; в) 96 ма; г) 768 ма. 9. 314 ом; 628 ом; 3140 ом. 10. 1 гн; 0,5 гн; 0,1 гн; 0,2 мгн. 11. 5 ма; 10 в. 12. б) 6280 ом; 1,6 ма; 50 гц. 13. 31,8 ма. 14. 0,38 гн. 15. б) 314 ом; в) 38 ма.

**Глава 8.** 3.  $50 \cdot 10^{-12}$  ф;  $1 \cdot 10^{-9}$  ф;  $47 \cdot 10^{-9}$  ф;  $1 \cdot 10^{-8}$  ф;  $10 \cdot 10^{-6}$  ф.

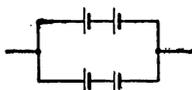
6. 11. 0,016 мкф. 12. а) 5 ма; б) 1000 кгц. 13. 2,65 мкф.

14. б) 2 ма; 2 и 8 в. 15. б) 10 и 2,5 ма; в) 12,5 ма; г) 10 в. 17. а) 1000 в; б) 8100 пф. 18. 32 мкф; 1,6 мкф; 1600 пф. 19. 1 мсек; 12,5 мсек; 1 мксек.

**Глава 9.** 1. а) б) 141 в; в) когда эти напряжения

будут совпадать по фазе. 2. а) 100 ом; 1 а; 100 в и 1 в; практически  $\varphi = 0^\circ$ ; б) 100 ом; 1 а; 1 в и 100 в; практически  $\varphi = 90^\circ$ ; в) 70,7 ом; 1,41 а; по 70,7 в;  $\varphi = 45^\circ$ . 4. а) 1 а; 100 а; 100 а; 1 ом; б) 100 а; 1 а; 100 а; 1 ом. в) 2 а; 2 а; 2,828 а; 35 ом. 5. б) 50 ом; 2 а; в) 80 в и 60 в; г) примерно  $53^\circ$ . 6. б) 2,5 а и 3,3 а; в) 4,12 а; г) 24,3 ом; д) примерно  $53^\circ$ . 7. 0,16 мкф и 160 пф. 11. б) цепь практически активная с сопротивлением 10 ом; в)  $\varphi = 0^\circ$ ; г) 10 а. 12. а) 40, 80 и 120 в; в) 56,6 в; г) 0,707.

**Глава 10.** 1. Последовательно. 4. Четыре.



6. Парал-

лельно. 8. а) 60 ом; б)  $E = 84$  в; в)  $U = 72$  в. 9. 0,1 ом. 10. 50 ма и 25 ма.

**Глава 11.** 4. 1,2 ом и 0,1 ом. 5. 9950, 29950, 99950 и 299950 ом. 6. 1,08 Мом. 7. 200 а.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автотрансформатор 163  
 Аккумулятор  
     кислотный 299  
     серебряно-цинковый 297  
     щелочной 287  
 Активное сопротивление 139  
 Ампер 28, 45  
 Ампер-витки 105  
 Амперметр 29, 308  
 Амплитуда 128  
 Амплитудное значение 138  
 Анодная батарея 278  
 Атом 6, 9  
 Атомная энергия 11  
 Атомное ядро 8, 11  
 Атомный вес 11
- Ватт** 51  
 Ватт-секунда 50  
 Ватт-час 50  
 Величина тока 28  
 Взаимная индукция 156, 169  
 Вихревые токи 164  
 Вольт 30, 45  
 Вольтметр 36  
 Вторичная обмотка 158  
 Высокая частота 138
- Гальванический элемент 269  
     водооливной 272  
     маркировка 282  
     основные данные 283  
     сухой 274  
 Гальванометр 324  
 Генератор  
     переменного тока 128  
     постоянного тока 140  
 Генри 155  
 Гистерезис 108
- Действующее значение 136  
 Делитель напряжения 213  
 Диэлектрик 15  
 Диэлектрическая проницаемость 199  
 Диэлектрическая прочность 200  
 Длина волны 192  
 Добавочное сопротивление 319
- Емкостное сопротивление 209  
 Емкость электрическая 197
- Закон Джоуля-Ленца 54  
 Закон Кулона 16, 38  
 Закон Ома 42  
     для всей цепи 42, 44  
     для участка цепи 43, 44  
 Заряд конденсатора 204  
 Звуковые волны 138
- Измерение переменного тока** 136  
 Измерительный мост 327  
 Изолятор 15  
 Изотоп 9, 12  
 Индуктивное сопротивление 170  
 Индуктивность 151, 154, 176  
 Индуцированная э. д. с. 117  
 Индукция 101, 116, 151  
 Ион 23, 24, 26  
 Ионный ток 24
- Катюшка индуктивности 112, 151, 153  
 Килоом 31, 59

- Кислотный аккумулятор 299  
 Коэффициент полезного действия 52, 164  
 Коллектор 140  
 Конденсатор 197, 217  
     неисправности 208  
     переменной емкости 200  
     постоянной емкости 200  
     типы 200  
 Короткое замыкание 48, 56, 80  
 Косинус  $\varphi$  232  
 Коэффициент  
     взаимоиндукции 158  
     самоиндукции 154  
     связи 157  
     трансформации 160  
 Кулон 17
- Магнит** 95, 102  
 Магнитная индукция 101, 106  
 Магнитное поле 99, 101, 110, 114  
 Магнитные единицы 103, 122  
     магнитная индукция 103  
     магнитная проницаемость 104  
     магнитный поток 103  
     напряженность магнитного поля 104  
 Магнитные силовые линии 99  
 Магнитный гистерезис 108  
 Магнитный полюс 95, 97, 112  
 Мегом 31, 59  
 Микрогенри 155  
 Микрофарада 199  
 Миллигенри 155  
 Молекула 6, 11  
 Молекулярные магнетики 98  
 Мощность тока 49, 54, 56, 68, 85, 162  
     активная 253  
     реактивная 254
- Нагрузка 36, 37, 47  
 Намагничивание тел 106  
 Напряжение 35, 44, 46, 189  
 Напряженность магнитного поля 100, 106  
 Напряженность электрического поля 186  
 Неисправности  
     катушек 170  
     конденсаторов 208  
     резисторов 87  
 Нейтрон 8  
 Низкая частота 138  
 Номинальная мощность 56  
 Нуклон 8
- Ом** 31, 45  
 Омметр 326  
 Осветительная сеть 147
- Падение напряжения 47, 65, 67  
 Паразитные токи 164  
 Параллельное соединение  
     гальванических элементов 277  
     катушек L 168, 174, 228  
     конденсаторов C 207, 240  
     резисторов R 70, 74, 226  
     C и R 243  
     L и C 247  
     L, C и R 250  
     L и R 234  
 Первичная обмотка 158  
 Переменная индуктивность 167  
 Переменное напряжение 135  
 Переменный ток 126  
     измерение 136  
     параметры 127  
 Период 127  
 Петля гистерезиса 109  
 Плотность тока 56  
 Поверхностный эффект 139  
 Полезная мощность 51  
 Полная мощность 51  
 Последовательное соединение  
     гальванических элементов 276  
     катушек L 167, 174, 228  
     конденсаторов C 205, 240  
     резисторов R 64, 226  
     C и R 241  
     L и C 245  
     L, C и R 247  
     L и R 229  
 Полупроводник 15  
 Постоянная времени  $\frac{L}{R}$  177  
 Постоянная времени RC 215  
 Постоянный ток 126  
 Потери 164  
 Правило  
     Ленца 120, 153  
     левой руки 115  
     правой руки 112  
 Предохранитель 56  
 Проводимость 27, 33  
     дырочная 27  
     ионная 23  
     электронная 27  
 Проводник 15, 110, 115  
 Протон 8
- Работа** 49  
 Разность потенциалов 18, 35, 188

Радииан 130  
Радиоволны 190  
Реактивное сопротивление 170, 209  
Резисторы 64, 81, 85  
    измерение 87  
    неисправности 87  
    переменные 81  
    постоянные 84  
Резонанс  
    напряжений 255  
    токов 261  
Ротор 145

Самоииндукция 151  
Сверхпроводимость 33  
Свободные электроны 15, 21  
Сдвиг фаз 133  
Сердечники 165  
Сила тока 28  
Силовые линии  
    магнитные 99  
    электрические 186  
Сименс 34  
Синусоидалиное напряжение 135  
Синусоидалиный ток 126, 130  
Скин-эффект 139  
Смешанное соединение  
    конденсаторов 207  
    резисторов 77  
    элементов 278  
Соленоид 112  
Солнечная батарея 286  
Сопротивление 31, 44, 72  
    внешнее 46  
    внутреннее 46  
    емкостное 209  
    индуктивное 170  
    полное 231, 244  
    удельное 32  
    эквивалентное 67  
Среднее значение 138  
Статор 145

Температурный коэффициент 34  
Трансформатор 158, 176  
Трехфазное напряжение 145

Удельное сопротивление 32, 34

Фаза 133, 228, 230, 236, 242  
Фазовый угол 133  
Фарада 198  
Ферриты 109, 166

Химический элемент 7, 11, 16  
Холостой ход 48

Цепь переменного тока  
    с С 237  
    с С и R параллельно 243  
    с С и R последовательно 241  
    с L 227  
    с L и С параллельно 247  
    с L и С последовательно 245  
    с L, С и R параллельно 250  
    с L, С и R последовательно 247  
    с L и R параллельно 234  
    с L и R последовательно 229  
    с R 225

Частота 127

Шунт 317

Щелочной аккумулятор 287

Э. д. с. 30, 44, 46  
Эквивалентное сопротивление 67  
Электризация 5, 19, 20  
Электрическая емкость 197  
Электрическая проницаемость 199  
Электрические силовые линии 186  
Электрический ток 21, 25, 28, 60  
    в газах 25  
    величина 28  
    в жидких проводниках 23  
    в металлических проводниках 21  
    в полупроводниках 26  
    направление 23  
    переменный 126  
    постоянный 126  
Электрическое измерение  
    напряжения 319  
    сопротивления 321  
    тока 317  
Электричество 5, 16, 37  
Электродвигатель 143  
Электронизмерительные приборы  
    ампервольтметр 324  
    магнитоэлектрический 309  
    тепловой 313  
    термоэлектрический 316  
    условные обозначения 307, 308  
    электродинамический 314  
    электромагнитный 311

Электродвижущая сила (э. д. с.) 30, 44, 46  
Э. д. с. самоиндукции 151, 155  
Электролит 288  
Электромагнетизм 110  
Электромагнит 113  
Электромагнитная индукция 116, 158  
Электромагнитное поле 185, 190  
Электрон 8, 15, 21  
Электротехника 5  
Электростатическая индукция 126  
Энергия 5, 10, 13, 30, 38  
атомного ядра 11  
кинетическая 5  
магнитного поля 179  
электрическая 36, 49, 189  
электрического поля 217  
Эффективное значение 136  
Якорь 141



## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение . . . . .	3
<b>Глава 1. Основные понятия . . . . .</b>	<b>5</b>
1. Строение вещества . . . . .	6
2. Понятие об энергии атомного ядра . . . . .	11
3. Проводники и изоляторы . . . . .	15
4. Электрический заряд . . . . .	16
5. Разность потенциалов . . . . .	18
6. Ток в различных средах . . . . .	21
Ток в металлических проводниках . . . . .	—
Ток в жидких проводниках . . . . .	23
Ток в газах . . . . .	25
Ток в полупроводниках . . . . .	26
7. Ток. Электродвижущая сила. Сопротивление. Напряжение . . . . .	28
Ток . . . . .	—
Электродвижущая сила . . . . .	30
Сопротивление . . . . .	31
Напряжение . . . . .	35
8. Электрическая цепь . . . . .	36
Краткие выводы . . . . .	37
Вопросы для самоконтроля . . . . .	39
Упражнения . . . . .	40
<b>Глава 2. Основные законы . . . . .</b>	<b>42</b>
1. Закон Ома . . . . .	—
2. Следствия закона Ома . . . . .	44
3. Определение практических единиц . . . . .	45
4. Зависимость между э. д. с. источника тока и напряжением на его зажимах . . . . .	46
5. Работа и мощность электрического тока . . . . .	49
6. Мощность, рассеиваемая сопротивлением . . . . .	54
7. Меры предосторожности при работе с электрическим током . . . . .	60
Краткие выводы . . . . .	—
Вопросы для самоконтроля . . . . .	61
Упражнения . . . . .	62

	<i>Стр.</i>
<b>Глава 3. Соединение резисторов в цепи . . . . .</b>	<b>64</b>
1. Последовательное соединение резисторов . . . . .	—
2. Параллельное соединение резисторов . . . . .	70
3. Смешанное соединение резисторов . . . . .	77
4. Типы резисторов . . . . .	81
Краткие выводы . . . . .	88
Вопросы для самоконтроля . . . . .	90
Упражнения . . . . .	92
<b>Глава 4. Магнетизм и электромагнетизм . . . . .</b>	<b>95</b>
1. Магнетизм . . . . .	—
Природные и искусственные магниты . . . . .	—
Магнитное поле . . . . .	99
Постоянные магниты . . . . .	102
2. Магнитные единицы . . . . .	103
3. Магнитный гистерезис . . . . .	108
4. Электромагнетизм . . . . .	110
Магнитное поле вокруг проводника с током . . . . .	—
Электромагнитная индукция . . . . .	116
Краткие выводы . . . . .	121
Вопросы для самоконтроля . . . . .	123
Упражнения . . . . .	124
<b>Глава 5. Переменный ток . . . . .</b>	<b>126</b>
1. Параметры переменного тока . . . . .	127
2. Генератор переменного напряжения . . . . .	128
3. Измерение переменного тока . . . . .	136
4. Низкие и высокие частоты . . . . .	138
5. Активное сопротивление . . . . .	139
6. Генератор постоянного напряжения . . . . .	140
7. Принцип работы электродвигателя постоянного тока . . . . .	143
8. Трехфазное переменное напряжение . . . . .	145
9. Осветительная сеть . . . . .	147
Краткие выводы . . . . .	148
Вопросы для самоконтроля . . . . .	149
Упражнения . . . . .	150
<b>Глава 6. Индуктивность . . . . .</b>	<b>151</b>
1. Понятие об индуктивности . . . . .	—
2. Взаимная индукция . . . . .	156
3. Трансформаторы . . . . .	158
Автотрансформаторы . . . . .	163
Потери в трансформаторах . . . . .	164
4. Соединение катушек индуктивности . . . . .	167
5. Индуктивное сопротивление . . . . .	170
6. Фазовое соотношение в трансформаторе . . . . .	176
7. Постоянная времени $\frac{L}{R}$ . . . . .	177
8. Энергия в магнитном поле катушки индуктивности . . . . .	179
Краткие выводы . . . . .	—
Вопросы для самоконтроля . . . . .	182
Упражнения . . . . .	183
<b>Глава 7. Понятие об электрическом и электромагнитном полях . . . . .</b>	<b>185</b>
1. Электрическое поле . . . . .	—
2. Электромагнитное поле . . . . .	190

	<i>Стр.</i>
<b>Глава 8. Электрическая емкость</b> . . . . .	196
1. Электростатическая индукция . . . . .	—
2. Электрическая емкость. Конденсатор . . . . .	197
3. Заряд и разряд конденсатора . . . . .	204
4. Последовательное и параллельное соединение конденсаторов . . . . .	205
5. Емкостное сопротивление . . . . .	209
6. Емкостные делители напряжения . . . . .	213
7. Постоянная времени RC . . . . .	215
8. Энергия электрического поля конденсатора . . . . .	217
9. Конденсаторы связи для низких и радиочастот . . . . .	—
Краткие выводы . . . . .	218
Вопросы для самоконтроля . . . . .	221
Упражнения . . . . .	223
<b>Глава 9. Цепи переменного тока</b> . . . . .	225
1. Цепи с резисторами . . . . .	—
2. Цепь с катушкой индуктивности . . . . .	227
3. Цепь с последовательно соединенными катушкой и резистором . . . . .	229
4. Цепь с параллельно соединенными катушкой и резистором . . . . .	234
5. Конденсатор в цепи переменного тока . . . . .	237
6. Цепь с последовательно соединенными конденсатором и резистором . . . . .	241
7. Цепь с параллельно соединенными конденсатором и резистором . . . . .	243
8. Цепь с катушкой и конденсатором . . . . .	245
9. Цепи с активными и реактивными сопротивлениями . . . . .	247
10. Активная мощность . . . . .	253
11. Резонанс напряжений . . . . .	255
12. Резонанс токов . . . . .	261
Краткие выводы . . . . .	264
Вопросы для самоконтроля . . . . .	266
Упражнения . . . . .	267
<b>Глава 10. Химические источники тока</b> . . . . .	269
1. Принцип действия гальванического элемента . . . . .	270
2. Элементы марганцевой системы . . . . .	271
3. Соединение элементов в батареи . . . . .	276
4. Сухие анодные батареи . . . . .	278
5. Некоторые другие элементы и батареи . . . . .	284
6. Щелочные аккумуляторы . . . . .	287
7. Другие типы аккумуляторов . . . . .	294
8. Кислотные аккумуляторы . . . . .	299
Краткие выводы . . . . .	303
Вопросы для самоконтроля . . . . .	304
Упражнения . . . . .	305
<b>Глава 11. Электрические измерительные приборы</b> . . . . .	306
1. Назначение и классификация электроизмерительных приборов . . . . .	—
2. Магнитоэлектрические приборы . . . . .	309
3. Электромагнитные приборы . . . . .	311
4. Тепловые электрические приборы . . . . .	313
5. Электродинамические приборы . . . . .	314
6. Термоэлектрические приборы . . . . .	316

	<i>Стр.</i>
7. Электрические измерения . . . . .	317
Измерение тока . . . . .	—
Измерение напряжения . . . . .	319
Измерение сопротивления при помощи амперметра и вольтметра . . . . .	321
8. Ампервольтметр . . . . .	324
9. Измерительный мост . . . . .	327
Краткие выводы . . . . .	329
Вопросы для самоконтроля . . . . .	330
Упражнения . . . . .	331
Приложения:	
1. Условные графические обозначения некоторых элементов электрических схем . . . . .	332
2. Некоторые сведения из математики . . . . .	335
3. Правильные ответы на вопросы для самоконтроля . . . . .	342
4. Ответы на упражнения . . . . .	343
5. Алфавитный указатель . . . . .	345



*Тихонов Семен Николаевич*

**Электротехника для начинающих**

Редактор *Лесина Г. Ф.*  
Технический редактор *Соломоник Р. Л.*  
Корректор *Заикина З. И.*

---

Г-67507	Сдано в набор 3.7.68 г.	Подписано к печати 25.1.69 г.
Формат 60×90 <sup>1/16</sup> — 22 печ. л. (усл. печ. л. 22), 21,951 уч.-изд. л.		Бумага типографская № 3
	Тираж 100 000	
Изд. № 6/1531	Цена 92 коп.	Зак. № 1842

---

Ордена Трудового Красного Знамени  
**Военное издательство Министерства обороны СССР. Москва, К-160**

2-я типография Воениздата  
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

Цена 92 коп.

