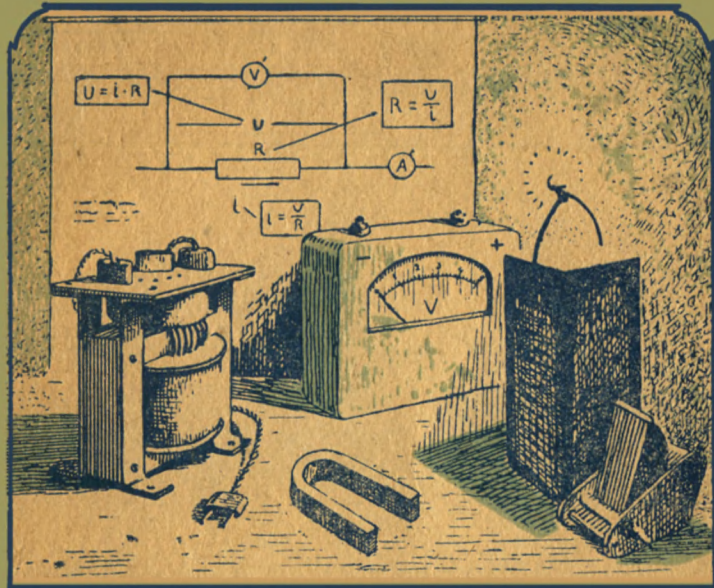


В ПОМОЩЬ РАДИОЛЮБИТЕЛЮ



И.П. ЖЕРЕБЦОВ

# Элементарная ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

С В Я З Ь И З Д А Т  
1 9 5 0

И. П. ЖЕРЕБЦОВ

# ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ  
ПО ВОПРОСАМ СВЯЗИ И РАДИО  
МОСКВА — 1950



## СО Д Е Р Ж А Н И Е

<b>Введение</b> . . . . .	3
<b>Г л а в а I. Электрический ток</b> . . . . .	5
1. Электроны и электрические заряды . . . . .	5
2. Электрический ток и величина тока . . . . .	6
3. Измерение тока . . . . .	8
4. Напряжение и его единицы . . . . .	8
5. Измерение напряжения . . . . .	9
6. Источники тока . . . . .	10
<b>Г л а в а II. Электрическая цепь и её законы</b> . . . . .	14
7. Электрическая цепь . . . . .	14
8. Электрическое сопротивление . . . . .	16
9. Закон Ома . . . . .	18
10. Последовательное соединение . . . . .	22
11. Закон Ома для всей цепи . . . . .	24
12. Параллельное соединение . . . . .	29
13. Мощность и работа тока . . . . .	34
14. Тепловое действие тока . . . . .	37
15. Сопротивления, реостаты и потенциометры . . . . .	40
<b>Г л а в а III. Электромагнитные явления</b> . . . . .	44
16. Постоянные магниты и их свойства . . . . .	44
17. Электромагниты и их применения . . . . .	47
18. Электромагнитная индукция . . . . .	51
<b>Г л а в а IV. Переменный ток и его применения</b> . . . . .	55
19. Понятие о переменном токе . . . . .	55
20. Период и частота переменного тока . . . . .	58
21. Пульсирующий ток . . . . .	59
22. Катушки индуктивности . . . . .	62
23. Трансформаторы и автотрансформаторы . . . . .	71
24. Конденсаторы . . . . .	76
<b>Заключение</b> . . . . .	88

Редактор *В. Г. Машарева*

Техн. редактор *Т. М. Морозова*

Л60395. Сдано в производство 24/II 1950 г. Подписано к печати 8/IV 1950 г.  
 Тираж 75 000 экз. Бумага  $84 \times 108 \frac{1}{32} = 1,37$  бумажных—4,51 печатных листов.  
 4,17 авт. л. 4,5 уч.-изд. л. Зак. изд. 4236. Заказ тип. 1233. Цена 2 руб. 25 коп.

13-я типография Главополиграфиздата при Совете Министров СССР  
 Москва, Гарднеровский пер., 1а.



## ВВЕДЕНИЕ



РАДИОТЕХНИКА представляет собой теорию и технику применения различных электрических токов для передачи сигналов без проводов и является дальнейшим развитием электротехники.

Современная электротехника была в значительной степени создана трудами выдающихся русских учёных и инженеров. Начало этому положил академик М. В. Ломоносов, который ещё в XVIII веке много занимался изучением электрических явлений. После него важные исследования в области электричества сделал профессор медико-хирургической академии В. В. Петров. В 1802 г. он открыл электрическую дугу, которая до сих пор служит в качестве мощного источника света, а также широко используется для электросварки и плавки металлов.

Исключительно важные работы по электричеству сделал академик Э. Х. Ленц. Он установил законы теплового действия тока и законы электромагнитной индукции.

Русский учёный П. Л. Шиллинг в 1832 г. изобрёл электромагнитный телеграф. В создании электрического телеграфа, электромоторов и других приборов большую роль сыграли также работы академика Б. С. Якоби.

Всемирное значение имело изобретение электрической лампочки накаливания русским инженером А. Н. Лодыгиным в 1873 г.

Освещение с помощью дуговых ламп впервые было осуществлено П. Н. Яблочковым, который является также изобретателем трансформатора и многих других электрических приборов. Впоследствии впервые в мире трансформаторы были построены И. Ф. Усагиным.

Основоположниками передачи электроэнергии на большие расстояния являются русские инженеры

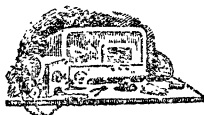
Д. А. Лачинов, М. О. Доливо-Добровольский и Р. Э. Классон.

Все эти работы русских учёных в области электричества завершились изобретением радиосвязи, сделанным в 1895 г. гениальным русским физиком и инженером А. С. Поповым. Это изобретение открыло новую эпоху в науке и технике.

После Великой Октябрьской революции развитие электротехники и радиотехники в нашей стране пошло по новому социалистическому пути. Под руководством В. И. Ленина, а затем И. В. Сталина, широко развернулись работы по электрификации и радиофикации Советского Союза. Успешное выполнение сталинских пятилеток обеспечило гигантский рост электропромышленности и электрификации народного хозяйства, а также научно-исследовательских работ в области электротехники и радиотехники. Теперь уже не одиночки учёные, а мощные коллективы учёных, инженеров, техников, рабочих стали разрешать те или иные проблемы в области электротехники и радиотехники. Работы советских учёных во многих областях опередили достижения иностранной техники. В условиях победившего социализма невиданными темпами развиваются самые разнообразные применения электричества и радио в народном хозяйстве.

Армия радиолюбителей, которая выросла и окрепла вместе с развитием отечественной электротехники и радиотехники, является резервом, из которого наша страна ежегодно черпает многочисленные кадры талантливых радистов, конструкторов и техников. Для того, чтобы знать эту технику, радиолюбители всё время должны быть в курсе её замечательных достижений.

Но для этого надо прежде всего овладеть элементами науки. В этой книге читатель найдёт изложение самых элементарных основ электротехники. Усвоив их, он сможет решать многие практические вопросы, делать некоторые простейшие расчёты и сознательно изучать дальше основы современной радиотехники.





## ГЛАВА I

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### 1. Электроны и электрические заряды



ВЕЩЕСТВА состоят из весьма малых частиц, невидимых даже в сильнейший микроскоп и называемых *молекулами*. В свою очередь молекулы состоят из ещё более мелких частиц—*атомов*. А внутри атомов любых веществ находятся ещё меньшие и весьма подвижные материальные частички — *электроны*.

Электроны являются частичками отрицательного электричества. Кроме электронов, в атомах всех веществ имеются ещё и более массивные и мало-подвижные положительно заряженные частички.

Избыток (скопление) электронов является отрицательным электрическим зарядом и обозначается знаком „минус“ (—). Недостаток электронов, наоборот, называется положительным зарядом и обозначается знаком „плюс“ (+).

Электрические заряды одинаковых знаков, т. е. положительный с положительным или отрицательный с отрицательным, взаимно отталкиваются.

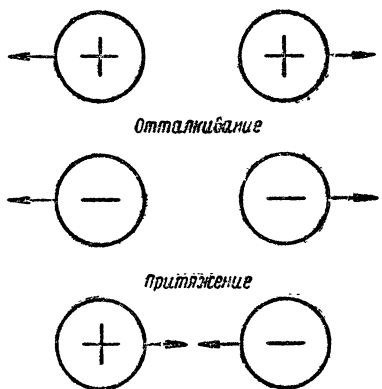


Рис. 1. Взаимодействие электрических зарядов

Так, например, электроны всегда отталкиваются друг от друга.

*Заряды разных знаков, т. е. положительный с отрицательным, наоборот, взаимно притягиваются.*

Это взаимодействие электрических зарядов наглядно показано на рис. 1.

## 2. Электрический ток и величина тока

В некоторых веществах электроны могут передвигаться из одного атома в другой или между атомами. Такие вещества мы называем *проводниками* электрического тока. К ним относятся все металлы, уголь, растворы солей, кислот и щелочей, живые организмы, земля, а также все влажные и сырые предметы. Другие вещества, в которых электроны не могут совершать подобного перемещения, называются *непроводниками* или *изоляторами* или *диэлектриками*. Изоляторами являются воздух и другие газы, стекло, фарфор, резина, пластмассы, различные смолы и маслянистые жидкости, сухое дерево, сухая бумага, сухая ткань и многие другие вещества.

*Электрический ток в твёрдых проводниках представляет собой движение электронов вдоль проводника.*

Электроны всегда двигаются от того места, где они находятся в избытке, т. е. от минуса, туда, где имеется недостаток их, т. е. к плюсу. Однако в электротехнике принято считать, что *ток идёт от плюса к минусу*. Такое направление тока было установлено совершенно условно ещё до открытия электронов. Переход к истинному направлению движения электронов представляет значительные трудности, так как для этого необходимо переделать все книги, учебники и учебные пособия по электрорадиотехнике.

Надо отметить, что скорость перемещения электронов в проводнике весьма незначительна и измеряется всего лишь долями сантиметра или миллиметра в секунду. Это объясняется тем, что электроны всё время сталкиваются с частицами проводника. Зато скорость распространения тока в проводе очень велика и достигает скорости света, т. е. 300 000 километров в секунду. Если на одном конце провода возникает ток, то

этот процесс передаётся настолько быстро, почти мгновенно, что на другом конце провода ток пойдёт практически в тот же момент. А сами электроны движутся очень медленно, испытывая всё время столкновения и трение с частицами провода. Поэтому те электроны, которые пришли в движение у начала провода, очень нескоро дойдут до его конца. Ток в проводе напоминает движение воды в длинной трубе, наполненной водой, на одном конце которой находится насос. Если накачивать в трубу воду насосом, то давление очень быстро передаётся вдоль трубы от одних частиц воды к другим и из открытого конца трубы потечёт вода. Однако вода, добавленная насосом, будет двигаться гораздо медленнее и дойдёт до конца трубы через значительный промежуток времени.

Чем больше электронов проходит в одну секунду через поперечное сечение провода, тем больше будет ток. Величину тока обозначают буквой  $I$  или  $i$  и измеряют в особых единицах — *амперах*. Если ток равен одному амперу, то это значит, что в одну секунду через поперечное сечение провода проходит вполне определённое количество электронов, выражающееся огромным числом, состоящим из шестёрки, тройки и семнадцати нулей!.. Некоторое представление об этом числе даёт следующий пример. Если все эти электроны будут проходить не сразу, а по одному миллиону в секунду, то потребуется двести тысяч лет, чтобы все они прошли!..

В обычных осветительных лампочках ток составляет несколько десятых долей ампера. В электронагревательных приборах он равен нескольким амперам, а в проводах мощных электрических линий может быть равен тысячам ампер и больше. Однако во многих случаях, особенно в радиоаппаратуре, ток бывает гораздо меньше одного ампера. Поэтому весьма часто применяют более мелкие единицы измерения тока — *миллиампер*, равный одной тысячной доле ампера, и *микроампер*, равный одной миллионной доле ампера. Сокращённо ампер обозначают буквой *a*, миллиампер — буквами *ма* и микроампер — буквами *мка*<sup>1)</sup>.

---

1) Иногда эти единицы обозначают соответственно А, мА и  $\mu$ А.



### 3. Измерение тока

Для измерения тока применяются специальные приборы *амперметры*, которые обозначаются на электрических схемах кружком с буквой *A* внутри (рис. 2). Иногда кружок пересекают наискось стрелкой. Амперметры, предназначенные для измерения более слабых токов, имеют на шкале деления в миллиамперах и их называют миллиамперметрами.

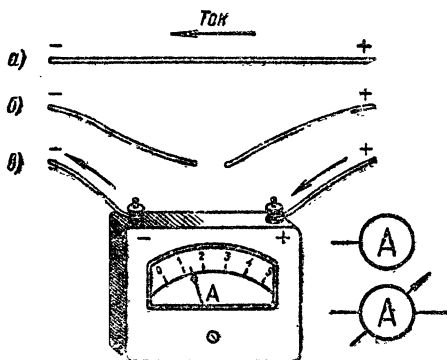


Рис. 2. Включение амперметра и его обозначение на схемах

Если нужно измерить ток, протекающий в каком-либо проводе (рис. 2а), то надо разорвать провод (рис. 2б) и в место разрыва включить измерительный прибор (амперметр или миллиамперметр), как показано на рис. 2в. Тогда весь ток пройдет через прибор и будет измерен.

Включённый прибор должен быть рассчитан на ток, заведомо больший, чем измеряемый. Нельзя, например, включать миллиамперметр на 250 *ма* для измерения тока в несколько ампер, так как прибор будет испорчен.

У многих приборов зажимы для включения имеют знаки „+“ и „-“ или один „+“ и тогда включение нужно делать в соответствии с этими знаками, т. е. плюс соединять с плюсом, минус с минусом. Несоблюдение этого правила даёт отклонение стрелки в обратную сторону, в результате чего она может погнуться.

### 4. Напряжение и его единицы

Второй основной величиной, характеризующей электрические явления, служит *напряжение*, обозначаемое буквой *U* или *u*. Для того, чтобы в каком-либо проводнике возник электрический ток, т. е. чтобы электроны пришли в движение вдоль проводника,

необходимо иметь на концах этого проводника различные электрические состояния или, как принято говорить, *различные электрические потенциалы*. На одном конце должен быть избыток электронов, а на другом — недостаток их. Напряжение характеризует именно эту разницу в электрических состояниях, т. е. разность потенциалов на концах проводника. Можно сказать, что напряжение является причиной возникновения электрического тока. Ток будет протекать в проводе тогда, когда есть напряжение.

Подобно этому газ или жидкость передвигается всегда из места с более высоким давлением в место с более низким давлением, т. е. только в случае наличия разницы в давлениях. Теплота переходит от одного тела к другому только в случае, если эти тела имеют разную температуру.

Единицей для измерения напряжения служит *вольт*, обозначаемый сокращённо буквой *в*. Кроме того, применяются более мелкие единицы: *милливольт (мв)*, т. е. тысячная доля вольта, и *микровольт (мкв)* или миллионная доля вольта, а также более крупная единица *киловольт (кв)*, равная 1000 в<sup>1</sup>).

В осветительной электросети напряжение составляет 127 или 220 в, а в электрических линиях высокого напряжения, идущих от электростанций, напряжение достигает сотен киловольт. Зато в антенне радиоприёмника под действием радиоволн, приходящих от какой-либо далёкой радиостанции, создаётся напряжение, измеряемое всего лишь несколькими микровольтами.

## 5. Измерение напряжения

Напряжение измеряют с помощью приборов, называемых *вольтметрами*. На схемах они обозначаются подобно амперметрам, но только внутри кружка ставится буква *V* (рис. 3).

Назначение вольтметра — измерять напряжение, т. е. разность электрических потенциалов, между какими-либо двумя точками. Поэтому проводники от зажимов вольтметра всегда подключаются именно к тем двум

---

<sup>1</sup>) Единицы напряжения обозначают иногда *V*, *mV*,  $\mu V$  и *kV*.

точкам, между которыми необходимо измерить напряжение. Так, например, на рис. 3 показано включение вольтметра для измерения напряжения между точками *A* и *B* на проводнике, по которому идёт ток.

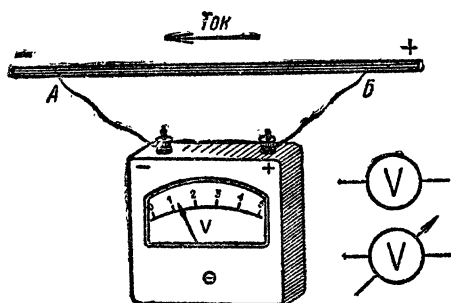


Рис. 3. Включение вольтметра и его обозначение на схемах

При включении вольтметра надо соблюдать те же предосторожности, какие были указаны для амперметра.

Нельзя, например, вольтметр со шкалой на 10 в включать для измерения совершенно неизвестного напряжения, которое может оказаться значительно больше, чем 10 в, и испортит прибор. Следует также всегда соблюдать правильную полярность включения, если на вольтметре имеется обозначение полюсов.

## 6. Источники тока

Для практических целей необходим постоянный ток, имеющий неизменную величину и протекающий в одном направлении в течение любого времени. Чтобы получить такой непрерывный электрический ток, нужно иметь постоянное напряжение. Его создают так называемые *генераторы* или *источники электродвижущей силы*.

*Электродвижущая сила* или сокращённо *эдс* является величиной, которая характеризует разность потенциалов, т. е. разность электрических состояний, созданную источником тока. Для обозначения эдс пользуются буквой *E* или *e*. Единицами измерения эдс служат те же единицы, что и для измерения напряжения.

Работу электрического генератора можно сравнить с работой насоса, который создаёт давление и обеспечивает непрерывное движение газа или воды в трубе.

В качестве источников эдс служат гальванические элементы, аккумуляторы и динамомашины, а также некоторые другие устройства. Их иначе называют *источ-*

*никами тока, или источниками питания, или источниками электрической энергии.*

Для питания радиоприёмников часто применяются гальванические элементы и батареи. Каждый гальванический элемент имеет две пластинки, обычно угольную и цинковую (называемые *электродами* или *полюсами*), находящиеся в растворе некоторого химического вещества, называемого *электролитом*. За счёт химической реакции, происходящей в элементе, на одном его полюсе получается избыток электронов, а на другом полюсе — недостаток электронов. Таким образом, химическая реакция создаёт постоянную эдс на полюсах элемента.

Отрицательным полюсом во всех элементах является цинковая пластинка, а положительным полюсом служит угольная пластинка (в некоторых элементах — медная). Наиболее распространённые, так называемые сухие элементы, имеют цинковый электрод в виде сосуда круглой или прямоугольной формы. Внутри него находится угольный электрод, а в качестве электролита используется густая киселеобразная масса, сделанная из раствора нашатыря. Сверху такой элемент залит смолой, через которую выходят две проволоочки от электродов. На рис. 4 показан внешний вид сухого элемента и его условное изображение на схемах в виде двух чёрточек. Одна из них — короткая и толстая — обозначает положительный полюс, другая — длиннее и тоньше — обозначает отрицательный полюс.

Один сухой элемент даёт напряжение примерно от 1 до 1,5 в. Ток, который можно получать от одного элемента тем больше, чем больше его размеры. Применяющиеся на практике элементы могут давать ток от

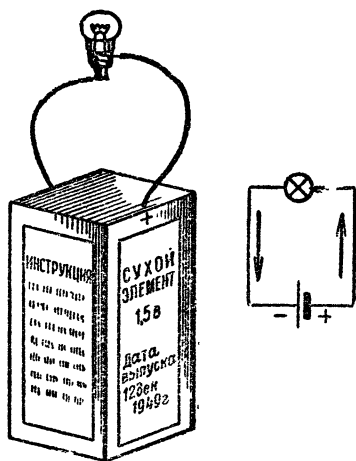


Рис. 4. Простейшая электрическая цепь и её схематическое изображение

нескольких десятков до нескольких сотен миллиампер.

Для увеличения эдс соединяют несколько элементов в батарею. Большей частью применяют так называемое последовательное соединение элементов. В этом случае плюс одного элемента соединяют с минусом второго элемента, плюс второго элемента — с минусом третьего и т. д., как показано на рис. 5. Минус первого элемента и плюс последнего при этом остаются свободными и являются полюсами всей батареи.

На схемах принято рисовать батарею из нескольких последовательно соединённых элементов, не показывая соединительные провода между отдельными элементами. Если число элементов в батарее велико, то обычно показывают только первый и последний элементы, а между ними проводят пунктирную линию, обозначающую пропущенные элементы (рис. 5).

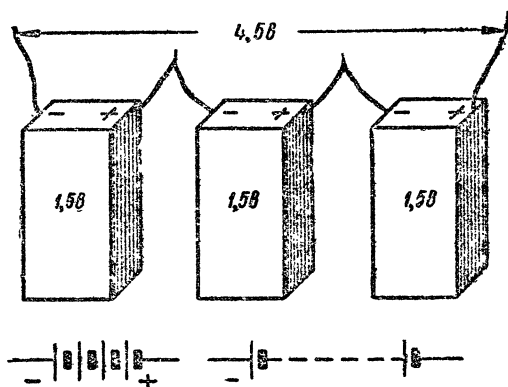


Рис. 5. Последовательное соединение элементов

При последовательном соединении элементов эдс возрастает во столько раз, сколько взято элементов. Например, если последовательно соединены три элемента, дающие каждый эдс 1,5 в, то вся батарея будет иметь эдс 4,5 в.

Для получения напряжений в несколько десятков вольт применяются сухие батареи, состоящие из большого числа маленьких сухих элементов, соединённых последовательно и находящихся в общей картонной

коробке. В таких батареях часто имеются выводы не только от крайних полюсов, но и от некоторых промежуточных элементов, чтобы можно было получать от батареи некоторую часть её полного напряжения. На рис. 6 показан внешний вид сухой батареи БАС-60 (батарея анодная сухая на 60 в), имеющей три вывода: „—“, „+40 в“ и „+60 в“.

Недостатком гальванических элементов является то, что они после некоторого срока работы (примерно нескольких месяцев) приходят в негодность.



Рис. 6. Батарея БАС-60

Помимо гальванических элементов, широкое применение имеют аккумуляторы, обозначаемые на схемах так же, как и элементы. Аккумуляторы отличаются тем, что их необходимо заряжать от других источников постоянного тока. Существует два типа аккумуляторов. Кислотный аккумулятор имеет свинцовые пластины в растворе серной кислоты и даёт эдс примерно 2 в. Щелочной аккумулятор имеет железные пластины в растворе едкой щёлочи и даёт эдс примерно 1,2 в.

Преимущество аккумуляторов заключается в том, что они способны давать гораздо более сильный ток, чем гальванические элементы. Кроме того, когда они разрядятся, их снова заряжают. Разряд и заряд можно повторять много раз и поэтому срок их службы составляет несколько лет.





## ГЛАВА II.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЁ ЗАКОНЫ

## 7. Электрическая цепь



Если соединить полюсы источника тока проводниками с тем прибором, который должен питаться током, например с лампочкой накаливания, изображаемой на схемах кружком с крестиком или просто крестиком, то получится простейшая замкнутая электрическая цепь (рис. 4). Пока действует источник тока, например, пока в элементе происходит химическая реакция, в этой цепи действует эдс и будет идти ток. Если электрическую цепь разорвать в каком-либо месте или, как говорят, разомкнуть её, ток прекратится. Но эдс будет существовать и в разомкнутой цепи.

Таким образом, для существования непрерывного тока, кроме электродвижущей силы, необходимо ещё наличие замкнутой электрической цепи.

В каждой замкнутой цепи различают *внутреннюю часть*, т. е. элемент или другой источник тока, и *внешнюю часть*, к которой относятся все приборы и проводяда, подключённые к генератору.

Поток электронов в замкнутой цепи движется от минуса источника через внешнюю цепь, например через лампочку, к плюсу источника. Далее он проходит внутри источника от плюса к минусу. Как мы уже говорили, условно считают, что ток во внешней цепи идёт от плюса к минусу, т. е. в направлении, обратном истинному движению электронов. Для изучения различных более сложных схем очень важно помнить, что в любой замкнутой цепи ток обязательно проходит через источник эдс.

Важно также хорошо усвоить разницу между эдс и током. Эдс, создающая разность потенциалов между полюсами гальванического элемента или другого источника тока, существует независимо от того, замкнута цепь или нет, есть ли ток или его нет. А ток может иметь определённое значение только при условии, что цепь замкнута. Таким образом, эдс есть причина, вызывающая появление тока, а ток характеризует уже само движение электронов. Подобно этому, если в водопроводной системе все краны закрыты, то движения воды по трубам нет и ни о каком водяном потоке говорить нельзя, хотя давление или напор воды существует. Но стоит только открыть кран, чтобы под действием этого давления началось движение воды, и тогда в трубах получится некоторый определённый водяной поток.

Если в разные части простейшей электрической цепи, состоящей из элемента, замкнутого на лампочку, включить амперметры, то все они покажут ток одинаковой величины. Такая цепь характерна тем, что все приборы в ней, т. е. лампочка, элемент, амперметры, включены друг за другом последовательно. Ток проходит все приборы или все участки цепи последовательно один за другим. Подобная цепь называется *последовательной цепью*, а включение приборов в ней называют *последовательным соединением*.

*В последовательной цепи ток везде одинаков.* Закон этот является очень важным, но многие часто делают ошибки, считая, что ток, выходя из одного полюса источника, постепенно уменьшается вдоль своего пути и к другому полюсу приходит уже более слабым. Но это означало бы, что часть электронов где-то задерживается и накапливается, чего, конечно, нет на самом деле.

Закон постоянства тока в отдельных участках последовательной цепи остаётся в силе при любом количестве включённых последовательно приборов.

Надо иметь в виду, что источник эдс всегда соединён последовательно с внешней частью цепи. Поэтому ток внутри источника будет таким же, как и во внешней цепи. Иначе говоря, через генератор всегда проходит полный ток, потребляемый внешней цепью.



## 8. Электрическое сопротивление

Рассмотрим теперь ещё одну важную величину, характеризующую электрическую цепь.

Нам известно, что различные вещества неодинаково проводят электрический ток и поэтому разделяются на проводники и диэлектрики. Влияние самого проводника на величину тока учитывается с помощью *электрического сопротивления*, называемого обычно просто *сопротивлением* и зависящего от размеров проводника и его материала. Сущность сопротивления заключается в том, что электроны тока при своём движении сталкиваются с частицами самого проводника и нагревают его.

Чем длиннее и чем тоньше провод, тем больше его сопротивление.

Из различных материалов наименьшим сопротивлением обладают серебро и медь. Несколько больше сопротивление у алюминия и ещё больше у стали. В некоторых случаях бывает необходимо создать большое сопротивление для

тока. Тогда используются провода из специальных сплавов высокого сопротивления, к которым относятся *никелин*, *константан*, *манганин*, *нихром* и другие. Очень большие сопротивления делаются из угля. Нихром и некоторые другие сплавы обладают большой теплостойкостью, т. е. могут долго выдерживать высокую температуру, и поэтому применяются для

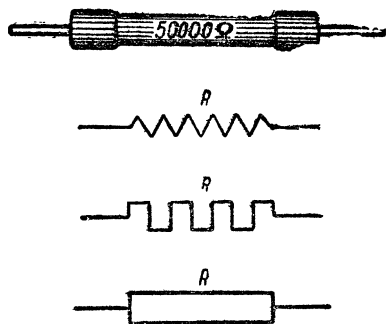


Рис. 7. Внешний вид непроволочного сопротивления и изображение сопротивлений на схемах

электронагревательных приборов.

Для измерения сопротивлений служат единицы: *ом*, *килоом*, равный тысяче ом, и *мегом*, равный миллиону ом. Эти единицы имеют сокращённые обозначения: *ом*, *ком* и *мгом*<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> На самих сопротивлениях эти единицы иногда обозначают  $\Omega$ ,  $k\Omega$  и  $M\Omega$ .

Сопротивлением в 1 *ом* обладает медная проволочка длиной в 1 *м* и диаметром в 0,15 *мм*. У медных соединительных проводов сопротивление всегда очень невелико и составляет ничтожные доли *ома*. Электронагревательные приборы имеют сопротивление порядка десятков *ом*, нити различных электроламп обладают сопротивлением от десятков до сотен *ом*, а у диэлектриков сопротивление измеряется сотнями и тысячами *мегом*. В радиоаппаратуре применяются весьма различные сопротивления от единиц *ом* до нескольких *мегом*. На рис. 7 показан внешний вид угольных сопротивлений, применяемых в радиоаппаратуре, а также даны условные изображения сопротивлений на схемах. Для обозначения сопротивлений принята буква *R* или *r*.

Величину сопротивления различных проводов можно рассчитать с помощью табл. 1.

Таблица 1

**Данные некоторых проводов**

Диаметр <i>мм</i>	Сечение <i>мм²</i>	Сопротивление одного метра провода (в <i>омах</i> )				Допустимый ток в амперах при плотности тока 2 <i>а/мм²</i>
		медь	никелин, манганин	констан- тан	нихром	
0,05	0,002	8,9	212	245	510	0,0039
0,08	0,005	3,5	82,5	95,4	199	0,010
0,1	0,0079	2,2	53,0	61,1	127	0,016
0,12	0,011	1,6	37,6	42,6	88,5	0,022
0,15	0,018	1,0	23,5	27,2	56,5	0,035
0,2	0,031	0,55	13,2	15,3	31,9	0,063
0,25	0,049	0,36	8,45	9,78	20,4	0,098
0,3	0,07	0,25	5,36	6,80	14,2	0,14
0,4	0,126	0,14	3,30	3,80	7,94	0,25
0,5	0,196	0,09	2,12	2,45	5,10	0,39
0,6	0,283	0,06	1,45	1,69	3,54	0,57
0,7	0,385	0,045	1,08	1,25	2,60	0,77
0,8	0,5	0,035	0,825	0,954	1,99	1,0
1,0	0,79	0,023	0,530	0,611	1,27	1,57

Примечания: 1. Данные для проводов, отсутствующих в таблице, надо брать как некоторые средние, например для провода из никелина диаметром 0,18 *мм* можно считать, что сечение равно 0,025 *мм²*, сопротивление одного метра 17 *ом*, а допустимый ток 0,05 *а*.

2. Для другой плотности тока данные последнего столбца нужно соответственно изменить, например для плотности тока 6 *а/мм²* их следует увеличить в 3 раза.

## 9. Закон Ома

Основным законом электро-радиотехники, с помощью которого можно изучать различные электрические цепи, является закон Ома, связывающий между собой величины тока, напряжения и сопротивления. Многие другие законы электротехники, по существу, вытекают из закона Ома. Поэтому необходимо отчётливо представлять себе применение этого закона в самых различных случаях, понимать его сущность и уметь правильно пользоваться им в решении практических задач. Во многих вопросах электротехники и радиотехники часто делают ошибки именно из-за неумения правильно применять закон Ома.

Закон Ома гласит:

*Ток тем больше, чем больше напряжение и чем меньше сопротивление.*

Если увеличить в несколько раз напряжение, действующее в электрической цепи, то ток в этой цепи увеличится во столько же раз. А если увеличить в несколько раз сопротивление цепи, то ток во столько же раз уменьшится. Подобно этому водяной поток в трубе тем больше, чем сильнее давление и чем меньше сопротивление, которое оказывает труба движению воды.

Чтобы закон Ома можно было выразить математически наиболее просто, за единицу сопротивления выбрали сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 *в* получается ток 1 *а*. Именно такое сопротивление и составляет 1 *ом*.

Тогда оказывается, что ток в амперах можно всегда рассчитать, если разделить напряжение в вольтах на сопротивление в омах. Поэтому закон Ома выражают обычно в виде следующей формулы:

$$\boxed{\text{ток} = \frac{\text{напряжение}}{\text{сопротивление}}}$$

Пользуясь буквенными обозначениями, пишут

$$\boxed{I = \frac{U}{R}} \quad \text{или} \quad \boxed{i = \frac{u}{r}}$$

Расчёты по закону Ома правильны в случае, когда напряжение выражено в вольтах, сопротивление в омах и ток в амперах. Если эти величины даны в других единицах, например, в миллиамперах, милливольтах, мегомах и т. д., то их сначала надо превратить соответственно в амперы, вольты и омы. Чтобы подчеркнуть это, иногда формулу закона Ома пишут в таком виде:

$$\text{амперы} = \frac{\text{вольты}}{\text{омы}}$$

Можно также рассчитывать ток в миллиамперах, если сопротивление выражено в килоомах, а напряжение в вольтах, т. е.

$$\text{миллиамперы} = \frac{\text{вольты}}{\text{килоомы}}$$

В таком виде эта формула более удобна для расчётов радиотехнических цепей.

Закон Ома справедлив для любого участка цепи. Если требуется определить ток в данном участке цепи, то необходимо напряжение, действующее на этом участке, разделить на сопротивление именно этого же участка (рис. 8).

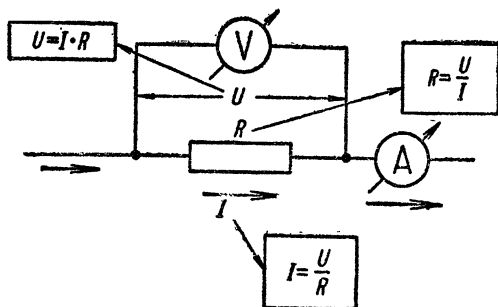


Рис. 8. Применение закона Ома к участку цепи

Приведём пример на расчёт тока по закону Ома. Пусть требуется определить ток в лампочке, имеющей сопротивление 2,5 ом, если напряжение, приложенное

к нити лампы, равно 5 в. Разделив 5 в на 2,5 ом, получим ток 2 а. Второй пример сделаем на определение тока, который получится под действием напряжения 500 в в сопротивлении, равном 0,5 мгом. Для вычисления необходимо выразить сопротивление в омах. Тогда получим 500 000 ом. Если разделить 500 в на 500 000 ом, то найдём, что ток будет 0,001 а или 1 ма

$$I = \frac{500}{500\,000} = 0,001 \text{ а.}$$

Очень часто приходится определять по закону Ома напряжение, зная ток и сопротивление. Формула закона Ома для этого случая будет следующая:

$$\boxed{\text{напряжение} = \text{ток} \times \text{сопротивление}} \quad \text{или} \quad \boxed{U = I \cdot R}$$

Можно также писать:

$$\boxed{\text{вольты} = \text{амперы} \times \text{омы}}$$

или

$$\boxed{\text{вольты} = \text{миллиамперы} \times \text{килоомы}}$$

Из приведённых формул видно, что чем больше сопротивление и чем больше ток, тем большее напряжение будет на концах данного сопротивления или участка цепи. Смысл этой зависимости понять нетрудно. Если не изменять величину сопротивления, то увеличить ток можно только путём соответствующего увеличения напряжения. Значит, при постоянном сопротивлении большему току всегда соответствует большее напряжение. Если же мы захотим получить одну и ту же величину тока в различных сопротивлениях, то ясно, что к большему сопротивлению должно быть приложено соответственно большее напряжение.

Очень часто напряжение в данном участке цепи называют *падением напряжения*. Этот термин нередко приводит к недоразумению. Многие думают, что „падение“ напряжения есть обязательно какое-то потерянное, ненужное напряжение. Между тем понятия „напряжение“ и „падение напряжения“ совершенно равнозначны.

Расчёт напряжения по закону Ома можно показать на следующем примере. Пусть через сопротивление

10 *ком* проходит ток 5 *ма* и требуется определить падение напряжения на этом сопротивлении. Выразим ток в амперах. Получится 0,005 *а*. Умножив эту величину на 10 000 *ом*, найдём, что напряжение равно 50 *в*. Действительно:  $U = I \cdot R = 0,005 \cdot 10\,000 = 50$  *в*. Можно было получить тот же результат, если сразу умножить 5 *ма* на 10 *ком*:  $U = 5 \cdot 10 = 50$  *в*.

Третьим и последним случаем применения закона Ома является расчёт величины сопротивления, если известны напряжение и ток. Формула для этого случая пишется следующим образом:

$$\boxed{\text{сопротивление} = \frac{\text{напряжение}}{\text{ток}}} \quad \text{или} \quad \boxed{R = \frac{U}{I}}$$

Можно также писать:

$$\boxed{\text{омы} = \frac{\text{вольты}}{\text{амперы}}} \quad \text{или} \quad \boxed{\text{килоомы} = \frac{\text{вольты}}{\text{миллиамперы}}}$$

Сопротивление всегда представляет собой отношение напряжения к току.

Если напряжение, приложенное к данному сопротивлению, увеличить или уменьшить в несколько раз, то ток увеличится или уменьшится в такое же число раз, а отношение напряжения к току, равное величине сопротивления, останется неизменным.

Не следует понимать формулу закона Ома для сопротивления в том смысле, что сопротивление данного проводника зависит от тока и напряжения. Хорошо известно, что оно зависит исключительно от длины, толщины и материала проводника. Хотя по внешнему виду формула для определения сопротивления несколько напоминает формулу для расчёта тока, но между ними имеется принципиальная разница. Ток в данном участке цепи действительно зависит от напряжения и сопротивления и изменяется при изменении этих величин. А сопротивление данного участка цепи является величиной постоянной, не зависящей от изменения напряжения и тока, но равной отношению этих величин. Именно так и следует понимать третий вариант формулы закона Ома.

Когда один и тот же ток получается в двух каких-то сопротивлениях, а напряжения, приложенные к этим сопротивлениям, различны, то ясно, что сопротивление, к которому приложено большее напряжение, имеет соответственно большую величину. А если под действием одного и того же напряжения в двух разных сопротивлениях получается различный ток, то ясно, что меньший ток всегда будет в том сопротивлении, которое больше. Всё это, по существу, вытекает из основной формулировки закона Ома, т. е. из того, что ток тем больше, чем больше напряжение и чем меньше сопротивление.

Расчёт сопротивления по закону Ома покажем на следующем примере. Пусть требуется найти величину сопротивления, через которое при напряжении 40 в идёт ток 50 *м*а. Выразим ток в амперах:  $I = 0,05 \cdot a$ . Разделив 40 на 0,05, найдём, что сопротивление имеет 80 *ом*:

$$R = \frac{40}{0,05} = 80 \text{ ом.}$$

## 10. Последовательное соединение

При изучении любой электрической цепи, простой или сложной, нужно всегда понимать, что происходит с основными электрическими величинами: током, сопротивлением и напряжением. Последовательная цепь является основной цепью. Мы уже отмечали, что замкнутая цепь представляет собой последовательное соединение своей внешней части с источником и что ток в последовательной цепи везде одинаков. Рассмотрим теперь другие важные законы последовательной цепи.

Пусть имеется электрическая цепь, в которой последовательно включены несколько сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , т. е. несколько приборов, обладающих различными сопротивлениями (рис. 9). Нетрудно сообразить, что *общее сопротивление  $R$  последовательной цепи равно сумме отдельных сопротивлений*:

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

Иначе говоря, при последовательном соединении сопротивление цепи возрастает. Ток проходит все со-

противления одно за другим, что равносильно как бы увеличению длины провода.

Напряжение распределяется между отдельными участками цепи соответственно их сопротивлениям. На

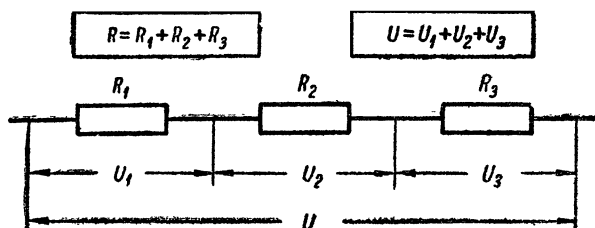


Рис. 9. Последовательное соединение сопротивлений

участке с большим сопротивлением падение напряжения соответственно больше. Общее напряжение  $U$ , приложенное к последовательной цепи, всегда равно сумме напряжений отдельных участков:

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

Такое разделение общего напряжения между отдельными участками цепи вытекает из закона Ома. Напряжение на любом участке определяется произведением тока на сопротивление этого участка. Но ток везде одинаков. Поэтому напряжение на отдельных участках цепи зависит от сопротивления.

Поясним эти свойства последовательной цепи численным примером. К электрической сети с напряжением  $U = 120$  в включены два сопротивления  $R_1 = 20$  ом и  $R_2 = 40$  ом, соединённые последовательно. Нужно найти общее сопротивление цепи  $R$ , ток  $I$  и напряжение на отдельных участках  $U_1$  и  $U_2$ . Общее сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений:  $R = 20 + 40 = 60$  ом. Ток найдём делением полного напряжения 120 в на общее сопротивление 60 ом:

$$I = \frac{120}{60} = 2 \text{ а.}$$

Умножая ток на сопротивление отдельных участков, определим напряжение на каждом из них:

$$U_1 = 2 \cdot 20 = 40 \text{ в; } U_2 = 2 \cdot 40 = 80 \text{ в.}$$



Сумма этих напряжений равна полному напряжению 120 в.

Рассмотрим ещё некоторые свойства последовательной цепи. Если изменить сопротивление одного из участков последовательной цепи, то изменится ток не только в этом участке, но и во всех остальных частях цепи. При этом, очевидно, изменятся и напряжения на отдельных участках. Произойдёт перераспределение напряжения в цепи. Если произошёл разрыв цепи в одном из её участков, то ясно, что ток прекратится во всей цепи.

Таким образом, работа всей цепи сильно зависит от каждого её участка. Нельзя изменить работу какого-либо участка цепи без влияния на работу остальных участков. Это свойство последовательной цепи иногда является её недостатком. Например, если соединить осветительные лампочки последовательно, то при выключении одной из них, погаснут и все остальные. Кроме того, в последовательной цепи для получения определённого тока при увеличении числа включённых сопротивлений необходимо увеличивать напряжение, что не всегда возможно.

## 11. Закон Ома для всей цепи

Каждый источник тока всегда сам обладает некоторым сопротивлением. Его называют *внутренним сопротивлением* и обозначают  $R_i$ . Электроны, двигаясь внутри генератора, встречают в нём сопротивление, как и в любом проводнике (рис. 10). Величина  $R_i$  для различных источников весьма различна и может быть от долей ома до тысяч и даже миллионов ом. Более мощные источники тока, способные давать более сильный ток, имеют обычно меньшее  $R_i$ . А у маломощных генераторов  $R_i$  бывает более высоким. Так, например, аккумуляторы имеют  $R_i$  порядка сотых долей ома. У сухих элементов  $R_i$  может быть от десятых долей ома до нескольких ом, а у сухих батарей с большим числом последовательно соединённых элементов  $R_i$  доходит до десятков и даже сотен ом. По мере разряда внутреннее сопротивление элементов и аккумуляторов увеличивается.

Если внутреннее сопротивление генератора незначи-

тельно по сравнению с сопротивлением внешней цепи, то его не принимают во внимание, но это далеко не всегда допустимо.

Общее сопротивление всей замкнутой цепи, которая, как мы знаем, всегда является последовательным соединением источника и внешней части цепи, равно сумме внешнего и внутреннего сопротивлений:

$$R_{\text{общ}} = R + R_i.$$

Именно эта величина полного сопротивления и определяет ток в цепи. При прохождении тока через внутреннее сопротивление генератора на нём, как и на всяком сопротивлении, получается падение напряжения  $U_i$ , которое можно под-

считать, умножив ток на сопротивление:  $U_i = I \cdot R_i$ . Иначе говоря, часть эдс источника расходуется на преодоление внутреннего сопротивления самого источника.

Падение напряжения  $U_i$  внутри генератора на его сопротивлении  $R_i$  является потерянным. Напряжение во внешней цепи  $U$  всегда меньше, чем эдс источника  $E$ , на величину этого внутреннего падения напряжения. Значит, можно написать:

$$U = E - U_i \quad \text{или} \quad U = E - I \cdot R_i.$$

Иначе говоря, эдс генератора является суммой падений напряжения на  $R$  и на  $R_i$ , т. е.  $E = U + U_i$ .

Напряжение внешней цепи  $U$  есть не что иное, как напряжение на зажимах или полюсах генератора, так как концы внешней цепи подключены к полюсам генератора. Если присоединить к зажимам генератора вольтметр, то он покажет именно это напряжение (рис. 11а), но не падение напряжения внутри генератора. Последнее вообще невозможно измерить с помощью вольтметра.

Как видно, между понятиями электродвижущей силы и напряжения есть некоторая разница. Электро-

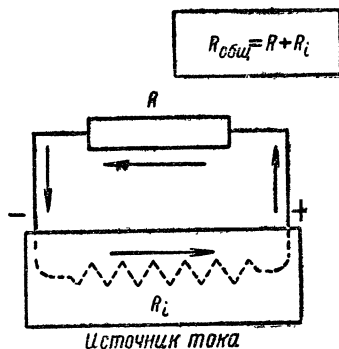


Рис. 10. Внутреннее сопротивление источника тока

движущая сила действует во всей замкнутой цепи, а напряжение является разностью потенциалов только на каком-то участке цепи, например на внешней её части. Поэтому напряжение всегда меньше эдс, оно составляет лишь какую-то часть эдс.

Если внутреннее сопротивление генератора невелико, то падение напряжения на нём также малое, и можно приближённо считать, что напряжение на зажимах генератора равно его эдс  $U \approx E$ . Возможен случай, когда разность потенциалов на полюсах генератора точно равна эдс. Это будет в случае, когда внешняя цепь

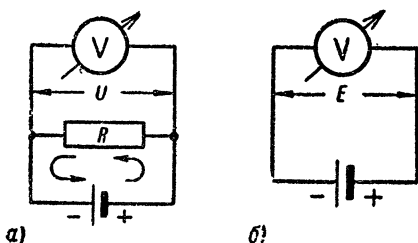


Рис. 11. Измерение напряжения на зажимах источника тока (а) и измерение эдс (б)

разомкнута. Тогда ток равен нулю и поэтому нет падения напряжения внутри генератора ( $U_i = 0$ ). Значит эдс можно определить как разность потенциалов на полюсах разомкнутого генератора. Чтобы измерить эдс источника тока, нужно подключить к его полюсам вольтметр, а внеш-

нюю цепь отсоединить (рис. 11б).

Ток в замкнутой цепи надо находить делением эдс, на полное сопротивление цепи, т. е. на сумму внешнего и внутреннего сопротивлений:

$$I = \frac{E}{R + R_i} \quad \text{или} \quad I = \frac{E}{R_{\text{общ}}}$$

Это соотношение обычно называют законом Ома для всей цепи. Рассмотрим следующий пример на применение этого закона. Имеется источник тока, у которого эдс равна  $E = 60$  в, а  $R_i = 100$  ом. К этому источнику подключено сопротивление  $R = 500$  ом. Найти ток в цепи, напряжение на зажимах источника и падение напряжения на внутреннем сопротивлении. Решение этой задачи не представляет трудностей. Полное сопротивление цепи будет:  $R_{\text{общ}} = R_i + R = 100 + 500 = 600$  ом. Ток найдём, разделив эдс на полное сопротивление цепи. Получим ток 0,1 а:  $I = 60 : 600 = 0,1$  а.

Применив закон Ома к внешнему сопротивлению, т. е. умножив ток на внешнее сопротивление, найдём, что напряжение на зажимах источника равно 50 в:  $U = I \cdot R = 0,1 \cdot 500 = 50$  в. Отсюда уже ясно, что напряжение, потерянное внутри источника, составляет 10 в. Можно эту величину найти также, применяя закон Ома к внутреннему сопротивлению. Умножая ток на  $R_i$ , получим те же 10 в:  $U_i = I \cdot R_i = 0,1 \cdot 100 = 10$  в.

Интересно выяснить, как изменяется напряжение на зажимах источника  $U$  при уменьшении внешнего сопротивления  $R$ , называемого часто *нагрузочным сопротивлением*. Продолжая рассмотренный пример, предположим, что  $R$  уменьшилось до 200 ом. Тогда  $R_{\text{общ}} = 300$  ом. Ток станет равным 0,2 а. Применяя опять закон Ома к внешнему сопротивлению, найдём, что  $U = 40$  в, а  $U_i = 20$  в.

Как видно, уменьшение внешнего сопротивления сопровождается уменьшением напряжения на зажимах генератора и увеличением напряжения, потерянного на внутреннем сопротивлении. Значит, уменьшение внешнего сопротивления невыгодно. Чем меньше внешнее сопротивление, тем меньше полезное напряжение на зажимах источника и тем больше потеря напряжения внутри генератора.

Представим теперь себе случай, когда внешнее сопротивление уменьшено до нуля, например, полюсы генератора замкнуты проводником, имеющим весьма малое сопротивление. Этот случай называют *коротким замыканием* (рис. 12а). Ток при коротком замыкании получится наибольшим, так как в цепи останется одно внутреннее сопротивление, и его можно найти делением эдс на внутреннее сопротивление. Полезное напряжение на зажимах генератора станет равно нулю, и вся эдс будет падать на внутреннем сопротивлении.

Ясно, что короткое замыкание является случаем совершенно бесполезной работы генератора. Полезное нагрузочное сопротивление отсутствует, и вся энергия генератора теряется на его внутреннем сопротивлении. Режим короткого замыкания не только бесполезен, но и весьма опасен для многих генераторов, так как в этом режиме величина тока может быть недопустима для данного генератора. Это особенно относится к генераторам с малым  $R_i$ , например к аккумуляторам, у которых

при коротком замыкании получается очень большой ток.

Случаю короткого замыкания противоположен рассмотренный выше случай разомкнутой внешней цепи, когда ток в цепи отсутствует, т. е. когда генератор работает *вхолостую* или в режиме *холостого хода* (рис. 12 б). В этом режиме напряжение на зажимах генератора наибольшее и равно его эдс. Этот случай является наивыгоднейшим с точки зрения получения наибольшего полезного напряжения. Если внешнее сопротивление в несколько раз больше внутреннего сопротивления, то потерянное внутри генератора напряжение невелико, и напряжение на зажимах генератора близко к величине эдс. Именно такой режим нагрузки генератора почти всегда является наиболее желательным.

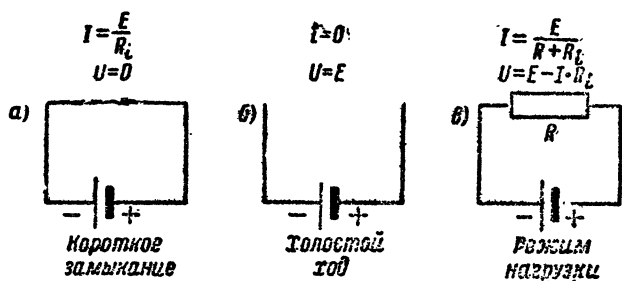


Рис. 12. Различные режимы работы источника тока

Потеря напряжения имеет место не только на внутреннем сопротивлении, но и в соединительных проводах. Во многих случаях этой потерей пренебрегают, так как сопротивление соединительных проводов обычно невелико. Но, если эти провода имеют значительную длину или если ток имеет большую величину, то падение напряжения в проводах может быть весьма заметным, и полезное напряжение на нагрузочном сопротивлении уменьшается. Примером этого является понижение напряжения в электрической сети в вечерние часы. Днём и ночью, когда потребление тока сравнительно невелико, падение напряжения в проводах сети незначительно, и поэтому напряжение, подводимое к лампочкам или для питания сетевых приёмников, имеет нормальную величину, например 127 в. Вечером потребление тока

резко возрастает, падение напряжения в проводах увеличивается, и полезное напряжение на лампочках уменьшается до 100 или 90 в, а иногда даже и ещё ниже.

## 12. Параллельное соединение

Помимо последовательного соединения, в электротехнике широко используется параллельное соединение (рис. 13), которое по своим свойствам совершенно противоположно последовательному соединению.

При параллельном соединении полный ток, идущий от генератора, разделяется на несколько токов по числу включённых сопротивлений. Все эти частичные токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  одновременно параллельно проходят через отдельные сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

Точки А и В, в которых происходит разделение тока на части, называют *точками разветвления*. Само разделение тока принято называть *разветвлением*, а отдельные сопротивления, включённые параллельно, часто называют *ветвями* или *ответвлениями*.

В отличие от последовательного соединения, для которого характерна одинаковость тока во всех частях цепи, *при параллельном соединении на всех включённых сопротивлениях напряжение всегда одинаково*.

Каждое сопротивление подключено к полюсам генератора. Если пренебрегать сопротивлением соединительных проводов, то можно считать, что напряжение генератора приложено к каждой ветви параллельной цепи. Многие делают в этом ошибки, думая, что при различном сопротивлении ветвей напряжение на них различно. Надо помнить, что независимо от величины сопротивлений, включённых параллельно, напряжение на них всегда одинаково.

Разветвление тока при параллельном соединении происходит по следующему закону.

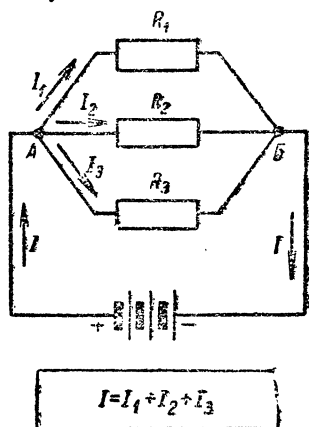


Рис. 13. Параллельное соединение сопротивлений

*Сумма токов, отходящих от точки разветвления, т. е. сумма токов ветвей, равна полному току, протекающему от генератора к точке разветвления или*

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

В точке разветвления не может происходить потеря части электронов. Не может в ней также создаваться дополнительное количество электронов. Поэтому общее количество электронов, проходящих в одну секунду через поперечное сечение всех ветвей, такое же, как и в проводе до точки разветвления. Конечно, и для второй точки разветвления, в которой все токи снова соединяются вместе, справедливо такое же правило: *сумма токов, приходящих к этой точке, равна току, отходящему от неё.*

Подобный закон имеет место для воды, например, в случае разветвления реки на два рукава. Общее количество воды, протекающей в обоих рукавах, всегда равно количеству воды в главном русле, так как в месте разветвления вода никуда не исчезает и ниоткуда дополнительно не прибывает.

По существу, этот закон является следствием рассмотренного ранее закона постоянства тока в отдельных частях последовательной цепи. Действительно, хотя отдельные ветви соединены между собой параллельно, но все они, вместе взятые, включены в цепь последовательно. Поэтому суммарный ток в них должен быть такой же, как и в остальных частях цепи.

Применяя закон Ома к отдельным ветвям, нетрудно решить вопрос о том, на какие части делится ток при параллельном соединении. Если включённые сопротивления одинаковы, то ток разделится на равные части. Например, если параллельно включено четыре одинаковых сопротивления, то через каждое из них протекает ток, составляющий одну четверть полного тока. Несколько сложнее случай неодинакового сопротивления ветвей. Так как напряжение на ветвях одно и то же, токи в них неодинаковы. Там, где сопротивление больше, ток меньше, и, наоборот, через ветвь с меньшим сопротивлением пойдёт большая часть тока.

Рассмотрим следующий числовой пример. Предпо-

ложим, что две лампочки, имеющие сопротивления  $R_1 = 300 \text{ ом}$  и  $R_2 = 600 \text{ ом}$ , соединены параллельно и подключены к напряжению  $U = 120 \text{ в}$ . Найдём ток в каждой лампочке и общий ток. Очевидно ток в первой лампе будет равен:  $I_1 = 120:300 = 0,4 \text{ а}$ . Во второй лампочке получится ток:  $I_2 = 120:600 = 0,2 \text{ а}$ . Общий ток равен сумме токов ветвей и составляет:

$$I = I_1 + I_2 = 0,4 + 0,2 = 0,6 \text{ а}.$$

Рассмотрим теперь сопротивление параллельной цепи. В отличие от последовательной цепи, в которой при включении новых приборов сопротивление увеличивается, при параллельном соединении в этом случае сопротивление уменьшается.

Пусть в цепь включено только одно сопротивление, через которое проходит некоторый ток. Включение параллельно ещё такого же сопротивления равносильно увеличению вдвое площади поперечного сечения провода, следовательно, сопротивление цепи вдвое уменьшится. При включении параллельно третьего сопротивления такой же величины площадь сечения увеличится втрое, и общее сопротивление цепи втрое уменьшится. Чем больше сопротивлений включается параллельно, тем больше путей есть для тока и тем меньше общее сопротивление цепи.

Таким образом, *при параллельном соединении одинаковых сопротивлений общее или эквивалентное сопротивление уменьшается во столько раз, сколько включено ветвей.*

Например, если соединены параллельно три сопротивления по  $60 \text{ ом}$ , то полное сопротивление равно  $20 \text{ ом}$ .

При параллельном включении различных сопротивлений общее сопротивление также уменьшается и будет всегда меньше самого меньшего из включённых сопротивлений. Это правило нетрудно понять. Если в цепь сначала включено одно наименьшее сопротивление, то подключение к нему любого другого большего сопротивления параллельно создаёт дополнительный путь для тока, т. е. как бы несколько увеличивает сечение провода, и сопротивление цепи, конечно, уменьшается.

Расчёт величины полного сопротивления цепи при параллельном соединении большого числа различных



сопротивлений довольно сложен. На практике чаще всего бывают параллельно соединены только два сопротивления. Если они различны по величине, то для определения полного сопротивления  $R$  нужно умножить одно сопротивление  $R_1$  на другое  $R_2$  и полученное произведение разделить на сумму этих сопротивлений:

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

Например, если параллельно соединены сопротивления  $R_1 = 20 \text{ ом}$  и  $R_2 = 30 \text{ ом}$ , то общее сопротивление такой разветвлённой цепи определяется следующим образом:

$$R = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = \frac{600}{50} = 12 \text{ ом}.$$

Как видно,  $R$  получилось меньше, чем меньшее из включённых сопротивлений, т. е. меньше, чем  $20 \text{ ом}$ .

В параллельном соединении главную роль всегда играет меньшее из включённых сопротивлений, так как через него идёт большая часть полного тока.

Иногда могут быть параллельно соединены два сопротивления весьма различной величины. Тогда в большее сопротивление отводится ничтожная часть тока и оно почти не влияет на величину общего сопротивления. В этом случае общее сопротивление уменьшается незначительно по сравнению с меньшим из включённых сопротивлений.

Параллельное включение дополнительного сопротивления называют иногда *шунтированием*. Значит, при шунтировании какого-либо сопротивления другим, значительно большим сопротивлением, общее сопротивление приближённо можно считать неизменившемся.

Это наглядно показывает следующий числовой пример. Найдём общее сопротивление, если параллельно соединены сопротивления  $100 \text{ ом}$  и  $10\,000 \text{ ом}$ :

$$R = \frac{100 \cdot 10\,000}{100 + 10\,000} = 99 \text{ ом}.$$

Как видно, общее сопротивление почти равно  $100 \text{ ом}$ .

Достоинством параллельного сопротивления является независимость работы каждой ветви от других ветвей.

При параллельном соединении можно выключить одну из ветвей, но остальные ветви будут работать попрежнему, а если изменить сопротивление какой-либо ветви, то в ней ток изменится, но в остальных ветвях изменений не будет. Поэтому различные потребители в электрической сети, т. е. лампочки накаливания, электронагревательные приборы, электромоторы и т. д., почти всегда включаются параллельно.

Практически всё же иногда наблюдается некоторое влияние одной ветви на другую вследствие наличия внутреннего сопротивления генератора и сопротивления соединительных проводов. Например, если выключить одну из ветвей, то общее сопротивление цепи возрастёт, а ток несколько уменьшится. Но тогда уменьшится потеря напряжения внутри генератора и в соединительных проводах, идущих от генератора, и полезное напряжение между точками разветвления несколько повысится. Поэтому ток в оставшихся ветвях несколько возрастёт. Подобно этому включение дополнительной ветви вызовет некоторое уменьшение тока в других ветвях. Такое же влияние получается при изменении сопротивления какой-либо ветви.

В электрических цепях встречается также довольно часто *смешанное* или *сложное* соединение, представляющее собой комбинацию последовательного и параллельного соединения. Так, например, если взять три сопротивления,

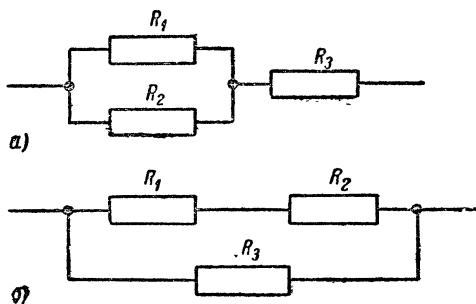


Рис. 14. Смешанное соединение сопротивлений

то возможны два варианта смешанного соединения. В одном случае соединяются два сопротивления параллельно, а к ним последовательно включается третье (рис. 14а). Иначе говоря, цепь имеет два последовательно включённых участка, один из которых представляет собой параллельное соединение. По другой схеме соединены последовательно два сопротивления, а параллельно к ним подключено третье сопротивление (рис. 14 б). В этом случае всю

цепь следует рассматривать как параллельное соединение, в котором одна ветвь сама является последовательным соединением.

При большом количестве сопротивлений могут быть составлены различные более сложные схемы смешанного соединения.

### 13. Мощность и работа тока

Электрический ток может производить работу, т. е. энергия тока может превращаться в какую-либо другую энергию, например, в тепловую, световую, механическую. В электрорадиотехнике принято оценивать работоспособность тока по величине его мощности, которая обозначается буквой  $P$ .

*Мощность — это работа, совершаемая в одну секунду. Иначе можно сказать, что мощность есть расход электрической энергии в одну секунду.*

Единицей измерения мощности является *ватт*, обозначаемый буквами *вт*<sup>1)</sup>.

*Мощность тока, равная одному ватту, есть мощность тока в один ампер при напряжении в один вольт.*

Чем больше напряжение и чем больше ток, тем больше мощность. Поэтому для расчёта величины мощности тока нужно умножить напряжение в вольтах на ток в амперах. Иначе говоря, ватты равны вольтам, умноженным на амперы:

$$P = U \cdot I$$

Например, если при напряжении 120 в через некоторое сопротивление проходит ток 3 а, то мощность тока в этом сопротивлении будет составлять 360 вт.

Часто бывает необходимо подсчитать мощность тока, когда неизвестны ток или напряжение, но известно сопротивление. Тогда нужно сначала определить по величине сопротивления ток или напряжение с помощью закона Ома, а затем уже рассчитывать мощность. Заменяя в основной формуле мощности ток или напряжение по формуле Ома, можно получить ещё две удобные формулы для расчёта мощности:

---

<sup>1)</sup> Ватт иногда обозначают W.

$$\boxed{P = I^2 \cdot R} \quad \text{или} \quad \boxed{P = \frac{U^2}{R}}$$

Эти две формулы очень часто применяются для практических расчётов. Смысл их понять нѣтрудно.

Действительно, если, например, ток увеличился в два раза, то ясно, что это может получиться только благодаря повышению напряжения в два раза. Но, если в два раза увеличились и напряжение и ток, то мощность возрастѣт в четыре раза, т. е. в квадрате по сравнению с увеличением тока.

При увеличении сопротивления для сохранения неизменной величины тока необходимо соответствующее увеличение напряжения. Во столько же раз возрастѣт и мощность, так как в этом случае увеличивается лишь одно напряжение, а ток остаѣтся постоянным.

Если напряжение, действующее на некоторое постоянное сопротивление, увеличить в несколько раз, то во столько же раз возрастѣт и ток. Значит, мощность возрастѣт в квадрате, так как напряжение и ток увеличились в одинаковое число раз. Но если при неизменном напряжении увеличить сопротивление, то соответственно уменьшится ток, а следовательно, и мощность также уменьшится. Поэтому во второй формуле сопротивление стоит в знаменателе.

Рассмотренные две формулы для расчёта мощности как будто бы противоречат друг другу: по одной из них мощность при увеличении сопротивления увеличивается, а по другой — уменьшается. Но это противоречие только кажущееся, так как первый случай соответствует постоянному току, а второй — постоянному напряжению.

Для иллюстрации приводим следующие примеры. Пусть требуется найти мощность тока в 0,2 а, протекающего через сопротивление в 1000 ом. Решение можно сделать двумя способами.

Найдѣм напряжение по закону Ома. Оно равно:

$$U = 0,2 \cdot 1000 = 200 \text{ в.}$$

Теперь определим мощность:

$$P = 200 \cdot 0,2 = 40 \text{ вт.}$$

То же можно получить по формуле:

$$P = 0,2^2 \cdot 1000 = 0,2 \cdot 0,2 \cdot 1000 = 40 \text{ вт.}$$

Рассмотрим ещё пример на определение мощности тока в лампочке, имеющей сопротивление 200 *ом*, которая питается напряжением в 100 *в*.

Проще всего применить формулу:

$$P = \frac{100^2}{200} = 50 \text{ вт.}$$

Но можно сначала найти ток:  $I = 100 : 200 = 0,5 \text{ а}$ , а затем уже найти мощность по основной формуле:

$$P = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ вт.}$$

Иногда необходимо проделать обратный расчёт, а именно: зная мощность, найти ток или напряжение. Например, пусть нужно определить ток в лампочке, имеющей мощность 300 *вт* при напряжении 120 *в*. Так как мощность есть произведение напряжения на ток, то ясно, что для нахождения тока надо мощность разделить на напряжение:  $I = P : U = 300 : 120 = 2,5 \text{ а}$ .

Кроме основной единицы мощности ватта, часто применяются ещё следующие единицы: *киловатт* (*квт*), *гектоватт* (*гвт*), *милливатт* (*мвт*) и *микроватт* (*мквт*), соответственно равные 1000 *вт*, 100 *вт*, 0,001 *вт* и 0,000 001 *вт*.

Работа электрического тока или расход электрической энергии измеряется единицами, в которых за основу взяты единицы мощности и вместе с тем учитывается время прохождения тока. Мощность есть работа за одну секунду, а величина работы тока может соответствовать любому промежутку времени, в течение которого шёл ток. Чем больше времени идёт ток, тем больше величина работы.

Основной единицей работы тока является *ватт-секунда* (*вт-сек*), т. е. работа тока мощностью 1 *вт* в течение 1 *сек*. Эта единица слишком мала, так как обычно ток идёт не одну секунду, а продолжительное время. Более крупной единицей служит *ватт-час* (*вт-ч*), равный работе тока мощностью в 1 *вт* в течение 1 часа. Час имеет 60 минут по 60 секунд, т. е. всего 3600 *сек*. Поэтому 1 *вт-ч* составляет 3600 *вт-сек*.

Особенно широко применяются ещё более крупные единицы: *гектоватт-час* (*гвт-ч*) и *киловатт-час* (*квт-ч*). Один гектоватт-час составляет 100 *вт-ч*, а киловатт-час в 10 раз больше и равен 1000 *вт-ч*.

Подсчёт количества электроэнергии, расходуемой на освещение или питание сетевого приёмника, всегда ведётся в гектоватт-часах или киловатт-часах. Электросчётчики, установленные в квартирах, учитывают расход энергии именно в этих единицах.

Многие совершенно неправильно выражают электроэнергию в киловаттах или гектоваттах, т. е. в единицах мощности. Не следует никогда допускать такой ошибки. Работа и мощность не одно и то же. Мощность данного тока в течение любого времени остаётся неизменной, если остаются постоянными ток, напряжение и сопротивление. А работа тока при постоянной его мощности зависит от времени и должна выражаться в киловатт-часах или гектоватт-часах.

Расчёт работы тока или расхода электроэнергии очень прост. Нужно умножить мощность на время. В зависимости от единиц мощности и времени мы получим по этому правилу работу тока в тех или иных единицах.

Приведём пример на расчёт работы тока. Найдём стоимость энергии, которую потребляет из сети в течение месяца приёмник, работающий ежедневно по 4 часа, если мощность тока, питающего приёмник, 50 *вт*. Общее число часов работы приёмника в месяц составляет  $4 \cdot 30 = 120$  час. Работа тока будет равна:  $50 \cdot 120 = 6000$  *вт-ч* = 6 *квт-ч*. Если принять, что стоимость одного киловатт-часа электроэнергии составляет 40 коп., стоимость потребляемой приёмником энергии будет:  $6 \cdot 40 = 240$  коп. = 2 руб. 40 коп.

Ламповые приёмники потребляют мощность примерно от 50 *вт* до 100 *вт* в зависимости от числа ламп. Приёмники с малым числом ламп потребляют ещё меньшую мощность, а более 100 *вт* расходуют лишь некоторые многоламповые приёмники и радиолы.

#### 14. Тепловое действие тока

При прохождении тока во всяком проводнике получается нагревание.

Движущиеся в проводнике электроны испытывают трение и столкновения с частицами самого проводника и заставляют эти частицы двигаться быстрее. Более быстрое движение молекул приводит к повышению тем-

пературы. Чем больше мощность тока и чем больше времени идёт ток по проводнику, тем сильнее нагревание. Законы теплового действия тока установил ещё в 1844 г. русский профессор Э. Х. Ленц.

Мощность тока зависит от напряжения, тока и сопротивления. Точно так же зависит от этих величин и количество тепла, создаваемое током. В частности, очень важно то обстоятельство, что количество тепла, выделяющееся в данном сопротивлении, при увеличении тока возрастает в квадрате. Если ток увеличится, например, в три раза, то нагревание провода возрастёт в девять раз. Такое быстрое возрастание нагрева проводника может дать неприятные последствия: сгорание изоляции на проводе и даже расплавление или сгорание самого провода.

Существует много практических применений теплового действия тока. В осветительных лампочках накаливания нить служит источником света, а в радиолампах она используется для получения потока электронов, летящих в вакууме. В плавких предохранителях имеется свинцовая проволока, которая расплавляется при опасном возрастании тока. Предохранитель всегда выбирается так, чтобы проволока в нём сгорала при токе, несколько меньшем, чем ток, опасный для изоляции проводов.

Недопустимое увеличение тока получается в случае, если к источнику включается слишком малое сопротивление, т. е., если получается короткое замыкание источника. Большой ток при коротком замыкании опасен не только для проводов, но и для самого источника. Плавкие предохранители защищают источник тока и провода от опасных последствий короткого замыкания. На рис. 15 показано включение плавкого предохранителя. Тепловое действие тока используется также в электронагревательных приборах (плитках, утюгах, паяльниках и т. д.).

Нагревание провода током зависит от *плотности тока*, которая представляет собой ток в амперах, проходящий на один квадратный миллиметр площади поперечного сечения провода, и выражается в амперах на квадратный миллиметр ( $a/мм^2$ ). Чтобы провода не перегревались, их всегда подбирают, исходя из определённых норм плотности тока. Для обмоток из нескольких слоёв изолированной проволоки плотность тока не

должна превышать  $2 \text{ а/мм}^2$ . Для реостатов, имеющих обмотку в один слой голой проволоки на каком-либо теплостойком материале, например на фарфоре, плотность тока может быть  $5 \text{ а/мм}^2$ .

Для расчётов проводов необходимо определить площадь поперечного сечения провода. Это можно сделать, если умножить 0,8 на диаметр провода  $d$  в квадрате. Например, для провода диаметром  $0,5 \text{ мм}$  получим площадь поперечного сечения  $0,8 \cdot 0,5^2 = 0,8 \cdot 0,25 = 0,2 \text{ мм}^2$ . При плотности тока в  $2 \text{ а/мм}^2$  через этот провод, очевидно, можно пропускать ток  $0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ а}$ . Полезно помнить, что при изменении диаметра провода площадь его поперечного сечения, а следовательно, и величина допустимого тока, изменяются в квадрате. Если вместо провода диаметром  $0,5 \text{ мм}$  взять провод толщиной  $1 \text{ мм}$ , т. е.

вдвое толще, то площадь поперечного сечения увеличится в 4 раза. При плотности тока  $2 \text{ а/мм}^2$  допустимый ток увеличится в 4 раза и будет равен  $1,6 \text{ а}$ . В табл. I приведены допустимые токи для проводов разного диаметра.

Следует отметить, что почти у всех металлических проводников сопротивление при нагревании увеличивается. В нагретом проводнике молекулы совершают своё беспорядочное движение быстрее и больше мешают поступательному движению электронов.

Очень мало изменяют сопротивление в зависимости от нагрева реостатные сплавы (никелин, манганин, нихром и др.). Сопротивление медного провода при нагревании на  $250^\circ \text{Ц}$  становится вдвое больше. Вольфрамовая нить при нормальном накале имеет сопротивление примерно в 10 раз больше, чем в холодном состоянии. Это нужно учитывать при использовании лампочек накаливания в качестве сопротивлений. В отличие от металлов уголь при нагреве уменьшает своё сопротивление.

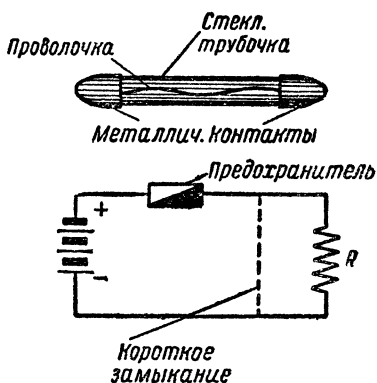


Рис. 15. Устройство плавкого предохранителя и его включение для защиты источника тока от короткого замыкания



## 15. Сопротивления, реостаты и потенциометры

Проволочные сопротивления применяются тогда, когда нужно иметь постоянство величины сопротивления или когда ток в цепи имеет значительную величину. При изготовлении сопротивления небольшой величины его наматывают часто из голой проволоки, а если сопротивление должно быть порядка сотен, тысяч или десятков тысяч ом, то его делают обычно из изолированной проволоки.

В непроволочных сопротивлениях проводником служит слой угля или металла, нанесённый на фарфор или другой изоляционный материал. Эти сопротивления бывают от десятков ом до десятков мегом. Их достоинствами являются малые размеры и дешевизна (для проволочного сопротивления большой величины потребовалось бы огромное количество дорогой реостатной проволоки). Они выдерживают сравнительно небольшую мощность и величина сопротивления у них не вполне постоянна. При увеличении тока свыше допустимого непроволочные сопротивления сильно изменяют свою величину и могут сгореть. Непроволочные сопротивления делаются на мощности 0,25 *вт*, 0,5 *вт*, 1 *вт* и больше.

Когда нет сопротивления на нужную мощность, то соединяют последовательно, параллельно или смешанно несколько сопротивлений такой величины, чтобы их общее сопротивление получилось заданным. Пусть, например, требуется сопротивление, на котором должно падать напряжение 200 *в* при токе 10 *ма* или 0,01 *а*. Величина сопротивления будет  $R = 200 : 0,01 = 20\,000\text{ ом} = 20\text{ ком}$ . Мощность составляет  $200 \cdot 0,01 = 2\text{ вт}$ . Если имеются сопротивления на 0,5 *вт*, то их нужно взять 4 штуки. Можно соединить 4 сопротивления по 5 *ком* последовательно или 4 сопротивления по 80 *ком* параллельно или, наконец, 4 сопротивления по 20 *ком* смешанно, т. е. параллельно две группы по два сопротивления последовательно в каждой группе. Во всех этих случаях общее сопротивление равно 20 *ком*, а допустимая мощность составит 2 *вт*.

Широкое применение в радиосхемах имеют переменные сопротивления. Проволочные переменные сопротивления делаются из голой проволоки. Она обычно

предварительно накаливается и поэтому имеет на поверхности слой окиси, который является изоляцией для небольших напряжений и позволяет мотать провод виток к витку. По намотке может двигаться ползунок, включающий в цепь большую или меньшую часть сопротивления. Иногда ползунок движется по пружинящей пластинке и прижимает её к проволоке в том или ином месте. В такой конструкции устраняется перетирание тонкой проволоки, а если сопротивление непроволочное, то поверхность пробоящего слоя не будет металлизироваться от ползунка.

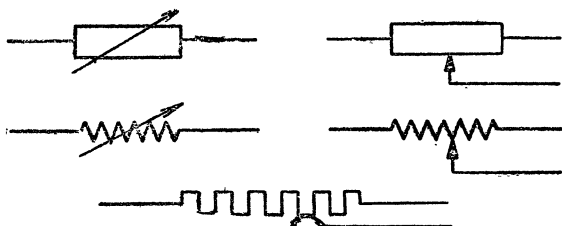


Рис. 16. Обозначение переменных сопротивлений на схемах

Переменные сопротивления изображаются на схемах так, как показано на рис. 16. Как правило, они имеют три вывода: крайние от концов сопротивления и средний от ползунка. Возможны два случая использования переменных сопротивлений. Когда переменное сопротивление включается в схему последовательно, т. е. двумя точками: ползунком и одним из концов, то оно работает как *реостат*. Если нужно регулировать ток и напряжение в каком-нибудь приборе, например в лампочке, то последовательно включается реостат (рис. 17). Тогда на долю лампочки останется лишь часть напряжения. Двигая ползунок реостата, изменяют его сопротивление, а значит, и сопротивление всей цепи. Ток изменяется, а вместе с ним изменяется и падение напряжения как на реостате, так и на лампочке. Иначе говоря, происходит перераспределение напряжения в цепи. Чем больше сопротивление реостата, тем больше на нём падение напряжения и тем меньше напряжение на лампочке.

Наибольшее напряжение на потребителе устанавливается, если сопротивление реостата уменьшается

до нуля. Тогда всё напряжение будет приложено к потребителю. Чтобы уменьшить напряжение на потребителе до нуля, в реостате делают разрыв цепи. Для этого ползунок в крайнем положении переводят с проволоки или угольного слоя на изоляцию. При этом напряжение на потребителе упадёт от некоторого наи-

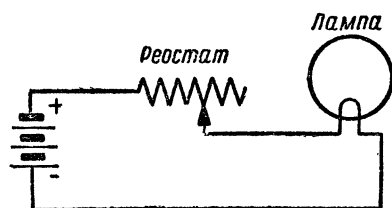


Рис. 17. Включение реостата для регулировки напряжения на лампе

меньшего значения до нуля не плавно, а скачком. В тех случаях, когда сопротивление потребителя очень велико, например несколько мегом, для регулировки напряжения в широких пределах реостат должен иметь сопротивление в десятки или сотни мегом, что практически трудно выполнить.

Часто бывает более удобно регулировать напряжение *потенциометром* или *делителем с плавной регулировкой напряжения*. Он представляет собой такое же переменное сопротивление, как и реостат, но вклю-

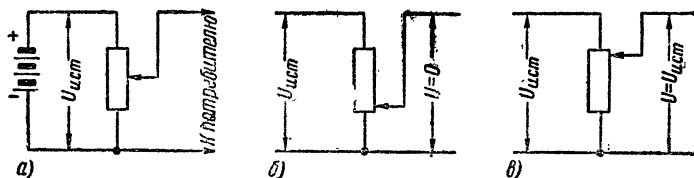


Рис. 18. Включение потенциометра для регулировки напряжения

чённое тремя точками. Концы сопротивления потенциометра включаются на то напряжение, которое нужно регулировать, например к зажимам источника тока (рис. 18а). Ползунок и один из концов сопротивления включаются к потребителю. Передвигая ползунок, подключают потребитель к любой части сопротивления потенциометра и таким путём регулируют напряжение на потребителе плавно от нуля до наибольшей величины, как показано на рис. 18б и в.

Кроме потенциометров, применяются делители напряжения, состоящие из двух или большего числа по-

стоянных сопротивлений, соединённых последовательно и включённых на полное напряжение. Потребитель подключается параллельно к одному из сопротивлений (рис. 19) и на нём получается напряжение, составляющее некоторую часть полного напряжения. К делителю из нескольких сопротивлений можно подключить несколько потребителей, требующих для нормальной работы различных напряжений. Делитель уменьшает или делит напряжение так же, как и потенциометр, но не даёт регулировки напряжения.

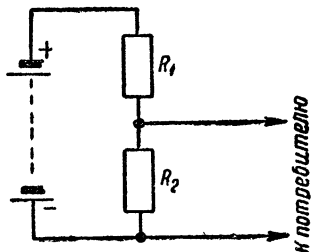


Рис. 19. Включение делителя напряжения

Через сопротивление потенциометра или делителя всегда проходит некоторый ток независимо от того, включён потребитель или нет. Этот ток нагревает делитель и является бесполезным током. Для его уменьшения желательно, чтобы сопротивление делителя или потенциометра не было слишком малым.





## ГЛАВА III

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

#### 16. Постоянные магниты и их свойства



ЖЕ давно было установлено, что некоторые сорта железной руды обладают способностью притягивать к себе стальные предметы. Это явление было названо *магнетизмом*, а куски железной руды, обладающие магнитными свойствами, называли *магнитами*. Если натереть таким *естественным* магнитом кусок закалённой стали, то последний сам становится магнитом. На практике применяются именно такие стальные или *искусственные магниты*. В настоящее время сильные магниты делают путём намагничивания закалённой стали электрическим током, о чём рассказано далее.

Вещества, притягивающиеся к магниту, называются *ферромагнитными*. К ним относятся сталь, никель, а также многие сплавы. Закалённая сталь сохраняет долго свои магнитные свойства и поэтому может служить *постоянным магнитом*. Мягкая сталь после прекращения намагничивания почти полностью теряет магнитные свойства и у неё остаётся лишь небольшой *остаточный магнетизм*.

Рассмотрим основные свойства постоянных магнитов. Каждый магнит притягивает ферромагнитные предметы наиболее сильно на своих концах, называемых полюсами. Магнит, подвешенный на нитке или укрепленный на вертикальной оси, всегда стремится одним своим полюсом повернуться на север. Этот полюс магнита называют *северным* полюсом и обозначают большой буквой С. Второй полюс называется *южным* и обозначается буквой Ю<sup>1)</sup>.

---

1) Иногда северный полюс обозначают N, а южный—S.

Магнитные полюсы взаимодействуют друг с другом аналогично электрическим зарядам.

*Одинаковые полюсы, т. е. северный с северным или южный с южным отталкиваются, а различные полюсы, т. е. южный с северным, притягиваются.*

Северный и южный магнитные полюсы всегда получаются одновременно на концах каждого магнита. Отдельно получить один из магнитных полюсов невозможно.

*Пространство вокруг магнита, в котором действуют магнитные силы, называют магнитным полем.* Можно на опыте убедиться, что магнит притягивает к себе ферромагнитные предметы не только через воздух, но и через многие другие вещества, как например, через стекло, картон, медь, воду и т. д., а также через разреженное безвоздушное пространство. Таким образом, магнитное поле образуется вокруг магнита в любых веществах. По мере удаления от магнита поле постепенно ослабевает.

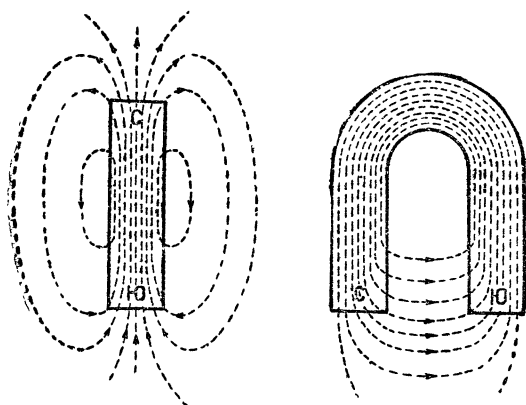


Рис. 20. Магнитное поле прямого и подковообразного магнитов

Магнитные силы действуют в магнитном поле по определённым направлениям, которые называются *магнитными силовыми линиями*. Условились считать, что *магнитные силовые линии во внешнем пространстве идут от северного полюса к южному*. Они являются замкнутыми линиями и продолжаются внутри магнита. На рис. 20 показаны силовые линии магнитного поля

для прямого и подковообразного магнитов. Все силовые линии данного магнита составляют его *полный магнитный поток*.

Если в магнитное поле поместить какой-либо предмет из стали или другого ферромагнитного материала, то он под действием поля сам намагничивается. При этом силовые линии поля как бы пронизывают этот предмет (рис. 21а). Сталь как бы втягивает в себя магнитные силовые линии и поэтому может служить для защиты от действия магнитного поля, т. е. может быть *магнитным экраном*. Когда нужно защитить какой-либо прибор от внешнего магнитного поля, то этот

прибор следует окружить со всех сторон экраном из мягкой стали. Тогда магнитный поток пройдет по экрану, так как силовым линиям гораздо легче идти по стали, чем по воздуху (рис. 21б).

По современным воззрениям молекулы ферромагнитных материалов представляют собой микроскопические магнитики. В ненамагниченном предмете они расположены в беспорядке, но под действием магнитного поля многие из них поворачиваются своими северными полюсами в одну сторону, а южными полюсами — в другую. Поэтому на концах предмета образуются полюсы. Молекулярные магнитики, повер-

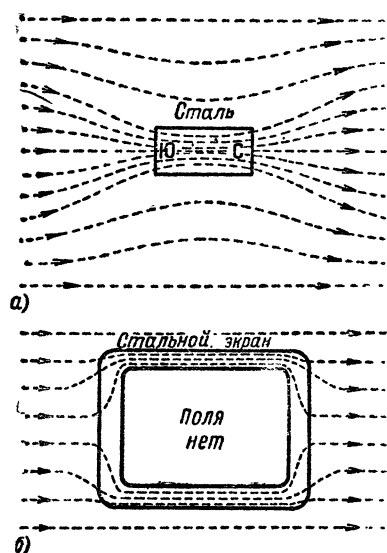


Рис. 21. Намагничивание стали в магнитном поле (а) и магнитное экранирование (б)

нувшись и „выстроившись“ в определенном порядке, в закаленной стали остаются в таком положении после прекращения действия намагничивающего поля, а в мягкой стали почти все они снова принимают прежнее беспорядочное расположение и магнетизм почти полностью исчезает.

Постоянные магниты размагничиваются от ударов и толчков, а также от нагревания, так как от этого нарушается правильный порядок расположения элементарных магнетиков.

Всякий ферромагнитный предмет можно намагнитить лишь до некоторого предела, называемого *магнитным насыщением*, после чего дальнейшее усиление магнитного поля уже не будет вызывать заметного увеличения магнетизма. Это означает, что уже все молекулярные магнетики повернулись и стали в строгом порядке вдоль силовых линий поля. При более слабом намагничивании часть магнетиков остаётся в беспорядке.

Для изготовления очень сильных постоянных магнитов в последнее время применяют особые сорта стали, содержащие примеси других металлов, например алюминиево-никелевую сталь и другие.

## 17. Электромагниты и их применение

Ещё в прошлом веке было установлено, что вокруг провода с электрическим током образуется магнитное

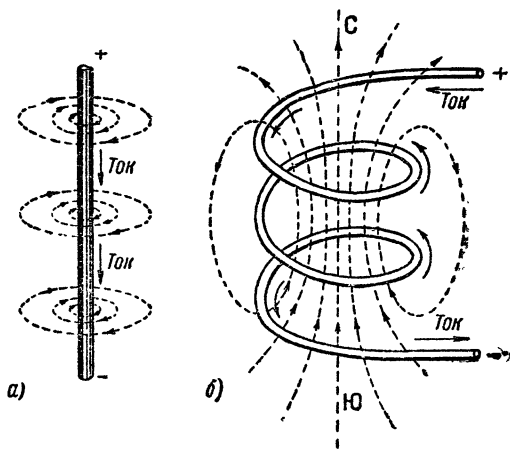


Рис. 22. Магнитное поле провода с током (а) и катушки (б)

поле, причём его силовые линии имеют вид колец, охватывающих провод (рис. 22а). Чем сильнее ток, тем сильнее магнитное поле вокруг провода.



Чтобы получить с помощью электрического тока более сильное магнитное поле, применяют катушки из проволоки. Тогда магнитные поля отдельных витков катушки складываются и их силовые линии как бы сливаются в один общий магнитный поток. Магнитное поле катушки очень напоминает поле постоянного магнита. На конце катушки, на котором ток идёт по часовой стрелке, получается южный полюс, а на другом конце — северный полюс (рис. 22б). Изменив направление тока, можно изменить направление магнитного потока и тогда магнитные полюсы на концах катушки переменяются.

Магнитный поток катушки усиливается во много раз, если в катушку вставить стальной сердечник. Это объясняется тем, что сталь под действием поля намагничивается и создаёт добавочный магнитный поток более сильный, чем поле самой катушки (рис. 23а).

Катушка со стальным сердечником называется электромагнитом. Чем больше число витков катушки

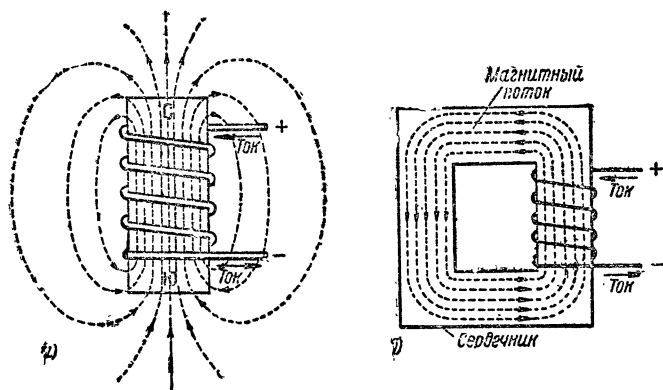


Рис. 23. Электромагниты с прямым (а) и замкнутым (б) магнитным сердечником

электромагнита и ток в ней, тем больше магнитный поток и тем сильнее электромагнит. Принято говорить, что магнитный поток в электромагните тем сильнее, чем больше число ампервитков, т. е. произведение тока в амперах на число витков. Например, один и тот же магнитный поток можно получить, если взять

катушку в 50 витков с током в 10 а или, если ток в 1 а пропустить через катушку в 500 витков. В обоих случаях электромагнит имеет 500 ампервитков.

Магнитный поток в электромагните зависит также от конструкции сердечника. Для увеличения магнитного потока нужно, чтобы силовые линии по возможности не шли по воздуху, так как воздух имеет большое *магнитное сопротивление* для силовых линий. Наиболее сильный магнитный поток получится в замкнутом сердечнике (рис. 23б). В нём силовые линии на всём своём пути идут по стали, у которой магнитное сопротивление во много раз меньше, чем у воздуха.

Даже небольшой воздушный зазор в таком замкнутом сердечнике резко увеличивает магнитное сопротивление и уменьшает магнитный поток. Нельзя также брать сердечник с недостаточной площадью поперечного сечения, так как тогда может наступить магнитное насыщение и при дальнейшем увеличении ампервитков магнитный поток уже не будет усиливаться.

Важную роль играет материал сердечника. Сердечник из закалённой стали намагничивается гораздо слабее, чем сердечник из мягкой стали, но зато после выключения тока он остаётся намагниченным. Таким способом теперь изготовляют постоянные магниты.

Мягкая сталь, а также некоторые ферромагнитные сплавы, имеют наименьшее магнитное сопротивление для силовых линий и в них получается наиболее сильный магнитный поток. Но зато они обладают весьма малым остаточным магнетизмом и при выключении тока почти полностью размагничиваются. Сердечники электромагнитов делают именно из таких материалов и поэтому электромагниты являются временными магнитами; они действуют только в течение того времени, пока идёт ток в обмотке. Во многих случаях это свойство электромагнитов является весьма ценным.

К электромагнитным явлениям относится также взаимодействие магнитного поля с проводником, по которому идёт ток. Проводник с током, находящийся в магнитном поле, испытывает со стороны поля действие механической силы, которая стремится двигать проводник под прямым углом к магнитным силовым линиям (рис. 24). Это объясняется тем, что основное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем тока

и в результате возникает механическая сила подобно тому, как и в случае взаимного притяжения или отталкивания двух магнитных полюсов.

*Сила, действующая на проводник, тем больше, чем сильнее основное магнитное поле, чем сильнее ток в проводнике и чем больше длина той части проводника, которая находится в магнитном поле.*

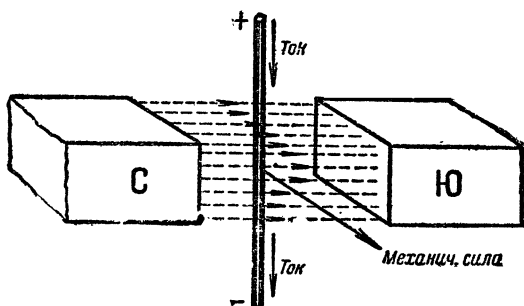


Рис. 24. Действие магнитного поля на проводник с током

Эта сила будет наибольшей, когда проводник расположен под прямым углом к магнитным силовым линиям. Если же провод расположен вдоль силовых линий, то поле на него совсем не действует. Направление движения проводника с током в магнитном поле зависит от направления тока в проводнике и от направления поля. Чтобы изменить направление движения проводника на обратное, достаточно либо изменить направление тока в проводе, либо изменить направление силовых линий основного магнитного поля.

Постоянные магниты и электромагниты имеют очень много важных практических применений. Они являются основной составной частью большинства громкоговорителей и телефонов. Возникновение и уничтожение магнитного поля при замыкании и размыкании тока у электромагнитов используется в зуммерах и вибропреобразователях, дающих автоматическое замыкание и размыкание электрической цепи большое число раз в секунду. Это же явление используется в так называемых реле, служащих для включения и выключения различных электрических цепей.

Движение проводника с током в магнитном поле и другие электромагнитные явления используются во многих электроизмерительных приборах, а также в электродвигателях или электромоторах, в которых получается непрерывное вращение подвижного электромагнита, называемого *якорем* и находящегося в магнитном поле другого неподвижного электромагнита.

## 18. Электромагнитная индукция

Ещё в начале прошлого века учёные пытались создать электрический ток с помощью изменения магнитного поля. В катушку, соединённую с чувствительным гальванометром, т. е. прибором, измеряющим очень слабые токи, вставлялся сильный магнит (рис. 25). При этом удалось заметить, что гальванометр показывает наличие тока только при движении магнита внутри катушки. Когда магнит неподвижен, ток не получается.

Ток, возникающий в катушке при движении магнита, называется *индуцированным* или *индукционным током*. При вдвигании магнита в катушку этот ток идёт в одном направлении, а при выдвигании магнита из катушки направление тока меняется на обратное. Кроме того, направление тока зависит и от того, каким полюсом вдвигается магнит в катушку.

*Индуктированный ток тем больше, чем сильнее магнит, чем больше число витков катушки и скорость движения магнита и чем меньше сопротивление цепи.*

Так как последнее может быть различным, то правильнее говорить, что движение магнита в катушке вызывает появление некоторой электродвижущей силы, которую называют *индуцированной эдс*, а при наличии замкнутой цепи создаётся ток, который определяется по закону Ома величинами эдс и сопротивления цепи.

При движении магнита в катушке происходит изменение магнитного поля или, иначе говоря, провод

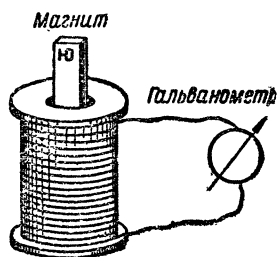


Рис. 25. Явление электромагнитной индукции

катушки пересекается магнитными силовыми линиями. Пока магнит находится вне катушки, магнитного поля в ней нет, а когда магнит вдвигается внутрь катушки, то магнитное поле в катушке усиливается. Выдвигание магнита, наоборот, даёт ослабление магнитного поля в катушке. Изменение магнитного поля индуктирует в катушке эдс, причём возрастание и убывание магнитного поля даёт эдс разных направлений.

Итак явление индукции заключается в том, что изменение магнитного поля вокруг проводника или, что то же самое, пересечение проводника магнитными силовыми линиями вызывает появление электродвижущей силы в этом проводнике.

Для получения индуктированной эдс безразлично, будет ли магнит двигаться относительно проводника или, наоборот, провод будет двигаться относительно неподвижного магнитного поля. Важно, чтобы происходило пересечение магнитных силовых линий проводником.

В явлении индукции механическая энергия движения магнита превращается с помощью магнитного поля в электрическую энергию. Этот основной случай индукции с некоторыми видоизменениями используется для получения электрической энергии в динамомашинах или генераторах. Они имеют неподвижный магнит или электромагнит, создающий сильное магнитное поле, в котором находится подвижный электромагнит, называемый *якорем*. При вращении в его обмотке создаётся индуктированный ток.

Второй основной случай индукции состоит в том, что индуктированный ток получается с помощью другого тока, т. е. происходит превращение электрической энергии одного тока в энергию другого тока или так называемая *трансформация тока*. Она осуществляется с помощью трансформаторов, состоящих из двух катушек (рис. 26). Первичная катушка питается током от источника и создаёт вокруг себя магнитное поле. Для увеличения этого поля в катушку вводится сердечник из специальной трансформаторной стали. На первичную катушку или рядом с ней наматывается вторичная катушка, соединённая с потребителем тока.

Индуктированный ток во вторичной катушке может быть получен при любом изменении тока первичной

катушки, например, при замыкании и размыкании первичной цепи. Замыкание цепи, создающее магнитное поле, равносильно вдвиганию магнита, а размыкание, уничтожающее магнитное поле, равносильно выдвиганию магнита из катушки. Однако замыкание и размыкание совершается гораздо быстрее, чем движение магнита, и поэтому индуцированный ток получается более сильным.

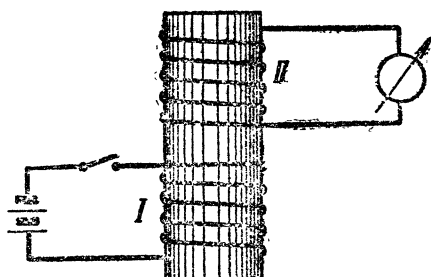


Рис. 26. Трансформация тока с помощью электромагнитной индукции

Направление индуцированного тока или индуцированной эдс определяется правилом, установленным в 1833 г. русским физиком Э. Х. Ленцем.

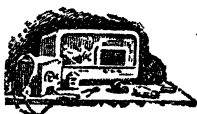
*Индуцированная эдс всегда имеет такое направление, что создаваемый ею ток своим магнитным полем противодействует основному магнитному полю, вызвавшему явление индукции.*

Поясним это правило на примере индукции в трансформаторе. При замыкании тока первичной катушки создаётся магнитное поле. Индуцированная эдс в замкнутой вторичной цепи вызовет ток такого направления, что его магнитное поле будет направлено навстречу первичному полю. При размыкании, когда магнитное поле первичного тока исчезает, индуцированный ток пойдёт в обратную сторону и будет создавать магнитное поле, совпадающее по направлению с первичным магнитным полем и стремящееся задержать исчезновение этого поля.

Таким образом, при возрастании магнитного поля индуцированная эдс имеет одно направление, а при убывании поля направление эдс меняется на обратное.

Для одного витка проволоки величина индуцированной эдс зависит только от скорости изменения магнитного потока внутри витка, т. е. от числа пересечений провода магнитными силовыми линиями в одну секунду. Увеличение числа этих пересечений даёт соответствующее возрастание эдс. Если магнитный поток изменяется в катушке, имеющей несколько витков, то в каждом витке получится некоторая эдс. Все витки соединены между собой последовательно и поэтому общая эдс, возникающая в катушке, равна сумме эдс отдельных витков, т. е. тем больше, чем больше число витков. Например, если катушка имеет 50 витков, а скорость изменения магнитного потока такова, что в одном витке индуцируется эдс 0,1 в, то полная эдс будет равна 5 в.

Итак, чем быстрее изменяется магнитный поток в катушке и чем больше в ней витков, тем больше величина индуцированной эдс.





## ГЛАВА IV

### ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

#### 19. Понятие о переменном токе

**П**ОСТОЯННЫМ током называется ток, который имеет неизменную величину и идёт всё время в одном направлении. В радиотехнике и в электрификации важную роль играет также переменный ток, который меняет величину и направление определённое число раз в секунду. Кроме того, во многих случаях применяется пульсирующий ток, имеющий неизменное направление, как и постоянный ток, но изменяющий свою величину подобно переменному току.

При переменном токе электроны движутся вдоль провода сначала в одном направлении, затем они на момент останавливаются и далее движутся в обратную сторону, опять останавливаются, поворачивают обратно и снова повторяют своё движение вперёд и назад. Иначе говоря, электроны совершают в проводе колебания.

Если в описанном выше опыте индукции всё время двигать магнит внутрь катушки и обратно или в трансформаторе всё время замыкать и размыкать первичный ток, то индуцированный ток будет переменным.

Наиболее часто встречается так называемый *прямой* или *синусоидальный переменный ток*, который может быть изображён наглядно в виде диаграммы или графика, так как это сделано на рис. 27. На этом рисунке показаны вертикальная и горизонтальная прямые линии, называемые *осями*. По горизонтальной оси отложено время в секундах, а по вертикальной оси — ток в амперах или других единицах. Ток одного направления условно считается *положительным* и его вели-



чина откладывается вверх по вертикальной оси, а ток обратного направления считается *отрицательным* и его величина откладывается вниз. Изменение тока с течением времени показывает наглядно плавная кривая линия, изображённая на рисунке и называемая *синусоидой*. В некоторый начальный момент ток равен нулю. Затем он увеличивается, сначала быстро, а потом всё медленнее и медленнее. В некоторый момент нарастание тока прекращается, и ток достигает наибольшего значения, называемого *амплитудным значением* или амплитудой. Для примера на рис. 27 амплитуда тока равна 10 а. Далее ток уменьшается, сначала медленно, затем быстрее, и падает до нуля, после чего

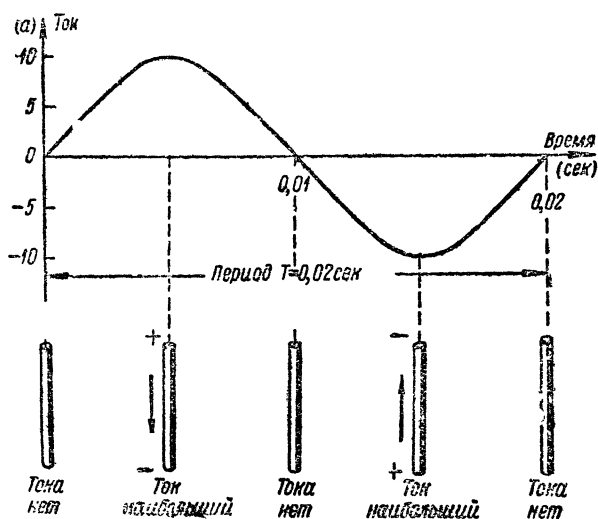


Рис. 27. График переменного тока

ток меняет направление и повторяет все свои изменения. Он снова постепенно растёт, сначала быстро, затем медленнее, достигает амплитудного значения и потом уменьшается до нуля. Направление тока опять меняется, т. е. он снова идёт в первоначальном направлении, и все его изменения опять повторяются. Совершенно так же меняется эдс или напряжение в цепи переменного тока.

На рис. 27 внизу показано движение электронов в проводе при переменном токе для нескольких различных моментов времени.

Состояния переменного тока в отдельные моменты времени называются его *фазами* (слово фаза означает состояние). Из всех различных фаз наиболее характерными являются *амплитудные* и *нулевые фазы*, т. е. такие состояния переменного тока, когда он имеет наибольшие или нулевые значения.

Амплитудные значения напряжения и тока не всегда удобны. Совершенно очевидно, что переменный ток с амплитудой в  $10\text{ а}$  имеет меньшую мощность, чем постоянный ток в  $10\text{ а}$ . У постоянного тока величина всё время равна  $10\text{ а}$ , а у переменного тока она достигает этого значения только в моменты амплитудных фаз. В другие моменты ток меньше, чем  $10\text{ а}$ , и даже доходит до нуля. Возникает вопрос: какой же переменный ток равноценен по мощности постоянному току в  $10\text{ а}$ ? Или, наоборот, какой постоянный ток равноценен по мощности данному переменному току?

Оказывается, что *синусоидальный переменный ток равноценен по мощности такому постоянному току, который составляет 0,7 или 70% амплитудного значения переменного тока*. Поэтому, чтобы иметь более правильное представление о переменном токе, большей частью указывают не его амплитудное значение, а величину, равную 70% от амплитуды и называемую *действующим* или *эффективным значением*. Именно действующее значение переменного тока характеризует мощность или энергию или тепловое действие переменного тока.

Подобно току, действующее значение переменного синусоидального напряжения составляет 70% его амплитудного значения. Мощность переменного тока вычисляется совершенно так же, как и для постоянного тока, простым перемножением действующих значений тока и напряжения.

Если нужно, то всегда можно легко найти амплитудные значения, которые на 40% больше действующих значений. Например, если действующее значение переменного тока  $10\text{ а}$ , то его амплитудное значение равно  $14\text{ а}$ .

Когда говорят о напряжении или величине переменного тока, то в большинстве случаев подразумевают действующие значения. Так, например, у нас в СССР нормальные напряжения в осветительной сети 127 и 220 в являются действующими напряжениями. Отсюда следует, что в сети на 127 в амплитудное напряжение составляет примерно 180 в.

Различные электроизмерительные приборы для переменного тока всегда измеряют действующие значения напряжения или тока.

## 20. Период и частота переменного тока

*Движение электронов в проводе туда и обратно называют одним колебанием переменного тока.* За первым колебанием следует второе, затем третье и т. д.

*Время одного колебания называется периодом и обозначается буквой  $T$ .* Период выражается всегда в секундах. Время изменения тока, равное половине периода, называют *полупериодом*. На рис. 27 период для примера взят равным 0,02 или  $\frac{1}{50}$  сек.

Наиболее важной величиной, характеризующей переменный ток, является *частота*. Она представляет собой *число колебаний* или *число периодов в секунду* и обозначается буквой  $f$ . Единицей частоты служит один *герц*, обозначаемый сокращённо буквами *гц* (или Hz).

Если в одну секунду происходит одно колебание, то частота будет 1 гц. Когда число колебаний равно, например, десяти в секунду, то частота составляет 10 гц. Частота и период являются обратными величинами. При частоте 10 гц период равен 0,1 сек. А если период равен 0,01 сек, то частота составляет 100 гц.

В электрической сети переменного тока по всему СССР частота равна 50 гц. Это значит, что ток в сети каждую секунду 100 раз меняет своё направление. Он 50 раз в секунду идёт в одну сторону и 50 раз в обратную. Сто раз в секунду ток достигает амплитудного значения и сто раз становится равным нулю. Лампочки, включённые в сеть, 100 раз в секунду притухают и столько же раз вспыхивают ярче, но глаз не замечает этого явления, благодаря так называемой зрительной инер-

ции, т. е. способности сохранять полученные впечатления примерно в течение 0,1 сек.

На рис. 27 изображено графически одно колебание синусоидального переменного тока, имеющего частоту именно 50 гц.

Все переменные токи принято делить на две группы. Токи с частотой меньше 10 000 гц называют токами низкой или звуковой частоты (сокращённо: токи нч)<sup>1)</sup>. У этих токов частота соответствует частоте различных звуков человеческого голоса или музыкальных инструментов. В радиотехнике токи нч имеют большое применение особенно в случае радиотелефонной передачи.

Однако главную роль в радиосвязи выполняют переменные токи с частотой более 10 000 гц, называемые токами высокой частоты или радиочастоты (сокращённо: токи вч). Так как частота этих токов может быть очень велика, для её измерения применяют единицы: килогерц (кгц), равный 1000 гц, и мегагерц (мггц), равный миллиону герц<sup>2)</sup>.

Различные радиостанции обычно работают с помощью переменных токов вч, имеющих частоту не менее нескольких сотен килогерц или нескольких мегагерц. Трудно себе представить, что электроны в проводе меняют направление своего движения миллионы раз в секунду, т. е. колеблются с частотой в миллионы герц. Однако в современной радиотехнике для специальных целей (например, для радиолокации) применяются токи с частотой даже в миллиарды герц и имеются приборы, позволяющие довольно точно измерять такие сверхвысокие частоты.

## 21. Пульсирующий ток

Пульсирующие токи, которые, как мы знаем, имеют неизменное направление, но меняют свою величину, могут быть различными. Иногда у них величина тока изменяется от некоторого наибольшего значения до некоторого наименьшего значения, но не падает до

---

<sup>1)</sup> За исключением токов с частотой ниже 20 гц, которые не соответствуют звуковым частотам.

<sup>2)</sup> Эти единицы обозначают также иначе kHz и MHz.

нуля. В других случаях уменьшение величины тока получается до нуля. Если цепь постоянного тока прерывается с некоторой частотой каким-либо выключателем, то получается пульсирующий ток, называемый *прерывистым током*. У него в течение некоторых промежутков времени тока совсем нет. На рис. 28 показаны примеры графиков различных пульсирующих токов.

Пульсирующий ток любого вида удобно рассматривать как сумму двух токов: постоянного и переменного,

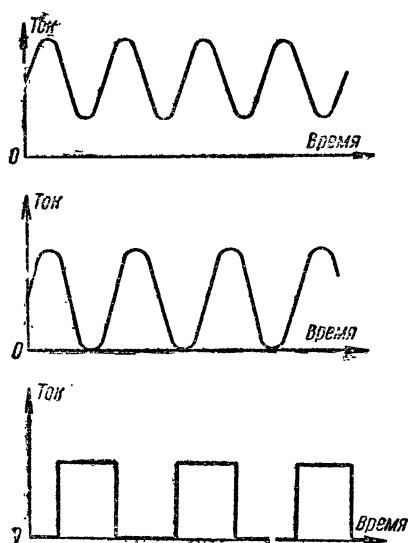


Рис. 28. Графическое изображение различных пульсирующих токов

го, называемых *слагающими* или *составляющими* токами.

Всякий пульсирующий ток имеет постоянную и переменную составляющие. Многим это кажется весьма странным и непонятным. Действительно, ведь пульсирующий ток является вполне определённым током, идущим всё время в одном направлении и изменяющим свою величину. Как же можно говорить, что в составе этого тока есть переменный ток, изменяющий своё направление? Однако, если по одному и тому же проводу

пустить от отдельных самостоятельных генераторов одновременно два тока — постоянный и переменный, то оказывается, что в этом проводе получится пульсирующий ток (рис. 29)<sup>1)</sup>. Постоянный и переменный токи отдельно по проводу идти не будут. Они складываются в один общий поток электронов, имеющий все свойства пульсирующего тока.

<sup>1)</sup> При этом амплитуда переменного тока не должна превышать величины постоянного тока.

Сложение постоянного и переменного токов можно показать графически. На рис. 29 нарисованы графики постоянного тока в  $15\text{ ма}$  и переменного тока с амплитудой  $10\text{ ма}$ . Сложив величины этих токов для отдельных моментов времени с учётом их знаков, т. е. направлений, мы получим график пульсирующего тока, показанный на рис. 29 жирной линией. У этого тока величина меняется от наименьшего значения  $5\text{ ма}$  (т. е.  $15 - 10\text{ ма}$ ) до наибольшего значения  $25\text{ ма}$  (т. е.  $15 + 10\text{ ма}$ ).

Рассмотренное явление хорошо доказывает справедливость представления о пульсирующем токе, как о сумме постоянного и переменного токов. Оказывается, что возможно и обратное явление. С помощью некоторых приборов удаётся разделить друг от друга эти два составляющих тока.

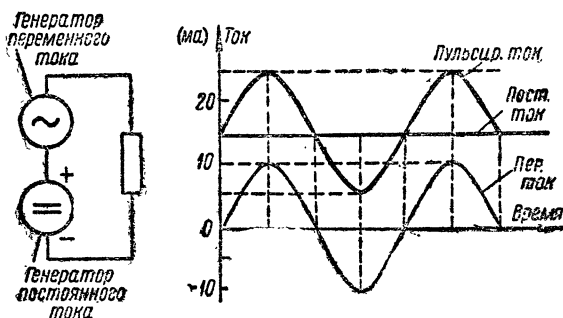


Рис. 29. Получение пульсирующего тока сложением постоянного и переменного токов

Следует подчеркнуть, что любой ток можно всегда считать состоящим из нескольких токов. Например, если в проводе протекает ток  $5\text{ а}$ , то его можно считать суммой двух токов в  $2$  и  $3\text{ а}$ , протекающих в одном направлении, или суммой двух токов в  $8$  и  $3\text{ а}$ , протекающих в разных направлениях, т. е., иначе говоря, разностью токов в  $8$  и  $3\text{ а}$ . Нетрудно подобрать и другие комбинации двух или большего числа токов, дающих в сумме ток  $5\text{ а}$ . Здесь имеется полное сходство со следующим примером. Пусть на какой-либо предмет действуют две одинаково направленные силы

в 2 и 3 кг. Тогда их можно заменить одной силой в 5 кг. Две силы в 8 и 3 кг, действующие в противоположных направлениях, также можно заменить одной силой в 5 кг. И наоборот, имея силу в 5 кг, всегда можно считать её суммой двух одинаково направленных сил в 2 и 3 кг или разностью противоположно направленных сил в 8 и 3 кг или суммой какой-то иной комбинации нескольких сил.

Постоянный или обычный переменный ток нет особой необходимости разлагать на составные токи. Если же заменить пульсирующий ток суммой постоянного и переменного токов, то, применяя к этим составляющим токам известные нам законы постоянного и переменного токов, мы получаем возможность решать многие вопросы и делать необходимые расчёты, относящиеся к пульсирующему току.

## 22. Катушки индуктивности

Как мы знаем, изменение магнитного поля вокруг проводника создаёт в этом проводнике некоторую индуктированную эдс. Если в проводнике идёт изменяющийся по величине ток, то магнитное поле вокруг него также изменяется и в проводнике индуктируется эдс. Таким образом, *индуктированная эдс получается в том самом проводнике, в котором происходит изменение тока*. Это явление называется *самоиндукцией*. По правилу Ленца индуктированная эдс всегда противодействует основному индуктирующему току. Правильно это остаётся в силе и для явления самоиндукции. Например, при замыкании цепи появляется ток и возникает магнитное поле, которое индуктирует в проводе эдс самоиндукции, направленную навстречу току и противодействующую его нарастанию. Если бы явления самоиндукции не было, то при замыкании ток мгновенно достигал бы величины, определяемой приложенным напряжением и сопротивлением цепи, а благодаря самоиндукции получается замедленное нарастание тока (рис. 30). Конечно, время в течение которого ток преодолевает противодействие эдс самоиндукции составляет небольшие доли секунды, но во многих случаях подобное постепенное нарастание тока имеет важное значение.

При прекращении действия приложенного напряжения в цепи наблюдается обратная картина. Если бы не было самоиндукции, ток прекратился бы мгновенно. Но при исчезании магнитного поля его силовые линии пересекают проводник и возбуждают в нём эдс самоиндукции, которая по закону Ленца имеет направление, совпадающее с током. Теперь эдс самоиндукции стремится продолжить существование тока и в результате ток прекращается не сразу, а постепенно.

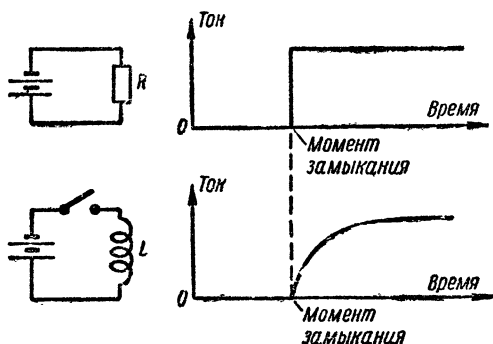


Рис. 30. Влияние самоиндукции на процесс нарастания тока в цепи

Явление самоиндукции противодействует любым изменениям тока в цепи. Когда ток нарастает, то эдс самоиндукции замедляет, тормозит, затягивает это нарастание. А когда ток уменьшается, то эдс самоиндукции затягивает это спадание. Таким образом, эдс самоиндукции всегда сглаживает изменения тока.

Как известно, энергия постоянного тока тратится на нагревание провода. Но при возникновении тока, кроме расхода энергии на нагрев провода, имеется ещё дополнительная затрата энергии на создание магнитного поля, в котором запасается некоторое количество энергии. При исчезании тока эта энергия возвращается из магнитного поля обратно в провод и создаёт в цепи индуктированный ток, продолжающийся после того, как основной ток прекратился.

Прямолинейный провод имеет небольшой магнитный поток и поэтому явление самоиндукции у него выра-



жено сравнительно слабо. Значительно сильнее проявляется самоиндукция у катушки. Чем больше число витков и диаметр катушки, тем сильнее явление самоиндукции. Если поместить в катушку сердечник из магнитного материала, то магнитный поток во много раз увеличится и явление самоиндукции также станет гораздо сильнее.

Явление самоиндукции в тех или иных проводниках характеризуется *коэффициентом самоиндукции* или *индуктивностью*. Эту величину обозначают буквой *L*. Так как явление самоиндукции состоит в возникновении индуктированной эдс в проводе при изменении тока в нём, то индуктивность характеризует именно величину эдс самоиндукции в зависимости от изменения тока. Единица индуктивности называется *генри* и обозначается сокращённо буквами *гн*.

*Один генри есть индуктивность проводника, в котором получается эдс самоиндукции 1 в при равномерном изменении тока на 1 а в 1 сек.*

Например, если в некоторой катушке при равномерном изменении тока на 1 а в 1 сек возникла эдс самоиндукции 40 в, то индуктивность этой катушки составляет 40 гн.

Часто применяются более мелкие единицы индуктивности: *миллигенри (мгн)* и *микrogenри (мкгн)*, равные соответственно 0,001 гн и 0,000 001 гн<sup>1</sup>).

Индуктивность катушки тем больше, чем больше её диаметр, чем меньше её длина и чем больше число витков. От числа витков индуктивность зависит в квадрате. Это значит, что при увеличении числа витков в 2, 3, 4 раза индуктивность возрастает в квадрате, т. е. соответственно в 4, 9, 16 раз. При уменьшении диаметра провода индуктивность незначительно возрастает. Введение внутрь катушки ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность во много раз.

В случае, когда последовательно соединено несколько катушек, общая индуктивность равна сумме индуктивностей отдельных катушек. Это справедливо при условии, что катушки своими магнитными полями не влияют друг на друга. Параллельное соединение кату-

---

<sup>1</sup>) Единицы индуктивности иначе обозначаются Н, мН и  $\mu$ Н.

шек даёт уменьшение индуктивности и применяется редко.

Катушка индуктивности представляет для постоянного тока небольшое сопротивление, зависящее только от длины, толщины и материала провода. Сопротивление постоянному току называют *омическим сопротивлением*. Для переменного тока катушка обладает ещё дополнительным *индуктивным сопротивлением*, наличие которого объясняется явлением самоиндукции. Препятствуя всем изменениям тока, катушка оказывает значительное противодействие прохождению переменного тока. Она замедляет нарастание тока и поэтому переменный ток при своих изменениях не будет достигать до такого амплитудного значения, какое он мог бы иметь при отсутствии катушки.

Чем выше частота переменного тока, тем быстрее и резче изменяется ток и тем сильнее противодействие самоиндукции этим изменениям. Если уменьшать частоту, то индуктивное сопротивление уменьшается. При частоте, равной нулю, т. е. на постоянном токе, индуктивное сопротивление также равно нулю, так как на постоянном токе явления самоиндукции нет. Таким образом, одна и та же катушка обладает разными сопротивлениями для токов разной частоты.

Итак, *чем выше частота и чем больше индуктивность, тем больше индуктивное сопротивление*.

Величина индуктивного сопротивления обозначается  $x_L$ , выражается в омах и вычисляется по формуле:

$$x_L = 6,28 fL$$

где  $f$  — частота в герцах, а  $L$  — индуктивность в генри. В этой формуле иногда удобно вместо 6,28 брать 6,25, что даёт очень небольшую ошибку.

Для примера найдём индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью 2 мгн для тока с частотой 500 кГц. Переводим миллигенри в генри и килогерцы в герцы. Получим  $L=0,002$  гн и  $f=500\,000$  гц. Умножая эти величины друг на друга и на 6,28, найдём  $x_L = 6280$  ом. Если частота будет 500 гц, т. е. в 1000 раз ниже, то индуктивное сопротивление также уменьшится в 1000 раз и будет составлять всего лишь 6,28 ом.

В табл. II даны значения индуктивного сопротивления для катушек с различной индуктивностью при разных частотах.

Т а б л и ц а II

Индуктивное сопротивление катушек (в омах)

Частота	Индуктивность					
	2 мкГн	20 мкГн	200 мкГн	2 мГн	2 Гн	20 Гн
50 Гц	0,00063	0,0063	0,063	0,63	628	6 280
1 000 "	0,0126	0,126	1,26	12,6	12 560	125 600
200 кГц	2,52	25,2	252	2 520	2,52 МГом	25,2 МГом
1 000 "	12,6	126	1 260	12 600	12,6 "	126 "
10 000 "	126	1260	12 600	126 000	126 "	1260 "

Индуктивное сопротивление имеет важную особенность: на нём не расходуется энергия. При постоянном токе энергия тока в каждом омическом сопротивлении превращается в тепло благодаря тому, что движущиеся электроны сталкиваются с частицами проводника. У каждой катушки провод для переменного тока также обладает подобным сопротивлением и энергия переменного тока расходуется на нагрев самого провода не меньше, чем у постоянного тока. Но этот расход энергии относится только к сопротивлению самого провода, которое для переменного тока принято называть *активным сопротивлением*. А в индуктивном сопротивлении, которым дополнительно обладает катушка, происходит следующее. В течение одной четверти периода, когда ток нарастает, энергия тока расходуется на создание магнитного поля и запасается в нём, а в следующей четверти периода, когда ток спадает и магнитное поле уменьшается, энергия магнитного поля превращается обратно в энергию тока.

Как уже было отмечено, это объясняется тем, что при уменьшении магнитного поля в соответствии с основными законами индукции в катушке возникает эдс самоиндукции, совпадающая по направлению с

током и поддерживающая его. Одну четверть периода катушка работает как потребитель, а следующую четверть периода как генератор.

Поэтому индуктивное сопротивление называют *реактивным сопротивлением*. Это название происходит от слова *реакция*, т. е. *противодействие* или *обратное действие* и подчеркивает, что энергия, запасаясь в магнитном поле катушки, не расходуется, а возвращается полностью обратно.

В противоположность этому *активным сопротивлением* всегда называется такое сопротивление переменному току, в котором происходит безвозвратная потеря энергии, т. е. превращение энергии тока в какую-либо другую энергию, например в тепловую.

Индуктивное сопротивление, по существу, представляет собой противодействие эдс самоиндукции, возникающей в катушке при изменении тока. Эта эдс уменьшает ток, т. е. по своему действию подобна сопротивлению, но не вызывает дополнительного безвозвратного расхода энергии.

Благодаря явлению самоиндукции в любом проводнике с переменным током наблюдается так называемый *поверхностный* или *кожный эффект*. Он состоит в том, что переменный ток, в отличие от постоянного тока, идет не по всему поперечному сечению провода, а только по некоторому поверхностному слою, толщина которого уменьшается с повышением частоты. Поэтому рабочее сечение для переменного тока значительно меньше, чем для постоянного тока. В результате активное сопротивление провода для переменного тока всегда больше, чем омическое сопротивление, т. е. сопротивление для постоянного тока, и чем выше частота, тем больше эта разница (рис. 31). На частоте 50 гц поверхностный эффект почти отсутствует, но он проявляется очень сильно на высоких частотах, для которых нередко применяют трубчатый проводник, так как внутренняя часть провода ненужна. Поверхность провода для высоких частот иногда покрывают серебром. С целью увеличения поверхности применяют провода, состоящие из большого числа отдельных тонких проволочек, изолированных друг от друга. Благодаря поверхностному эффекту ток высокой частоты даже при высоком напряжении почти совершенно без-

опасен для человека, так как он идёт по поверхности тела (по коже) и не нарушает нормальную работу.

Итак каждая катушка обладает некоторым активным и некоторым индуктивным сопротивлением. Полное сопротивление катушки переменному току, обозначаемое буквой  $z$ , определяется не простым суммированием этих двух сопротивлений, а более сложным путём.



Рис. 31. Рабочее сечение провода при различной частоте тока (поверхностный эффект)

Однако на практике в большинстве случаев индуктивное сопротивление гораздо больше активного и поэтому последним обычно пренебрегают. Приблизительно считают, что катушка обладает только одним индуктивным сопротивлением.

Применяемые в радиоаппаратуре катушки могут быть предназначены для токов низкой частоты и для токов высокой частоты. Первые всегда делаются со стальными сердечниками и большим числом витков. У них индуктивность имеет значительную величину до десятков и даже сотен генри.

Сердечники этих катушек делаются не сплошными, а из тонких пластин специальной трансформаторной стали, изолированных друг от друга с помощью папиросной бумаги или лака. Эта изоляция служит для устранения так называемых *вихревых* или *паразитных* токов в сердечнике. Дело в том, что переменный магнитный поток индуцирует эдс в самом сердечнике, так как последний является проводником. Если сердечник сплошной, то в нём возникнут довольно сильные токи, которые нагреют его и вызовут значительные потери энергии. На создание этих токов будет расходоваться значительная часть мощности тока. В сердечнике, собранном из отдельных, изолированных

друг от друга пластин, потери на паразитные токи уменьшаются во много раз.

Кроме того, в сердечнике имеются ещё потери на перемагничивание. Под влиянием переменного магнитного потока молекулы в сердечнике всё время поворачиваются и при этом получается их взаимное трение, за счёт которого сердечник дополнительно нагревается. Эти потери энергии, называемые потерями на *магнитный гистерезис*, имеют наименьшее значение в сердечниках из специальных магнитных материалов.

Катушки для токов вч делаются часто без стальных сердечников и имеют сравнительно небольшое число витков, порядка десятков или сотен. Их индуктивность бывает от нескольких микрогенри до нескольких миллигенри.

В последнее время успешно применяются высокочастотные катушки с сердечниками из так называемых *магнитодиэлектриков*. Эти сердечники сделаны из мелкого порошка какого-либо магнитного материала, склеенного изолирующим лаком. Они создают весьма небольшие потери энергии и позволяют уменьшать размеры катушки, а также удобно изменять индуктивность.

Высокочастотные катушки применяются либо для настройки радиоприёмников и радиопередатчиков на различную частоту, либо в качестве так называемых *дросселей*, служащих для создания большого индуктивного сопротивления токам той или иной частоты.

Дроссели высокой частоты уже при сравнительно небольших индуктивностях порядка нескольких единиц или долей миллигенри имеют достаточно большое индуктивное сопротивление. Широко применяются также дроссели низкой частоты, в которых для получения значительного индуктивного сопротивления применяют замкнутые стальные сердечники и наматывают большое число витков порядка

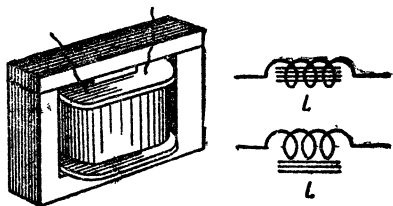


Рис. 32. Дроссель низкой частоты и его изображение на схемах

нескольких сотен или даже десятков тысяч (рис. 32).

Катушки для высокой частоты делаются двух типов: при сравнительно небольшом числе витков их наматывают в один слой на каком-либо цилиндрическом кар-

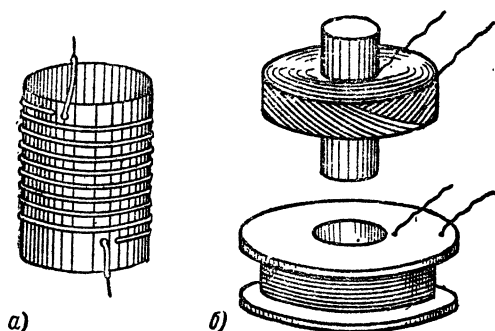


Рис. 33. Однослойная (а) и многослойная (б) катушки для токов высокой частоты

касе (рис. 33а), а при значительном числе витков применяют многослойную обмотку (рис. 33б).

Катушки с переменной индуктивностью бывают различной конструкции. Иногда по виткам катушки может двигаться ползунок, как в реостате (рис. 34а). Часто делают катушку с отводами от различного числа витков и тогда с помощью переключателя можно грубо, как говорят, ступенями или скачками изменять индуктивность (рис. 34б).

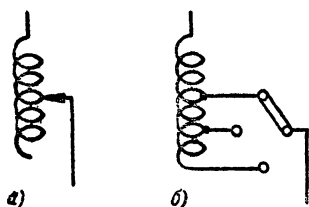


Рис. 34. Способы изменения индуктивности катушек

Плавное изменение индуктивности получается с помощью вариометра. Он представляет собой две катушки, соединённые последовательно, одна из которых неподвижна, а другая может двигаться относительно первой катушки.

Обычно подвижная катушка, называемая *ротором*, может вращаться на оси внутри неподвижной катушки, называемой *статором*. На схемах вариометр изображают так, как показано на рис. 35.

Если катушки вариометра стоят под прямым углом друг к другу (рис. 35а), то в этом положении полная индуктивность вариометра равна сумме индуктивностей его катушек. При повороте подвижной катушки на  $90^\circ$  от этого положения в ту или другую сторону полу-

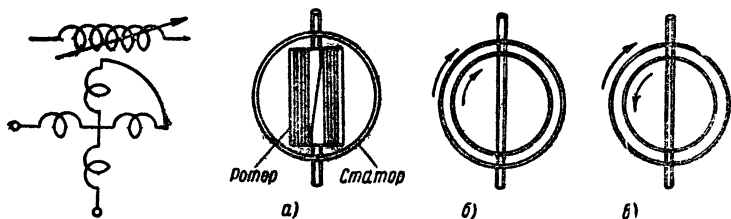


Рис. 35. Устройство вариометра и его изображение на схемах

чается, что направления витков совпадают, а направления токов в катушках либо одинаковы, либо противоположны (рис. 35б, в). В этих положениях взаимное влияние катушек друг на друга будет наибольшим, но в первом случае полная индуктивность увеличится за счёт того, что магнитные поля катушек сложатся. А во втором случае полная индуктивность уменьшится, так как магнитные поля будут взаимно ослаблять друг друга. Таким образом, при вращении ротора на  $180^\circ$  из одного крайнего положения в другое индуктивность плавно изменяется от наибольшего до наименьшего значения.

В последнее время применяются также *ферровариометры*, в которых индуктивность катушки изменяется от перемещения внутри неё сердечника из магнитодиэлектрика.

## 23. Трансформаторы и автотрансформаторы

В электрорадиотехнике большое применение имеют трансформаторы, служащие для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформатор имеет две обмотки, находящиеся обычно на общем сердечнике из какого-либо магнитного материала, например из стали (рис. 36а). Одна из обмоток — первичная — подключается к генератору того



переменного тока, который нужно преобразовать. Ток первичной обмотки создаёт в сердечнике переменный магнитный поток. Сердечник трансформатора делается обычно замкнутым, чтобы магнитные силовые линии шли на всём пути по стали и не рассеивались в воздухе. Переменный магнитный поток индуцирует во вторичной обмотке переменную эдс, величина которой зависит от числа витков этой обмотки и скорости изменения магнитного потока, как это следует из основных законов электромагнитной индукции. Если вторичная обмотка имеет больше витков, чем первичная, то вторичное напряжение  $U_2$  больше первичного  $U_1$  и трансформатор называется *повышающим*. А если во вторичной обмотке число витков меньше, чем в первичной, то вторичное напряжение меньше первичного и трансформатор называется *понижающим*.

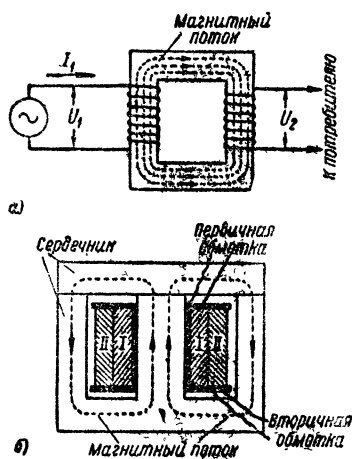


Рис. 36. Устройство трансформатора

Мощность тока во вторичной обмотке  $P_2$  почти равна мощности первичного тока  $P_1$ , так как потери энергии в трансформаторе незначительны. Но мощность является произведением напряжения на ток. Поэтому при повышении напряжения с помощью трансформатора одновременно происходит понижение тока и наоборот, а произведение напряжения на ток остаётся примерно одно и то же.

Пусть в первичной обмотке напряжение 200 в, а ток — 1 а. Тогда первичная мощность составляет 200 вт.

Предположим, что трансформатор понижает напряжение в 4 раза. Вторичное напряжение будет 50 в, а ток в 4 раза возрастёт и будет равен 4 а. Мощность тока во вторичной цепи попрежнему составляет  $50 \cdot 4 = 200$  вт.

Для каждого трансформатора характерна величина нормальной мощности, которую можно передавать через трансформатор. Второй характерной величиной является

нормальное напряжение, на которое рассчитана первичная обмотка. Вполне возможно подводить к трансформатору меньшие напряжения и мощность, но их увеличение сверх нормальных значений недопустимо, так как получится перегрев сердечника и обмоток трансформатора.

Ещё одной важной величиной является коэффициент трансформации  $n$ , представляющий отношение числа витков первичной обмотки  $w_1$  к числу витков вторичной обмотки  $w_2$  или, что то же самое, отношение первичного напряжения к вторичному. Например, если у трансформатора  $w_1 = 500$ , а  $w_2 = 1000$ , то коэффициент трансформации равен 1:2. В данном случае имеется трансформатор, повышающий напряжение в два раза. Для повышающих трансформаторов коэффициент трансформации всегда получается меньше единицы.

Рассмотрим другой пример. Пусть имеется трансформатор, у которого  $w_1 = 600$  и  $w_2 = 30$ . Этот трансформатор — понижающий и коэффициент трансформации у него равен:  $n = 600:30 = 20:1$ . Понижение напряжения получается в 20 раз. Коэффициент трансформации у понижающих трансформаторов всегда бывает больше единицы.

Нормальная мощность, первичное напряжение и коэффициент трансформации определяют числа витков обмоток, сечение сердечника, диаметры проводов обмоток и другие данные трансформатора. Чем больше напряжение в данной обмотке, тем больше в ней должно быть витков. При этом меняется также и диаметр провода, так как при более высоких напряжениях ток уменьшается, а значит провод может быть взят более тонкий.

Наиболее распространена конструкция так называемого броневого трансформатора, имеющего разветвлённый магнитный поток. Его сердечник со средним более широким стержнем и двумя боковыми стержнями меньшей ширины напоминают букву „ша“, замкнутую дополнительной пластиной. Обмотки располагаются на одной катушке, которая насаживается на средний более широкий стержень (рис. 36б).

Чаще всего делается так называемая цилиндрическая обмотка. В этом случае обычно изготавливается каркас катушки из картона или другого изоляционного

материала и на него наматываются обмотки одна поверх другой. При этом безразлично, какая обмотка будет внутри и какая снаружи. Иногда обмотки делаются в виде отдельных катушек без всякого каркаса и насаживаются на сердечник.

Обмотка должна полностью заполнять внутреннее пространство, окружённое сердечником и называемое окном. Необходимо обеспечить хорошую изоляцию провода и обмоток друг от друга и от сердечника. Однако следует первичную и вторичную обмотки располагать возможно ближе друг к другу, чтобы уменьшить вредное явление магнитного рассеяния, состоящее в том, что часть магнитного потока, созданного первичным током, не пересекает витки вторичной обмотки и, таким образом, не участвует в трансформации. Для уменьшения магнитного рассеяния иногда обмотки делят на части или секции и наматывают секции первичной и вторичной обмотки поочерёдно.

Сердечник для уменьшения потерь энергии в нём всегда делается из тонких пластинок специальной стали.

Возможны два основных случая работы трансформатора. Когда вторичная обмотка разомкнута, трансформатор работает в режиме холостого хода. Первичная катушка при этом ведёт себя как дроссель и потребляет очень небольшой ток. Мощность этого тока расходуется лишь на весьма небольшие потери в сердечнике и на нагревание провода первичной обмотки. Вторичное напряжение в этом режиме получается наибольшим.

При замыкании вторичной обмотки на некоторое сопротивление, т. е. на какой-либо потребитель тока, получается режим нагрузки. Чем меньше это нагрузочное сопротивление, тем больше вторичный ток и мощность во вторичной цепи. Вместе с тем возрастает и первичный ток, так как мощность в первичной цепи почти равна вторичной мощности. Напряжение вторичной обмотки нагруженного трансформатора несколько меньше, чем при холостом ходе, так как имеется потеря напряжения на сопротивлении самой вторичной обмотки. Нельзя замыкать накоротко вторичную обмотку, так как при этом сильно возрастает ток этой обмотки, а также первичный ток, и трансформатор может сгореть.

Со стороны вторичной обмотки трансформатор является генератором, обладающим определённой эдс и некоторым внутренним сопротивлением. А со стороны первичной обмотки трансформатор представляет собой нагрузочное сопротивление для того генератора, который питает трансформатор. Для питания радиоприёмников и усилителей от сети переменного тока служат так называемые силовые трансформаторы, имеющие одну первичную обмотку и несколько вторичных обмоток на различные напряжения. Пример схемы такого трансформатора дан на рис. 37. Во многих схемах радиоприёмников и усилителей используются трансформаторы низкой частоты с замкнутым стальным сердечником.

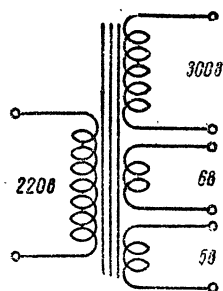


Рис. 37. Схема силового трансформатора с несколькими обмотками

Широко применяются также трансформаторы высокой частоты из двух катушек, расположенных рядом (рис. 38) и не имеющих стального сердечника, в котором при высоких частотах получаются большие потери энергии. Иногда в трансформаторах высокой частоты применяют сердечники из магнитодиэлектриков.

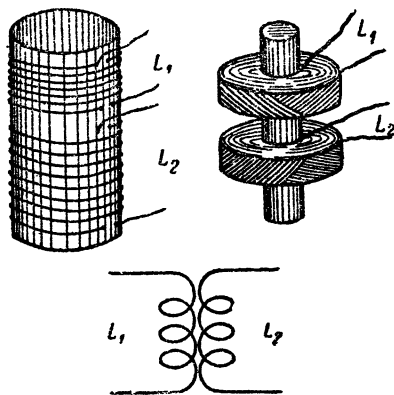


Рис. 38. Трансформаторы высокой частоты и их изображение на схемах

Трансформатор высокой частоты осуществляет индуктивную связь двух цепей. Такая связь иногда делается переменной. В этом случае взаимное расположение катушек

может изменяться, например так же, как в варнометре. На схемах переменную связь изображают стрелкой.

В радиоаппаратуре встречаются также автотрансформаторы, в которых первичная и вторичная обмотки не

изолированы друг от друга. Они применяются, главным образом, для питания приёмников и усилителей от сети. У понижающего автотрансформатора вторичная обмотка является частью первичной обмотки (рис. 39а). Такой автотрансформатор можно рассматривать как делитель напряжения, а в повышающем автотрансформаторе первичная обмотка составляет часть вторичной обмотки (рис. 39б).

Нередко применяются автотрансформаторы, дающие несколько различных напряжений. Для примера на рис. 39в показан автотрансформатор, включённый частью своей обмотки (зажимы 0 и 127) на сетевое напряжение 127 в. От ещё меньшей части обмотки (зажимы 0 и 6) можно получать напряжение 6 в, а вся обмотка (зажимы 0 и 300) даёт напряжение 300 в.

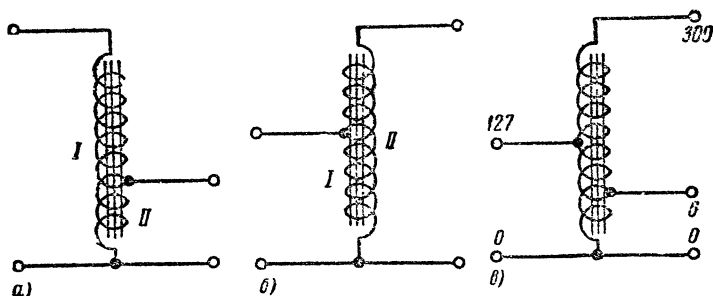


Рис. 39. Схема автотрансформатора: понижающего (а), повышающего (б) и универсального (в)

По сравнению с обычным трансформатором при одной и той же мощности автотрансформатор имеет меньшее сечение сердечника и меньшее количество провода в обмотках. Автотрансформаторы без стальных сердечников или с сердечниками из магнито-диэлектриков применяются также на высоких частотах.

## 24. Конденсаторы

На любом проводнике можно создать положительный или отрицательный электрический заряд. Чем больше размеры проводника, тем больше его *электрическая ёмкость* или просто *ёмкость*, т. е. вместимость для

электрических зарядов. Подобно этому при одном и том же давлении в сосуде большего объёма можно поместить соответственно большее количество газа. Объём сосуда определяет его ёмкость, т. е. вместимость для газа. При одной и той же температуре тело с большей массой может запастись большее количество тепла. Следовательно, масса тела определяет его теплоёмкость, т. е. вместимость для тепловой энергии.

Величину электрической ёмкости обозначают буквой *C*. Для измерения ёмкости существует несколько различных единиц. В прошлые годы была распространена единица ёмкости сантиметр, которую не следует путать с сантиметром длины, а также с квадратным или кубическим сантиметром. Сантиметр ёмкости — это ёмкость металлического шарика с радиусом в один сантиметр.

В настоящее время основной практической единицей ёмкости является *фарада*, обозначаемая буквой *ф*. Ёмкость в одну фараду очень велика и поэтому на практике пользуются более мелкими единицами: миллионной долей фарады *микрофарадой* (*мкф*) и миллионной долей микрофарады *микромикрофарадой* или *пикофарадой* (*мкмкф* или *пф*). Между пикофарадами и сантиметрами ёмкости существует простое соотношение:  $1 \text{ пф} = 0,9 \text{ см}$  или  $1 \text{ см} = 1,1 \text{ пф}^1$ .

Одиночные проводники обладают малой ёмкостью, но существуют приборы, которые при небольших размерах проводников имеют весьма значительную ёмкость и позволяют накопить большие электрические заряды при сравнительно невысоких напряжениях. Такие приборы называются *конденсаторами* от слова *конденсация*, означающего *сгущение*.

Назначением конденсатора является запасание электрических зарядов.

В простейшем виде конденсатор состоит из двух металлических пластин, разделённых друг от друга слоем изоляции, в качестве которой может служить воздух или какой-либо другой диэлектрик (рис. 40). Пластины, называемые обкладками, заряжаются одна

---

<sup>1)</sup> На конденсаторах единицы ёмкости иногда обозначаются  $\text{рF}$  и  $\mu\text{рF}$  или  $\text{pF}$ .

положительным, а другая отрицательным электричеством. Вследствие сильного взаимного притяжения заряды удерживают друг друга и благодаря этому возможно накопить в конденсаторе весьма большие электрические заряды.

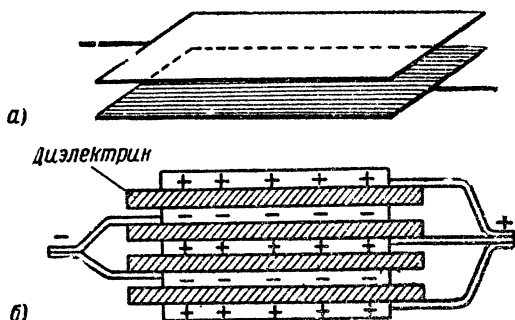


Рис. 40. Устройство конденсатора с двумя и многими пластинками

Чем больше площадь обкладок, тем больше ёмкость конденсатора. При этом следует учитывать лишь так называемую *рабочую площадь*, т. е. площадь той части одной обкладки, против которой находится другая обкладка. Кроме того, чем ближе пластины друг к другу, тем сильнее взаимное притяжение зарядов и тем больше ёмкость. Для примера укажем, что конденсатор из двух пластинок по  $1 \text{ см}^2$  каждая с воздушным диэлектриком толщиной  $1 \text{ мм}$  имеет ёмкость немного меньше  $1 \text{ пф}$ . Влияние диэлектрика на ёмкость характеризуется особой величиной, носящей название *диэлектрической постоянной* или *диэлектрической проницаемости*. Для воздуха она наименьшая, а для твёрдых или жидких диэлектриков её значение в несколько раз больше и ёмкость конденсатора соответственно увеличивается. Увеличение ёмкости конденсатора от замены воздуха другим диэлектриком указано в табл. III.

Конденсаторы из двух пластин пригодны только для сравнительно небольшой ёмкости, так как неудобно чрезмерно увеличивать площадь пластин. Можно, конечно, для увеличения ёмкости уменьшить расстояние

Таблица III

## Ёмкости конденсаторов с твёрдыми и жидкими диэлектриками

Диэлектрик конденсатора	Во сколько раз увеличивается ёмкость от замены воздуха данным диэлектриком
Слюда . . . . .	5—7
Резина . . . . .	3,5
Тиконд (керамический материал) . . .	90
Радиофарфор . . . . .	6
Бумага пропарафинированная . . . .	2,2

между пластинами, но только до некоторого предела. Если слой диэлектрика будет очень тонким, то его пробьёт искра. *Чем выше напряжение на конденсаторе, тем толще должен быть диэлектрик.*

Все конденсаторы после изготовления испытываются высоким напряжением. *Рабочее напряжение*, при котором конденсатор может работать долгое время без опасности пробоя, должно быть в 2—3 раза меньше *испытательного напряжения*. Величина рабочего напряжения зависит от так называемой *электрической прочности* диэлектрика. Воздух обладает малой электрической прочностью и сравнительно легко пробивается искрой. Значительно более высокую электрическую прочность имеют твёрдые диэлектрики, например, слюда, фарфор и другие.

Для получения больших ёмкостей делают многопластинчатые конденсаторы, имеющие две системы пластин (рис. 40б). Все чётные пластины соединены между собой и представляют как бы одну обкладку, а все нечётные пластины также соединяются друг с другом и служат в качестве второй обкладки. У всех внутренних пластин работают обе стороны, а крайние пластины используются лишь с внутренней стороны. Такой конденсатор как бы состоит из нескольких двухпластинчатых конденсаторов, число которых на единицу меньше, чем общее число пластин.

Диэлектрик конденсатора никогда не является идеальным. Электроны с отрицательно заряженной обкладкой постепенно переходят через диэлектрик на другую обкладку, образуя небольшой ток, называемый



током утечки. Поэтому заряженный конденсатор постепенно уменьшает свой заряд.

На практике часто бывают соединены несколько конденсаторов. При параллельном соединении (рис. 41а) общая ёмкость  $C$  равна сумме ёмкостей отдельных конденсаторов:

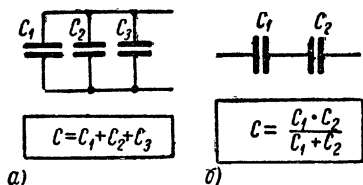


Рис. 41. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

Такое соединение применяют в случае, если имеются конденсаторы меньшей ёмкости, чем требующаяся.

При последовательном соединении нескольких конденсаторов общая ёмкость, наоборот, уменьшается и она всегда меньше ёмкости любого из включённых конденсаторов. Если последовательно соединены два конденсатора одинаковой ёмкости (рис. 41б), то общая ёмкость равна половине ёмкости одного из конденсаторов. Например, при последовательном соединении двух конденсаторов ёмкостью по 200  $\mu\text{ф}$  общая ёмкость составляет 100  $\mu\text{ф}$ . Когда последовательно соединяются два различных конденсатора (рис. 41), то общая ёмкость определяется по формуле:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Например, если последовательно соединены конденсаторы ёмкостью в 2000  $\mu\text{ф}$  и 3000  $\mu\text{ф}$ , то общая ёмкость будет равна:

$$C = \frac{2000 \cdot 3000}{2000 + 3000} = 1200 \mu\text{ф}.$$

Последовательное соединение применяют иногда в случае, если имеются конденсаторы большей ёмкости, чем требуется. Кроме того, при последовательном соединении общее рабочее напряжение больше, чем у одного конденсатора.

Если конденсатор включён в цепь постоянного тока, то непрерывное прохождение тока в цепи невозможно, так как пластины конденсатора разделены друг

от друга изолятором. Лишь в течение небольшого времени после замыкания цепи пройдёт кратковременный ток, заряжающий конденсатор. Как только конденсатор полностью зарядится и напряжение на его обкладках станет равно эдс источника, дальнейшее прохождение тока прекратится. Подобно этому, если накачивать насосом газ в какой-либо замкнутый сосуд, то как только давление газа станет равно давлению, создаваемому насосом, дальнейшее поступление газа в сосуд прекратится.

*Чем больше ёмкость у конденсатора, тем медленнее он заряжается*, так как в нём должно вместиться больше электричества. Всё же заряд обычно длится лишь небольшие доли секунды. *Чем меньше сопротивление, включённое в цепь последовательно с конденсатором, тем быстрее идёт заряд*, так как зарядный ток получается сильнее. Когда сопротивление весьма мало, то заряд происходит почти мгновенно.

Если заряженный конденсатор отключить от источника и замкнуть его на какое-либо сопротивление, то он разрядится.

*Чем меньше ёмкость конденсатора и сопротивление, тем быстрее происходит разряд*. При замыкании конденсатора накоротко разряд будет почти моментальный. Во время разряда напряжение на конденсаторе падает и доходит до нуля, после чего прекращается и ток. На рис. 42 показаны графики нарастания и спада напряжения при заряде и разряде конденсатора.

Итак постоянный ток через конденсатор не проходит. Если же конденсатор включить в цепь переменного тока (рис. 43), то хотя электроны не могут пройти через диэлектрик конденсатора, но всё же в цепи появляется ток. Поэтому принято говорить, что *переменный ток проходит через конденсатор*.

Когда напряжение на зажимах генератора возрастает, конденсатор заряжается и в цепи проходит зарядный ток. Энергия переходит из генератора в конденсатор и запасается в последнем в виде электрического заряда. Напряжение на конденсаторе растёт и в некоторый момент достигает максимального амплитудного значения. В этот момент конденсатор полностью заряжен и зарядный ток прекращается. После этого напряжение

генератора начинает уменьшаться. А так как конденсатор был заряжен до амплитудного напряжения, то он теперь будет разряжаться обратно на генератор, отдавая последнему запасённую энергию. Направление тока

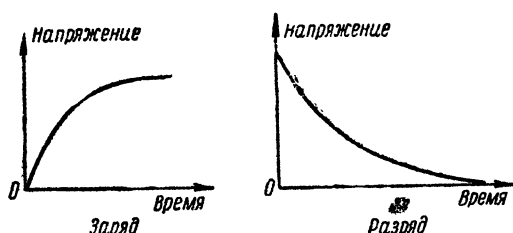


Рис. 42. График изменения напряжения при заряде и разряде конденсатора

при разряде конденсатора противоположно направлению зарядного тока. В конце концов в некоторый момент, когда напряжение дойдёт до нуля, конденсатор полностью разрядится.

Таким образом, в первую четверть периода конденсатор является потребителем или нагрузкой для генератора, а во вторую четверть периода он, наоборот, сам служит генератором, а роль потребителя уже выполняет генератор. В третью четверть периода снова повторится заряд, так как напряжение генератора снова будет возрастать, а в четвертую четверть периода опять произойдёт разряд. В цепи будет существовать переменный ток, представляющий собой ток заряда и разряда конденсатора.

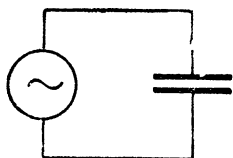


Рис. 43. Конденсатор в цепи переменного тока

При этом конденсатор представляет для переменного тока некоторое *ёмкостное сопротивление*, являющееся чисто реактивным. Действительно, ведь генератор отдаёт свою энергию конденсатору только при заряде, а при разряде конденсатор полностью отдаёт эту энергию обратно. В конденсаторе нет безвозвратного расхода энергии.

Величина тока в цепи с конденсатором зависит от напряжения генератора, от ёмкости конденсатора и от частоты. Зависимость тока от напряжения является

обычной, вытекающей из закона Ома: чем больше напряжение генератора, тем больше ток. Если же увеличить ёмкость конденсатора, то зарядный и разрядный токи увеличатся, так как при большей ёмкости конденсатор будет запасать больший заряд. Но увеличение тока равноценно уменьшению сопротивления. Таким образом, *при увеличении ёмкости ёмкостное сопротивление уменьшается.*

При более высокой частоте заряд и разряд происходят быстрее, т. е. определённое количество электричества проходит в более короткие промежутки времени, и поэтому ток увеличивается. А увеличение тока равносильно уменьшению сопротивления. Таким образом, *с повышением частоты ёмкостное сопротивление уменьшается.* Как видно, влияние частоты на ёмкостное и индуктивное сопротивления совершенно противоположно.

Ёмкостное сопротивление обозначают  $X_C$  и его величину в омах можно приближённо вычислить по формуле:

$$X_C = \frac{160\,000}{f \cdot C}$$

где  $f$  — частота в герцах и  $C$  — ёмкость в микрофарадах.

Для примера рассчитаем ёмкостное сопротивление конденсатора в 1 *мкф* на частоте 50 *гц*. Получим:  $X_C = 160\,000 : 50 = 3200$  *ом*. Этот же конденсатор на частоте 5 *мггц* имеет сопротивление в 100 000 раз меньше, так как эта частота в 100 000 раз больше. Величина сопротивления в этом случае составляет 0,032 *ом*. Таким образом, конденсатор ёмкостью в 1 *мкф* для высокой частоты представляет короткое замыкание. Если же взять конденсатор ёмкостью в 100 *пф* или 0,0001 *мкф*, то его сопротивление будет в 10 000 раз больше. Для частоты 50 *гц* его сопротивление составляет 32 *мгом*, т. е. практически он не пропускает ток низкой частоты. Зато для высокой частоты 5 *мггц* его сопротивление равно всего лишь 320 *ом*. Величины ёмкостных сопротивлений для различных конденсаторов при разных частотах даны в табл. IV.

Наряду с катушками индуктивности конденсаторы имеют широкое применение в радиотехнике. Конден-

Таблица IV

## Ёмкостное сопротивление конденсаторов (в омах)

Частота	Ё м к о с т ь					
	10 пф	100 пф	1000 пф	10 000 пф	0,1 мкф	1 мкф
50 гц	32 мгом	32 мгом	3,2 мгом	320 000	32 000	3 200
1 000 .	16 .	1,6 .	160 000	16 000	1 600	160
200 кгц	80 000	8000	800	80	8	0,8
1 000 .	16 000	1600	160	16	1,6	0,16
10 000 .	1 600	160	16	1,6	0,16	0,016

саторы малой ёмкости (порядка десятков и сотен пикофарад) служат для пропускания токов высокой частоты. Для пропускания токов низкой частоты применяются конденсаторы большой ёмкости (порядка долей микрофарды целых микрофарад).

Часто конденсаторы применяются для разделения друг от друга постоянного и переменного токов, а также токов высокой и низкой частоты. Так, например, если в какую-либо цепь включить конденсатор небольшой ёмкости, то он не пропустит постоянный ток и почти не пропустит ток низкой частоты, так как для него сопротивление конденсатора будет велико. Но ток высокой частоты пройдёт через такой конденсатор свободно.

Все конденсаторы разделяются на *постоянные* и *переменные*, а по роду диэлектрика различают *воздушные, керамические, слюдяные, бумажные* и *электrolитические* конденсаторы. Внешний вид некоторых постоянных конденсаторов показан на рис. 44.

Каждый конденсатор создаёт потери энергии, хотя и весьма незначительные. Воздух практически не даёт потерь, но он легко пробивается искрой. Это мешает осуществить воздушные конденсаторы большой ёмкости.

Воздушные конденсаторы делаются лишь в случаях, когда нужно обеспечить отсутствие потерь энергии. Они встречаются почти исключительно только в радиопередатчиках. Для высоких напряжений их приходится

делать с довольно большим расстоянием между пластинами.

Широкое распространение в последнее время получили керамические конденсаторы. Они представляют собой пластинки или трубочки из специального кера-

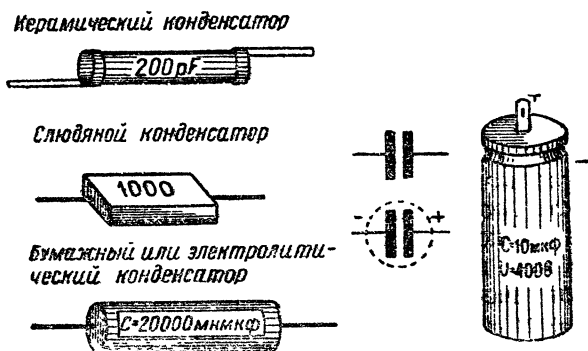


Рис. 44. Внешний вид некоторых постоянных конденсаторов и их изображение на схемах

мического материала вроде фарфора, покрытые с двух сторон металлическим слоем. Керамические конденсаторы имеют весьма малые потери и хорошо выдерживают высокие напряжения. Их ёмкость бывает от единицы до тысяч пикофарад. Применяются они, главным образом, в цепях токов высокой частоты.

Слюдяные конденсаторы делаются из пластинок слюды и станиолевых листочков и имеют ёмкость до десятков тысяч пикофарад. По сравнению с керамическими конденсаторами потери в них больше и они используются, главным образом, в цепях токов низкой частоты. Бумажные конденсаторы делаются из полосок парафинированной бумаги и станиоля на большую ёмкость до нескольких микрофарад и применяется для токов низкой частоты, так как на высокой частоте потери энергии в них значительны.

Для ещё больших ёмкостей в десятки, сотни и даже тысячи микрофарад служат электролитические конденсаторы. Принцип их действия состоит в том, что на поверхности алюминиевой пластинки, находящейся в специальном электролите, при прохождении тока

образуется слой окиси алюминия, являющейся изолятором. В результате получается конденсатор, у которого обкладками будут алюминиевая пластинка и электролит, а диэлектриком — слой окиси алюминия. Благодаря ничтожно малой толщине этого слоя удаётся получить очень большие ёмкости. В случае пробоя слой окиси сам восстанавливается после того, как напряжение будет снято. Электролитические конденсаторы имеют сравнительно малые размеры, небольшой вес и невысокую стоимость. Их недостаток — сравнительно малое рабочее напряжение, не выше 500 в. Кроме того, у них велика утечка. Выпускаемые сейчас электролитические конденсаторы можно применять лишь в тех цепях, в которых есть постоянное напряжение, причём включать их нужно с соблюдением полярности. Они делаются большей частью в алюминиевых корпусах. Низковольтные электролитические конденсаторы выпускаются в картонных корпусах.

Слюдяные конденсаторы для защиты внешних влияний запрессовываются в пластмассу. Бумажные конденсаторы имеют либо картонный, либо металлический корпус. На конденсаторах указывают их ёмкость, возможные отклонения величины ёмкости в процентах, например,  $\pm 10\%$ , рабочее напряжение и испытательное напряжение. На электролитических конденсаторах указывается максимальное или пиковое напряжение, при котором возможен пробой, а также обязательно помечаются полюсы. Если корпус алюминиевый, то он всегда является минусом.

Помимо конденсаторов постоянной ёмкости, для настройки радиоприёмников и других радиоприборов большое применение имеют конденсаторы переменной ёмкости. Они делаются обычно воздушные, реже с твёрдым диэлектриком. На рис. 45 показан принцип устройства и схематическое изображение таких конденсаторов. Переменный конденсатор имеет систему неподвижных пластин, называемую статором, и систему подвижных пластин, укрепленных на оси и называемых ротором. При повороте оси конденсатора с помощью ручки подвижные пластины входят в большей или меньшей степени в промежутки между неподвижными пластинами, и ёмкость конденсатора увеличивается. Для упрощения чертежа на рис. 45 показаны только одна

неподвижная и одна подвижная пластинки в положении, соответствующем некоторой величине ёмкости, средней между наибольшей и наименьшей. У переменных конденсаторов ёмкость обычно может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен пикофард, например от 10 до 400 *пф*.

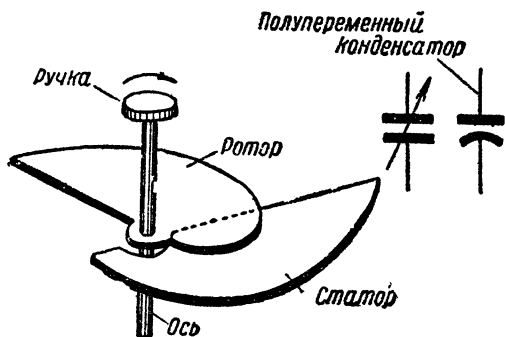


Рис. 45. Принцип устройства переменного конденсатора и его изображение на схемах

Применяются также маленькие переменные конденсаторы чаще всего из двух пластинок, у которых ёмкость изменяется в небольших пределах, например от 4 до 40 *пф*. Они называются *полупеременными* или *подстроечными* конденсаторами и обозначаются на схемах так, как показано на рис. 45.







## ЗАКЛЮЧЕНИЕ



В СЁ, что изложено в этой брошюре, является фундаментом для изучения радиотехники. Любая радиосхема представляет собой определённое сочетание нескольких электрических цепей, работу которых можно понять только в том случае, если чётко освоены основные законы электротехники.

Важнейшими деталями в радиосхемах являются различные катушки, конденсаторы, сопротивления, трансформаторы. Если читатель внимательно изучил изложенные в брошюре принципы работы и свойства радио-деталей, то ему уже будет нетрудно разобраться в том, как эти детали работают в схемах радиоаппаратуры.

Начинающий радиолюбитель должен поставить перед собой задачу иметь твёрдые знания по основам электро-радиотехники и повседневно совершенствовать их. Каждый технически грамотный радиолюбитель, знающий основы теории и умеющий применять теоретические знания в практической работе, является ценным специалистом и может оказать большую помощь делу радиофикации нашей Родины.

Приводим краткий список книг и брошюр для углубления знаний и дальнейшего изучения теории и практики электрорадиотехники.

1. В. К. Лабутин. Я хочу стать радиолюбителем. Первые шаги. Госэнергоиздат, 1949 г.

2. З. Б. Гинзбург, Ф. И. Тарасов. Книга начинающего радиолюбителя. Госэнергоиздат, 1949 г.

3. З. Б. Гинзбург, Ф. И. Тарасов. Практические работы радиолюбителя. Госэнергоиздат, 1949 г.

4. И. П. Жеребцов. Радиотехника. Связьиздат, 1949 г.



**Цена 2 руб. 25 коп.**