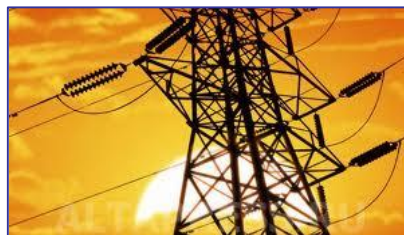


ГЛАВА 5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 32. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.



1⁰. Когда говорят об использовании электрической энергии в быту, на производстве или транспорте, то имеют в виду работу электрического тока. Электрический ток подводят к потребителю от электростанции по проводам. Поэтому, когда в домах неожиданно гаснут электрические лампы или прекращается движение электропоездов, троллейбусов, говорят, что в проводах *исчез ток*.

Что же такое *электрический ток* и что необходимо для его возникновения и существования в течение нужного нам времени?

2⁰. Слово «*ток*» означает движение или течение чего-то. В реках и водопроводных трубах, например, течет вода, в других трубопроводах – нефть или газ. В этих случаях говорят о *токе* или *потоке* воды, нефти или газа.

3⁰. А что может перемещаться – *течь* в проводах, соединяющих потребителей электрической энергии с электростанцией? Конечно же, свободные электроны, которых очень много в каждом проводнике, *рис. 51*.

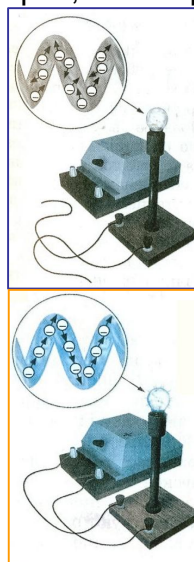
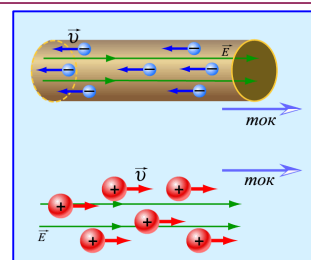


Рис. 51. До подключения лампы к батарее свободные электроны в нити двигались совершенно беспорядочно. После подключения лампы к батарее в нити возникло электрическое поле, так как между зажимами батареи есть напряжение. Возникшее электрическое поле действовало на свободные электроны, и они, продолжая хаотическое движение, под действием электрической силы стали двигаться упорядочено к положительному полюсу батареи. Таким образом, в нити возникло упорядоченное движение электронов, т. е. появился ток.

Электроны имеют отрицательный электрический заряд. Электрическими зарядами могут обладать и более крупные частицы вещества – ионы. Следовательно, в проводниках могут перемещаться различные заряженные частицы.

Электрическим током называется упорядоченное движение заряженных частиц.



4⁰. Электрический ток, может быть получен только в веществе, в котором имеются свободные заряженные частицы (электроны, ионы). Чтобы эти частицы пришли в упорядоченное движение, нужно создать в проводнике электрическое поле E . Для этого необходимо на концах проводника поддерживать напряжение $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$ – *разность потенциалов* (см. формулу [10]).

Можно, например, заряжать тело **A** эбонитовой или стеклянной наэлектризованной палочкой, *рис. 52*. Однако нетрудно понять, что такой способ поддержания электрического поля практически непригоден.

5⁰. Чтобы нагляднее пояснить условия, необходимые для поддержания тока, рассмотрим *гидравлическую аналогию*.

На *рис. 53* два сообщающихся сосуда. Чтобы между ними существовал ток воды, необходимо поддерживать напор – разность уровней (аналог разности потенциалов, напряжения). Тогда гравитационное поле, действуя на частицы воды, будет поддерживать ток воды. Если поддерживать напор, переливая воду черпаком из второго сосуда в первый, это будет походить на использования наэлектризованной палочки в предыдущем примере.

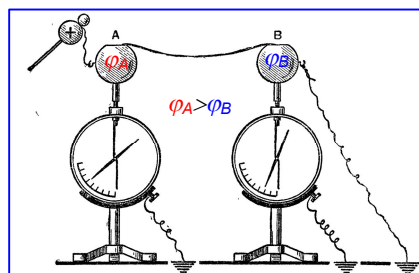


Рис.52. Ток идёт от заряженного тела A к телу B, пока $\varphi_A > \varphi_B$. Ток прекратится, когда потенциалы тел A и B станут равными

Конечно, для поддержания напора воды разумнее поставить *водяной насос*, а для поддержания разности потенциалов использовать *источник электрического тока*.

6⁰. Обратите внимание, что как для работы водяного насоса, так и для источника электрического тока необходима *сторонняя энергия*.



Вопросы

1. Что имеют в виду, когда говорят о практическом использовании электрической энергии?
2. Что такое электрический ток?
3. Какие условия должны быть выполнены, чтобы существовал ток?
4. Как называется устройство, осуществляющее это на практике?

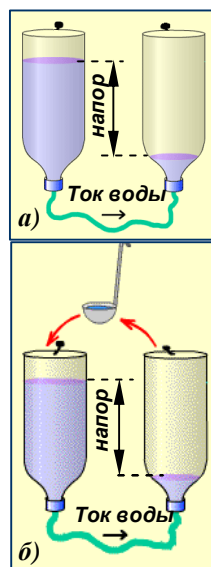


Рис. 53. В случае а) при перетекании воды напор быстро уменьшается, наступает равновесное состояние системы (уровни выравниваются). В случае б) напор поддерживается за счёт работы, совершаемой внешними (сторонними) силами (переливанием воды черпаком). Система поддерживается в неравновесном состоянии. В обоих случаях потенциальная энергия тока воды расходуется на преодоление сопротивления трубы.

§ 32,а. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1⁰. **Вольтов столб – первый источник постоянного тока.** В 1790 г. Луиджи Гальвани, итальянский физиолог, исследуя препарированную мышцу лягушачьей лапки, заметил, что она сокращается, если к ней прикоснуться одновременно двумя предметами, сделанными из разных металлов. Объяснил это явление другой итальянский учёный — Алессандро Вольта. Он доказал, что две пластины из разнородных металлов в растворе соли (в данном случае его роль играла кровь) рождают электричество.

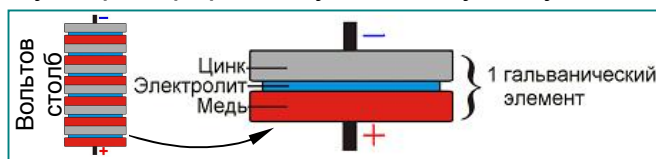


Рис. 54. Вольтов столб – первая электрическая батарея (слева) и гальванический элемент (справа).

В 1799 г. Вольта создал первый искусственный источник электрического тока. Он представлял собой медные и цинковые кружки с суконными прокладками между ними. Прокладки были пропитаны слабым раствором кислоты. Своё изобретение Вольта назвал в честь Л. Гальвани **гальваническим элементом**. Чтобы получить значительную электрическую мощность, элементы приходилось последовательно соединять в батареи. Их именовали **«вольтовыми столбами»**.

2⁰. Долгие годы гальванические элементы были единственными источниками тока. С них и *началась электротехника*. Они дали ток для первых опытов французского физика Андре Мари Ампера, который установил один из главных законов электричества — закон взаимодействия проводников с током. Этот закон исправно действует во всех электрических машинах, электромагнитах, реле и вообще везде, где по проводнику течёт ток. Гальванические элементы использовал немецкий физик Георг Симон Ом, когда в 1827 г. установил зависимость между напряжением, действующим в электрической цепи, силой тока и сопротивлением проводника. Русский учёный Василий Владимирович Петров зажёл в 1802 г. первый электрический источник света — электрическую дугу с батареей из 2100 медно-цинковых элементов. Исследовав свойства дуги, Петров понял, что её можно применять не только для освещения, но и для сварки металлов. Учёный назвал полученную им электрическую дугу **вольтовой**.

3⁰. Рассмотрим более подробно устройство и работу гальванических элементов и аккумуляторов, которые будем использовать в опытах по электричеству.

В гальванических элементах происходит превращение химической энергии в электрическую. Такие элементы состоят из цинковой (Zn) и медной (Cu) пластин, между которыми находится прокладка, пропитанная кислотой, *рис. 54*. Пластины можно просто опустить в водный раствор серной кислоты (H₂SO₄), *рис. 55*.

При взаимодействии цинка с кислотой внутри элемента происходит образование и разделение частиц, имеющих разные электрические заряды. При этом **цинковая** пластина становится заряженной **отрицательно**, а **медная** – **положительно**. Между заряженными пластинами, которые называют **электродами**, возникает электрическое поле. Если соединить медную и цинковую пластины элемента проводником, то по всей длине проводника начнут перемещаться электроны, в цепи возникнет электрический ток. На *рис. 55* полюсы элемента соединены через электрическое сопротивление **R**.

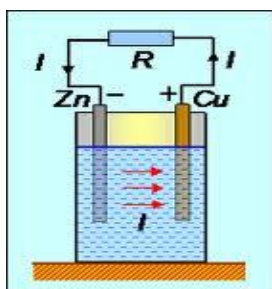


Рис. 55. Простейший гальванический элемент

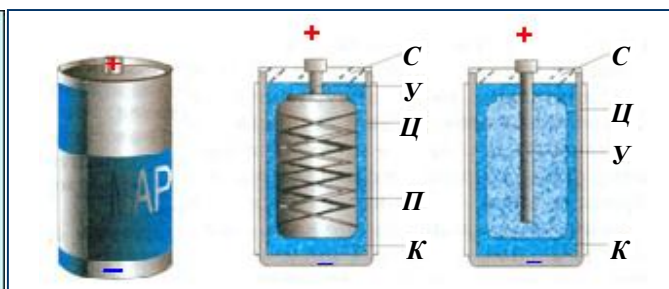


Рис. 56. Внешний вид и устройство сухого гальванического элемента. С – слой смолы; У – угольный стержень; Ц – цинковый сосуд; П – полотняный мешочек; К – клейстер.

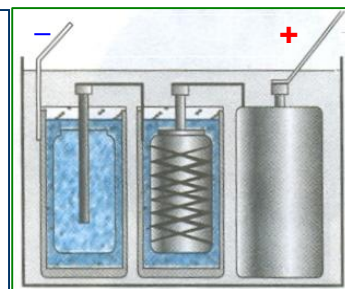


Рис. 57. Соединение 3-х элементов в батарею напряжением 4,5 вольт.

4⁰. Широкое практическое применение имеет **сухой гальванический элемент** (*рис.56*). Он состоит из цинкового сосуда **Ц**, в который вставлен угольный стержень **У**. Стержень помещен в полотняный мешочек **П**, наполненный смесью оксида марганца (IV) с углем. Вместо жидкости в элементе используют густой клейстер **К**, приготовленный из муки на растворе нашатыря. Цинковый сосуд с содержимым помещен в картонную коробку и залит сверху слоем смолы **С**, в котором сделано небольшое отверстие для выхода образующихся при работе газов. Зажим на **угольном** стержне является **положительным** полюсом элемента, а **цинковый** сосуд – **отрицательным** полюсом.

Несколько таких элементов составляют батарею, *рис. 57*. В ней угольный стержень первого элемента соединен с цинковым стаканчиком второго, а угольный стержень второго – со стаканчиком третьего элемента. От цинкового стаканчика первого элемента и угольного стержня третьего выведены две жестяные пластинки, которые являются полюсами батареи: первая – **отрицательным**, вторая – **положительным**.

5⁰. Простейший электрический **аккумулятор** (accumulator собиратель, от accumulo собираю, накопляю) состоит из двух свинцовых пластин, помещенных в

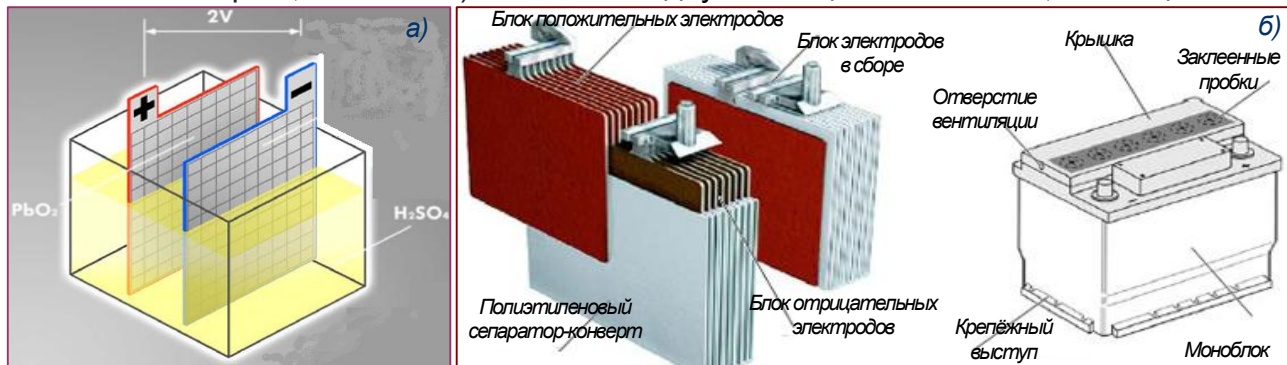


Рис. 58. Свинцовый (кислотный) аккумулятор. а) простейший аккумулятор; б) устройство и общий вид современного свинцового аккумулятора.

раствор серной кислоты, *рис. 58*.

Чтобы аккумулятор стал источником тока, его надо «зарядить».

Для зарядки через аккумулятор пропускают ток от какого-нибудь источника. Когда аккумулятор зарядится, его можно использовать как самостоятельный источник тока. Полюсы аккумуляторов обозначены знаками «+» и «-». При зарядке положительный полюс аккумулятора соединяют с положительным полюсом источника тока, отрицательный – с отрицательным полюсом.

В аккумуляторе во время зарядки электрический ток совершает работу, в результате которой увеличивается химическая энергия аккумулятора. При разрядке же аккумулятора химическая энергия превращается в другие виды энергии в процессе работы, которую совершает ток.

Таким образом, **аккумуляторы являются обратимыми источниками тока многократного использования.**

Кроме **свинцовых**, или **кислотных**, аккумуляторов, широко применяют **железоникелевые**, или **щелочные**, аккумуляторы.

На *рис 58** изображены батареи кислотных, щелочных аккумуляторов и малогабаритные щелочные аккумуляторы.

6⁰. Аккумуляторы имеют широкое и разнообразное применение. Они служат для освещения железнодорожных вагонов, автомобилей, для запуска автомобильного двигателя (стартера). Батареи аккумуляторов питают электроэнергией подводную лодку под водой. Радиопередатчики и научная аппаратура на искусственных спутниках Земли получают электропитание от аккумуляторов, установленных на спутнике. Малогабаритные аккумуляторы широко применяются в быту (часы, фотоаппараты, фонарики, детские игрушки и т. п.).

7⁰. Источники тока могут быть не только гальванические элементы, и аккумуляторы.

Электричество дают и **термоэлементы** (от греч. «терме» — «тепло»), или термопары, — проволоочки из разных металлов, концы которых сварены попарно. Если место соединения нагреть, на свободных концах возникнет электродвижущая сила. Мощность таких источников тока невелика, поэтому термопары применяют в измерительных приборах.

В термоэлементе внутренняя энергия нагревателя превращается в электрическую энергию, *рис. 59, а*.

При освещении некоторых веществ, например, селена, оксида меди, кремния, световая энергия непосредственно превращается в электрическую энергию – это явление **фотоэффекта**, *рис.59, б*. На нем основано устройство и действие фотоэлементов.

8⁰. В 1820 г. датский физик Ханс Кристиан Эрстед обнаружил **связь между электричеством и магнетизмом**. Он заметил, что стрелка компаса отклоняется, когда по лежащему рядом проводу идёт ток. Об этом явлении узнал английский учёный, блестящий экспериментатор Майкл Фарадей. Он повторил опыты Эрстеда, а спустя год уже смог наблюдать вращение магнита вокруг провода с током. Учёный поставил перед собой новую задачу — «превратить магнетизм в электричество». На её решение ушло десять лет. В 1831 г. Фарадей понял, что только переменное магнитное поле может породить электричество. Так была открыта

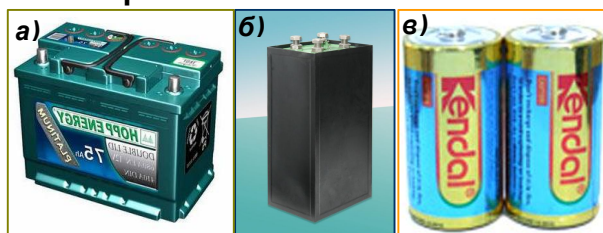


Рис.58. а) кислотный аккумулятор. б) щелочной аккумулятор. в) щелочные малогабаритные аккумуляторы.*

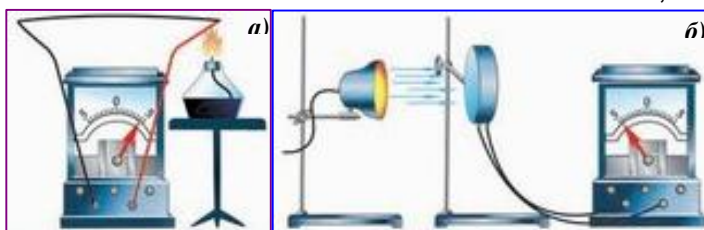


Рис. 59. Термопара преобразует тепловую энергию в электрическую (а). Фотоэффект – это преобразование энергии светового излучения в электрическую энергию (б).

электромагнитная индукция. В дальнейшем это привело к созданию генератора электрического тока.

На сегодняшних электростанциях электрический ток получают с помощью правнуков таких электрогенераторов. Они используют энергию воды, ветра, топлива. Устройство этих источников тока будет рассмотрено в дальнейшем.



Сегодня одним из простейших источников электричества являются *солнечные батареи* – фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. В солнечный день батарея из 36 элементов позволяет получить рабочую мощность около ≈ 90 ватт, при токе 5-6 ампер и напряжении –18 вольт. Материалом для них служит один из самых распространенных в земной коре элементов – кремний (Si), а источником энергии – бесплатные солнечные лучи. Они не имеют движущихся частей, и не требуют сложных механизмов контроля.



Важно понимать, что во всех источниках тока в процессе работы по разделению заряженных частиц происходит превращение механической, химической или какой-нибудь другой энергии в электрическую энергию.

9⁰. Итак, с электрическими явлениями человек познакомился ещё в древности, когда было замечено, что янтарь притягивает мелкие соринки и пух. А если потереть шар, отлитый из серы или стекла, он обнаружит те же свойства, что и янтарь. В Средние века научились делать «электрофорные (электростатические) машины», которые давали искры длиной несколько сантиметров. Однако постоянно работающие источники электричества появились позже — только в конце XVIII в.

Физика и техника XIX века дала человечеству первые электродвигатели и электрогенераторы, первое электрическое освещение. XX век называют по-разному: ядерным, космическим, информационно-компьютерным. Но, пожалуй, самое точное определение — «век электричества». Наши дома наполнились электрическими приборами: электрическими лампами, утюгами, пылесосами, стиральными машинами, телевизорами, компьютерами. Для нас стали привычными радиосвязь, мобильные телефоны и интернет. На улицах трамваи и троллейбусы, работают на электричестве. На железных дорогах электрички, под землёй — метро. На заводах — станки с электроприводом и сложнейшие электронные автоматы.

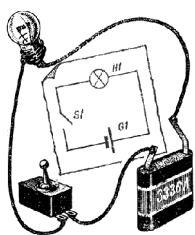
Эти устройства созданы и работают благодаря тому, что физики и инженеры достаточно глубоко разобрались в том, что такое электрические и магнитные явления.



Вопросы

1. Какова роль источника тока?
2. Что такое полюсы источника тока?
3. Какие превращения энергии происходят внутри источника тока?
4. Как устроен простейший элемент Вольта?
5. Какие превращения энергии происходят в элементе Вольта?
6. Какой электрод в элементе Вольта является положительным, какой – отрицательным?
7. Какие энергетические процессы происходят при зарядке и разрядке аккумулятора?
8. С какими полюсами источника тока соединяют полюсы аккумулятора при его зарядке?
9. Где на практике применяют аккумуляторы?
10. Какие превращения энергии происходят в термоэлементе? В фотоэлементе?

§33. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЁ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ



1⁰. Чтобы использовать энергию электрического тока, необходимо, прежде всего, иметь **источник тока**.

Электродвигатели, лампы, плитки, всевозможные приборы, работающие от электрического тока, называют **приемниками** или **потребителями** электрической энергии.

Электрическую энергию нужно доставить от источника к приемнику. Для этого приемник соединяют с источником электрической энергии **проводами**.

Чтобы в цепи был ток, она должна быть **замкнутой**, т. е. состоять только из **проводников** электричества. Если в каком-нибудь месте провод оборвется или на его место будет поставлен изолятор, ток в цепи прекратится.

Чтобы включать и выключать в нужное время приемники электрической энергии, применяют **замыкающие и размыкающие устройства** (ключи, рубильники, кнопки, выключатели и т. п.).

Источник тока, приемник, замыкающие и размыкающие устройства, соединенные между собой проводами, составляют электрическую цепь.

Чертежи, изображающие электрические приборы и их соединения в цепи, называют **схемами**. Приборы на схемах обозначают условными знаками. Некоторые из них даны на *рис. 60*.

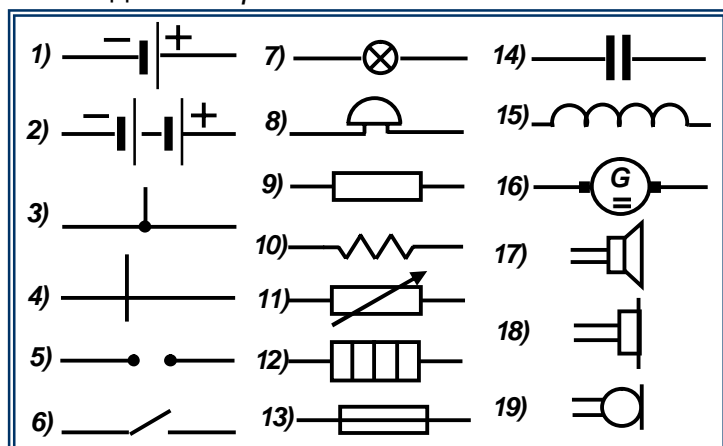


Рис. 60. Некоторые условные обозначения, применяемые на схемах: 1 – гальванический элемент или аккумулятор, 2 – батарея элементов и аккумуляторов, 3 – соединение проводов, 4 – пересечение проводов (без соединения), 5 – зажимы для подключения какого-нибудь прибора, 6 – ключ, 7 – электрическая лампа, 8 – электрический звонок; 9 и 10 – резисторы (проводники, имеющие определённое сопротивление), 11 – резистор переменный; 12 – нагревательный элемент, 13 – плавкий предохранитель. 14 – конденсатор, 15 – катушка индуктивности; 16 – генератор (источник тока); 17 – громкоговоритель, 18 – микрофон, 19 – телефон.

Две простейшие схемы изображены на *рис. 61*.

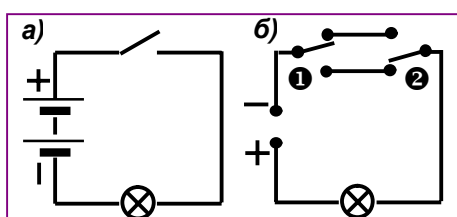


Рис. 61. Простейшие электрические схемы.



Вопросы

1. Какова роль источника тока в электрической цепи?
2. Какие приемники, или потребители, электрической энергии вы знаете?
3. Из каких частей состоит электрическая цепь?
4. Что такое замкнутая цепь? разомкнутая цепь?
5. Что такое схема электрической цепи?

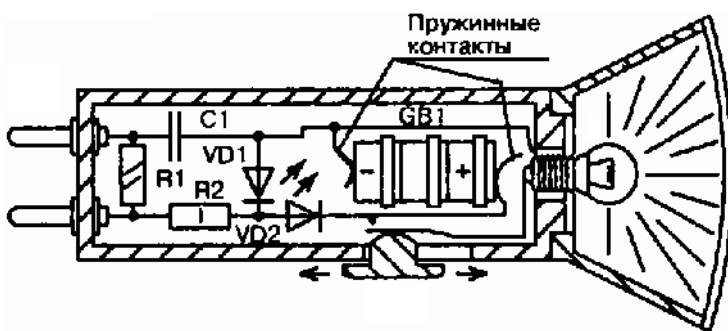


Упражнение

1. Рассмотрите устройство штепсельной вилки настольной лампы. Из какого материала изготовлены отдельные части ее?
2. Начертите схему цепи электрического звонка с кнопкой.
3. Начертите схему цепи, содержащей один гальванический элемент и два звонка, каждый из которых можно включать отдельно.

4. Придумайте схему соединения элемента, звонка и двух кнопок, расположенных так, чтобы можно было позвонить из двух разных мест.

5. На рис. 61,а изображена схема цепи простейшего карманного фонарика. Сравните её с рисунком в начале этого параграфа. Назовите части этой цепи.

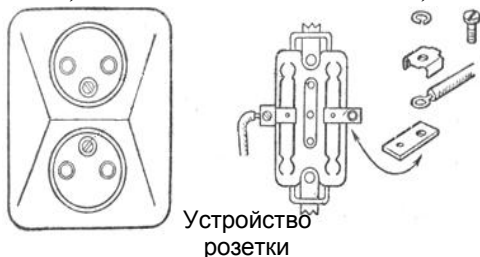
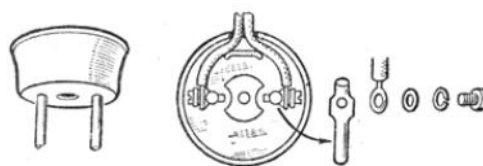


Электрическая схема современного аккумуляторного фонарика

Сравните схемы простейшего и современного ↑ аккумуляторного фонариков.

6. На рис. 61, б дана схема соединения лампы и двух переключателей. Рассмотрите схему и подумайте, где можно применить такую проводку.

Монтаж штепсельных вилок. Вилку разбирают, на проводах делают колечки и присоединяют их к штырькам вилки. Собирая вилку, следят за тем, чтобы штырьки заняли свои места. В ряде конструкций вилки имеют скобки для закрепления провода. Вилка, показанная на рис. справа, имеет на корпусе прилив, фиксирующий положение проводов. Важно тщательно разделить концы проводов, присоединяемых к вилке, и дополнительно их изолировать. Если шнур имеет пластмассовую изоляцию, то дополнительная изоляция не требуется.



Устройство розетки



В электрической цепи существуют только две неисправности: нет контакта там, где он должен быть, и есть контакт там, где его не должно быть.



§34. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов.

1⁰. Металлы в твердом состоянии, как известно, имеют кристаллическое строение. Частицы в кристаллах расположены в строго определенном порядке, образуя, пространственную кристаллическую решетку. В узлах кристаллической решетки расположены положительные ионы, а в пространстве между ними – свободные электроны (рис. 62). Они не связаны с ядрами своих атомов и движутся беспорядочно.

Отрицательный заряд всех свободных электронов по абсолютному значению равен положительному заряду всех ионов решетки. Поэтому в обычных условиях металл электрически нейтрален. Но если в металле создать электрическое поле, то свободные электроны начнут двигаться направленно под действием сил этого поля. Возникнет электрический ток. Беспорядочное движение электронов при этом сохраняется, подобно тому, как сохраняется беспорядочное движение в стайке мошкеры, когда под действием ветра она перемещается в одном направлении.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике очень мала – обычно около 0,1 мм/с.

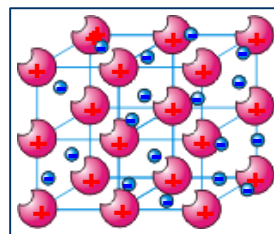


Рис. 62. Положительные ионы и свободные электроны в кристаллической решетке металла

2⁰. Доказательством того, что ток в металлах обусловлен электронами, явились опыты физиков нашей страны Манделъштама и Папалекси, а также американских физиков Стюарта и Толмена.

Идея этих опытов состоит в следующем. Если начать вращать кусок металла, то увлечённый кристаллической решёткой электронный газ будет вместе с ним вращаться (как жидкость во вращающемся сосуде). При внезапной остановке куска металла электронный газ должен некоторое время продолжать движение по инерции, подобно тому, как продолжает ещё вращаться жидкость в сосуде после его остановки. Задача заключалась в том, чтобы найти способ обнаружить это инерционное движение электронов в металле. Она была решена следующим образом.

Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси (рис.63). Концы проволоки посредством контактных колец, щёток и проводов соединялись с чувствительным гальванометром. При резком торможении катушки в течение долей секунды гальванометр обнаруживал ток. Направление этого тока показывало, что он вызван движением отрицательно заряженных частичек, т. е. электронов.

С помощью такого метода было не только обнаружено существование свободных электронов, но оказалось возможным определить и массу электрона.

3⁰. Обратите внимание, что скорость движения самих электронов в проводнике под действием электрического поля очень мала — десятые доли миллиметра в секунду. Но как только в проводнике возникает электрическое поле, оно с огромной скоростью, близкой к скорости света в вакууме (300 000 км/с), распространяется по всей длине проводника.

Одновременно с распространением электрического поля все электроны практически мгновенно начинают двигаться в одном направлении по всей замкнутой цепи. Так, например, при замыкании цепи электрической лампы в упорядоченное движение приходят электроны, имеющиеся в проводах электрической цепи и, в частности, в спирали лампы, рис. 51.

Понять это поможет сравнение электрического тока с течением воды в водопроводе, а распространения электрического поля — с распространением давления воды. При подъеме воды в водонапорную башню давление (напор) воды очень быстро распространяется по всей водопроводной системе. Когда мы открываем кран, то вода уже находится под давлением и сразу начинает течь. Но из крана течет та вода, которая была в нем, а вода из башни дойдет до крана много позднее, так как движение воды происходит с меньшей скоростью, чем распространение давления.

Когда говорят о скорости распространения электрического тока в проводнике, то имеют в виду скорость распространения по проводнику электрического поля, а не скорость движения зарядов.

Электрический сигнал, посланный, например, по проводам из Москвы во Владивосток ($s = 8000$ км), приходит туда примерно через 0,03 с.



Вопросы

1. Как объяснить, что в обычных условиях металл электрически нейтрален?
2. Что происходит при возникновении в металле электрического поля?
3. Что представляет собой электрический ток в металле?
4. Какую скорость имеют в виду, когда говорят о скорости распространения электрического тока в проводнике?

§ 35. ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1⁰. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по явлениям, которые его сопровождают. Такие явления называют **действиями тока**.

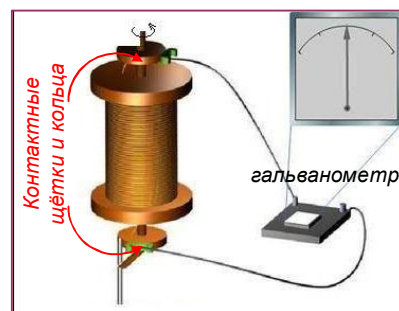


Рис. 63. Опыт Манделъштама-Папалекси (1913) и Толмина-Стюарта (1916).
Удельный заряд электрона
 $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

Некоторые из этих действий легко наблюдать на опыте.

2⁰. Во-первых, **проводник, по которому течет ток, нагревается (тепловое действие тока)**. Это можно наблюдать, например, присоединив к полюсам

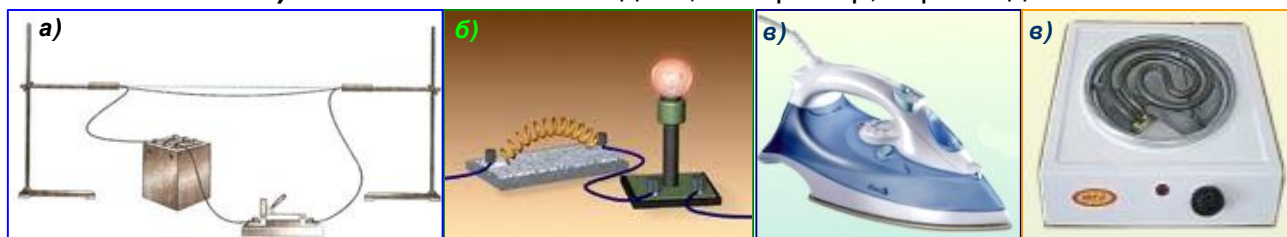


Рис. 64. Тепловое действие тока: при прохождении тока по проводнику он нагревается и, расширяясь, удлиняется (а), (б). Нагревание проводника током используется в лампочке (б), утюге (в), плитке (г).

источника тока железную или никелиновую проволоку (рис. 64). Проволока при этом нагревается и, удлинившись, слегка провисает. Ее даже можно раскалить докрасна. Тепловое действие тока широко используется, в частности, в бытовых приборах. В электрических лампах, например, тонкая вольфрамовая проволочка нагревается током до яркого свечения.

3⁰. Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника, например, выделять его химические составные части (**химическое действие тока**).

При пропускании тока через раствор медного купороса (CuSO_4) на отрицательно заряженном электроде выделится чистая медь (Cu). Это используют для покрытия поверхностей изделий тонким слоем металла, получения чистых металлов. Так осуществляется никелирование, серебрение, золочение и т. п. Такие покрытия предохраняют изделия от коррозии и придают им привлекательный вид, (рис. 65).

Электрический ток может изменять химический состав проводника, например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса).



Рис. 65. Химическое действие тока. а) прохождение тока через раствор CuSO_4 ; б) использование электролиза для покрытия изделий металлом; в) получение чистых металлов

4⁰. В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Это действие тока называется **магнитным**. Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока, в отличие от химического и теплового, является основным. Оно проявляется у всех без исключения проводников.

Магнитное действие тока также легко наблюдать на опыте. Для этого медный провод, покрытый изоляционным материалом, нужно намотать на железный гвоздь, а концы провода соединить с источником тока. Когда цепь замкнута, гвоздь становится **электромагнитом** – намагничивается в результате действия тока и притягивает небольшие железные предметы: гвоздики, железные стружки, опилки. С исчезновением тока в обмотке (при размыкании цепи) гвоздь размагничивается, рис. 66,а.

Большие электромагниты используются на производстве, рис. 66,б. Маленькие электромагниты используются, в различных реле, в электрическом звонке (рис. 67) и т. п.

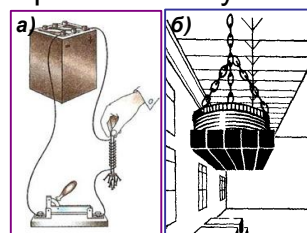
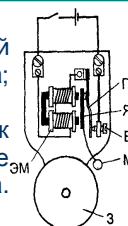


Рис. 66. Магнитное действие тока. Электромагниты а) из гвоздя; б) в цеху завода

Рис. 67. Электромагниты используются в электрическом звонке.

Справа показана схема электрического звонка. На ней обозначены: ЭМ — дугообразный электромагнит; Я — железная пластинка, называемая якорем; М — молоточек; З — звонковая чаша; П — контактная пружина, касающаяся винта В.

При нажатии кнопки цепь звонка замыкается, якорь притягивается к электромагниту, а молоточек ударяет по звонковой чаше. При этом контакт с винтом В нарушается, ток в электромагните прекращается, а пружина П возвращает якорь в прежнее положение. Затем все повторяется снова. Быстро повторяющиеся удары молоточка по чаше З заставляют ее непрерывно звенеть.



Взаимодействие между проводником с током и магнитом иллюстрируется рис. 68.

На рис. 68,а изображена висящая на нитях небольшая рамочка из тонкой медной проволоки. Концы обмотки присоединены к полюсам источника тока. Следовательно, в обмотке существует электрический ток, но рамка висит неподвижно. Если же эту рамку с током поместить между полюсами магнита, то она станет поворачиваться, рис. 68, б.

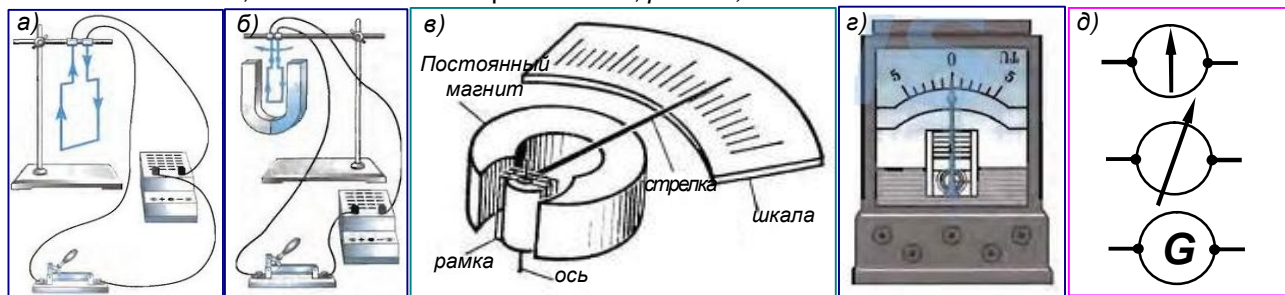


Рис. 68. **Магнитное действие тока.** Проволочная рамка, по которой идёт ток, неподвижна (а). Но если её расположить между полюсами магнита, она повернётся (б). На этом основано устройство многих электрических приборов, в частности, гальванометра. Его устройство (в), внешний вид (г) и обозначения на схемах (д) здесь показаны.

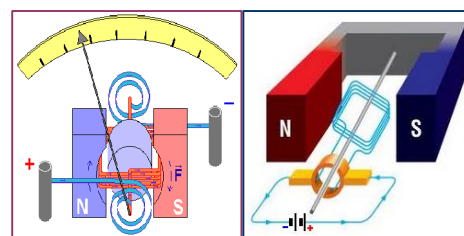
Явление взаимодействия катушки с током и магнита используют в устройстве многих электроизмерительных приборов. Например, в **приборе** для измерения малых токов, называемом **гальванометром**. На рис. 68, в показано его устройство. Стрелка гальванометра связана с подвижной катушкой, находящейся в магнитном поле. Если в катушке существует ток, стрелка отклоняется. Поэтому гальванометр позволяет установить наличие тока в цепи. На рис. 68, г и д показаны внешний вид школьного гальванометра и условное изображение на схемах.

5⁰. Следует заметить, что из всех рассмотренных действий электрического тока, магнитное действие тока наблюдается всегда, какой бы проводник тока ни был — твердый, жидкий или газообразный. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов (к которым относятся кислоты, щелочи и растворимые соли), а нагревание отсутствует у сверхпроводников¹.



Вопросы

1. Как можно наблюдать на опыте тепловое действие тока?
2. Как можно наблюдать на опыте химическое действие тока?
3. Где используют тепловое и химическое действия тока?
4. На каком опыте можно показать магнитное действие тока? Что такое электромагнит? Где используются электромагниты?
5. По рис. 68 расскажите, как на опыте наблюдают взаимодействие рамки с током и магнита.
6. Какое действие тока используют в устройстве гальванометра? Для чего используется гальванометр?
7. Как ещё можно использовать взаимодействие проводников с током и магнита? Что необходимо сделать, чтобы проволочная рамка с током, помещённая между полюсами магнита непрерывно вращалась? Как можно использовать такое устройство?



§36. НАПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1⁰. Мы знаем, что электрический ток есть упорядоченное движение заряженных частиц в проводнике.

¹ Явление сверхпроводимости изучается в старших классах.

В металлических проводниках этими частицами являются **электроны** – частицы, обладающие **отрицательным зарядом**. Но в электролитах (растворах кислот, солей, щелочей) электрический ток обусловлен движением ионов обоих знаков, *рис. 69*. Подробнее – см. Приложения к этой главе.

Например, наблюдая за действиями тока в растворе медного купороса (§ 35, *рис. 65*), можно заметить, что медь всегда осаждается лишь на том из электродов, который соединен с **отрицательным полюсом** источника электрического тока – **катоде**. Это происходит потому, что **положительные ионы** меди Cu^{++} в водном растворе медного купороса CuSO_4 всегда движутся от **положительного электрода** – **анода** к **отрицательному электроду** – **катоде**. Если поменять местами провода, присоединенные к полюсам источника тока, то **катод** и **анод** тоже поменяются местами, а медь станет выделяться на другом электроде, ставшем **катодом**.

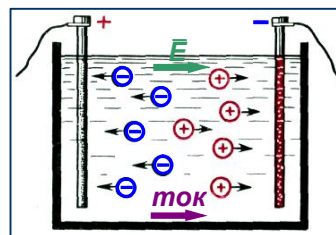


Рис. 69. Ток в электролитах обусловлен движением ионов обоих знаков

Этот опыт показывает, что **электрический ток в проводах имеет определенное направление, от которого зависят и некоторые его действия**.

2⁰. Возникает вопрос: движение каких заряженных частиц в электрическом поле следовало бы принять за **направление тока**?

Так как в большинстве случаев мы имеем дело с электрическим током в металлах, то за направление тока в цепи разумно было бы принять направление движения электронов в электрическом поле, т. е. считать, что ток направлен от отрицательного полюса источника к положительному.

Однако вопрос о направлении тока возник в науке тогда, когда об электронах и ионах еще ничего не было известно. В то время предполагали, что во всех проводниках могут перемещаться как положительные, так и отрицательные электрические заряды.

Электрический ток имеет определенное направление.

По историческим причинам за **направление тока условно приняли то направление, по которому движутся (или могли бы двигаться) в проводнике положительные заряды**, т. е. направление от **положительного полюса источника тока к отрицательному**.

Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

Отсюда следует, что **направление тока совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля E** , *рис. 70*.

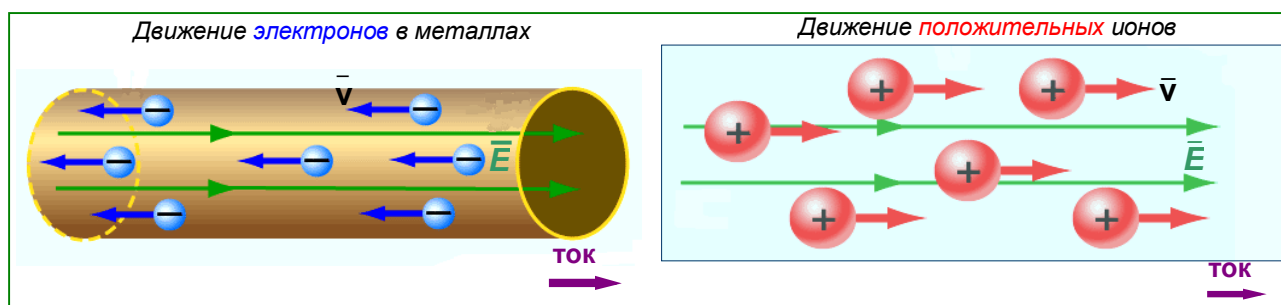


Рис. 70. За направление тока условно принято направление, по которому движутся (или могли бы двигаться) в проводнике положительные заряды. Это направление **от положительного полюса источника тока к отрицательному**: направление тока совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля E .

Это учтено во всех правилах и законах электрического тока.



Вопросы

1. Движение каких заряженных частиц представляет собой электрический ток в металлах? В электролитах?
2. Направление движения каких заряженных частиц принято за направление тока в проводнике?
3. От какого полюса источника тока и к какому принято считать направление тока?

§ 37. СИЛА ТОКА. ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ТОКА И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

1⁰. Действия электрического тока, которые были описаны в § 35, могут проявляться в разной степени – слабее или сильнее. опыты показывают, что интенсивность (степень действия) электрического тока зависит от *величины заряда, проходящего по цепи в единицу времени*.

Когда заряженная частица (электрон в металле или ион в растворе электролита) движется по электрической цепи, то вместе с ней происходит и перемещение заряда. Чем больше суммарный заряд, перенесенный частицами в единицу времени через поперечное сечение проводника, тем больше **сила тока**.

Пользуясь выражениями «сила тока», «сильный ток», «слабый ток», мы должны правильно представлять себе, что они означают.

Выражение «сильный ток» означает, что по цепи (через поперечное сечение проводника S) в *единицу времени* протекает большой электрический заряд. Выражение «слабый ток» означает, что протекающий по цепи в *единицу времени* заряд мал.

От силы тока зависит интенсивность различных действий тока. **Чем больше сила тока в цепи, тем интенсивнее его действия**: сильнее нагревается проводник, большая масса вещества отлагается на электродах при химическом действии тока, сильнее магнитные и механические действия тока.

2⁰. Итак, если в проводнике существует электрический ток, это означает, что через поперечное сечение проводника S переносится электрический заряд, *рис. 71*. Заряд, переносимый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**.

Сила тока равна отношению заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому промежутку времени

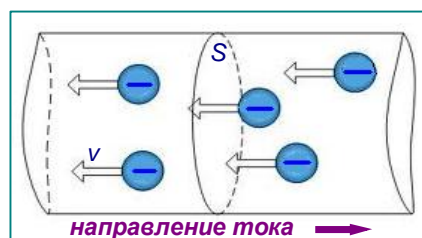
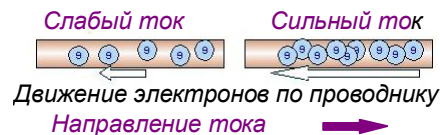
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad [18]$$

Если сила тока со временем не меняется, то ток называют постоянным. В этом случае формулу [18] обычно пишут так:

$$I = \frac{q}{t}, \quad [18]^*$$

где q – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время t .

3⁰. **Единица силы тока**. На Международной конференции по мерам и весам в 1948 г. было решено в основу определения единицы силы тока положить явление взаимодействия двух проводников с током. Ознакомимся с этим явлением на опыте.



*Рис. 71. Чем больше электронов успеет пройти через поперечное сечение проводника в 1 с, тем больше **сила тока I***

На рис. 72 изображены два гибких прямых проводника, расположенных параллельно друг другу. Если оба проводника подсоединить к источнику тока, то при замыкании цепи по ним потечёт ток. Это приведёт к их взаимодействию: они притягиваются (а) или отталкиваются (б), в зависимости от направления токов в них.

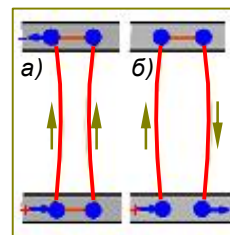


Рис. 72. Так взаимодействуют проводники с током

Силу взаимодействия проводников с током можно измерить. Эта сила, как показывают расчеты и опыты, зависит от длины проводников, расстояния между ними, среды, в которой находятся проводники, и, что самое важное для нас, от силы тока в проводниках. Если одинаковы все условия, кроме силы токов, то, чем больше сила тока в каждом проводнике, тем с большей силой они взаимодействуют между собой.

4⁰. Представим теперь себе, что взяты очень тонкие и бесконечно длинные параллельные проводники. Расстояние между ними 1 м, и находятся они в вакууме, рис. 73. Сила тока в них одинакова.

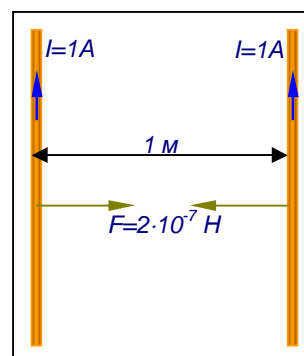


Рис. 73. За единицу силы тока принимают силу тока, при которой отрезки параллельных проводников длиной 1 м взаимодействуют с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н

За единицу силы тока принимают силу тока, при которой отрезки параллельных проводников длиной 1 м взаимодействуют с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н (0,000 000 2 Н).



Ампер Андре Мари (1775-1836) французский физик и математик. Он создал первую теорию, которая выражала связь электрических и магнитных явлений. Амперу принадлежит гипотеза о природе магнетизма, он ввел в физику понятие «электрический ток».

Эту единицу силы тока называют **ампером (А)**. Так она названа в честь французского ученого **Андре Ампера**.

Применяют также дольные и кратные единицы силы тока: миллиампер (мА), микроампер (мкА), килоампер (кА).

$$\begin{aligned} 1 \text{ мА} &= 0,001 \text{ А}; \\ 1 \text{ мкА} &= 0,000001 \text{ А}; \\ 1 \text{ кА} &= 1000 \text{ А}. \end{aligned}$$

Чтобы представить себе, что такое ампер, приведем примеры: сила тока в спирали лампы карманного фонаря 0,25 А = 250 мА. В осветительных лампах, используемых в наших квартирах, сила тока составляет от ≈ 25 до 400 мА (в зависимости от мощности лампы).

5⁰. Из формулы [18] следует, что величину электрического заряда (количество электричества), проходящего через поперечное сечение проводника можно подсчитать так:

$$q = It. \quad [18]**$$

Полагая $I = 1 \text{ А}$, $t = 1 \text{ с}$, получим единицу электрического заряда, упомянутую в главе 4 и названную (в честь Шарля Кулона) **1 кулон — 1 Кл**:

Кулон — это величина заряда, прошедшая через проводник при силе тока 1 А за время 1 с.

При силе тока 1 А в 1 с через поперечное сечение проводника проходит $6 \cdot 10^{18}$ электронов.

Из формулы $q=It$ следует, что количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника (величина заряда q), зависит от силы тока и времени его прохождения. Например, в лампе, в которой сила тока равна 400 мА, через поперечное сечение спирали за 1 мин проходит электрический заряд, равный $0,4 \text{ А} \cdot 60 \text{ с} = 24 \text{ Кл}$.



Вопросы

1. От чего зависит интенсивность действий электрического тока?
2. Какой величиной определяется сила тока в электрической цепи?

3. Как выражается сила тока через электрический заряд и время?
4. Что принимают за единицу силы тока? Как называется эта единица?
5. Какие дольные и кратные амперу единицы силы тока вы знаете?
6. Как выражается электрический заряд (количество электричества) через силу тока в проводнике и время его прохождения?



Упражнение

1. Выразите в амперах силу тока, равную 2000 мА; 100 мА; 55 мА; 3 кА.
2. Сила тока в цепи электрической плитки равна 1,4 А. Какой электрический заряд проходит через поперечное сечение ее спирали за 10 мин?
3. Сила тока в цепи электрической лампы равна 0,3 А. Сколько электронов проходит через поперечное сечение спирали за 5 мин?

§ 38. АМПЕРМЕТР. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

1⁰. Силу тока в цепи измеряют прибором, называемым **амперметром**.

Амперметр — это тот же гальванометр, только приспособленный для измерения силы тока, его шкала проградуирована в *амперах (килоамперах, миллиамперах или микроамперах)*. На шкале амперметра обычно ставят букву **А**. На схемах его изображают кружком с буквой **А** (рис. 74).



Рис. 74. Приборы для измерения силы тока. Амперметры а) школьные; б) лабораторные; в) цифровой монтажный; г) цифровой; д) миллиамперметр; е) обозначения на схемах.

2⁰. При включении в цепь амперметр, как всякий измерительный прибор, не должен влиять на измеряемую величину. Поэтому он устроен так, что при включении его в цепь сила тока в ней почти не изменяется. Амперметр, используемый в школе для демонстрационных опытов, изображен на рис. 74, а, для лабораторных работ — на рис. 74, б. На практике используются амперметры разного типа и с разной ценой деления, в зависимости от назначения. По шкале амперметра видно, на какую наибольшую силу тока он рассчитан. Превышать эту силу тока нельзя, так как прибор может испортиться.

3⁰. При измерении силы тока **амперметр включают в цепь последовательно с тем прибором, силу тока в котором измеряют, рис. 75.**

Включают амперметр в цепь с помощью двух клемм, или зажимов, имеющих на приборе. У одной из клемм амперметра стоит знак «+», у другой — «-» (иногда знака «-» нет). Клемму со знаком «+» нужно обязательно соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

В цепи, состоящей из источника тока и ряда проводников, соединенных так, что конец одного проводника соединяется с началом другого (такое соединение называется последовательным), сила тока

во всех участках одинакова. Это следует из того, что заряд, проходящий через любое поперечное сечение проводников цепи в 1 с, одинаков. Когда в цепи существует ток, то заряд нигде в проводниках цепи не накапливается, подобно тому, как нигде в отдельных частях трубы не собирается вода, когда она течет по трубе.

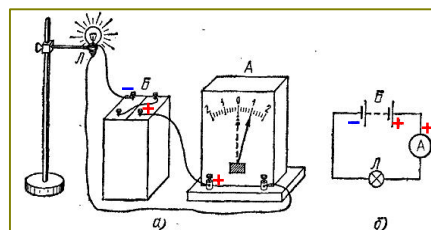


Рис. 75. Цепь с батареей (Б) лампочкой (Л) и амперметром (А); а) внешний вид; б) схема

Поэтому при измерении силы тока амперметр можно включать в любое место цепи, состоящей из ряда последовательно соединенных проводников, так как сила тока во всех точках цепи одинакова. Если включить один амперметр в цепь до лампы (как на рис. 75 или 76, а), другой после нее (рис. 76, б), то оба они покажут одинаковую силу тока.

можно включать в любое место

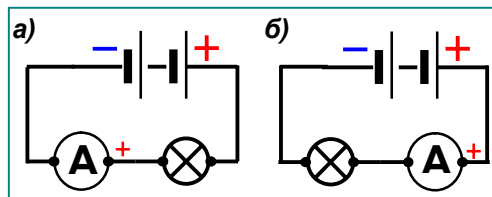


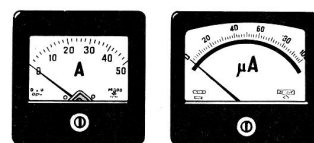
Рис. 76. Различные схемы включения в цепь амперметра

4⁰. Сила тока — очень важная характеристика электрической цепи. Работающим с электрическими цепями надо знать, что для человеческого организма безопасной считается сила тока до 1 мА. Сила тока больше 100 мА приводит к серьезным поражениям организма.



Вопросы

1. Как называют прибор для измерения силы тока?
2. В каких единицах градуируют шкалу амперметра? Миллиамперметра?
3. Как включают амперметр в цепь?



Упражнение

1. При включении в цепь амперметра так, как показано на рис. 75, сила тока была 0,5 А. Каковы будут показания амперметра при включении его в ту же цепь так, как изображено на рис. 76?
2. Как можно проверить правильность показаний амперметра с помощью другого амперметра, точность показаний которого проверена?
3. Рассмотрите амперметры, данные на рис. 74 б), д). Определите цену деления шкалы каждого амперметра. Какую наибольшую силу тока могут они измерять? Перерисуйте шкалу амперметра с рис. 74 б) в тетрадь и покажите, каково будет положение стрелки при силе тока 0,3 А и 1,5 А.
4. Имеется точный амперметр. Как, пользуясь им, нанести шкалу на другой, еще не проградуированный амперметр?

Для воспроизведения эталонного тока в 1 а применяют **ТОКОВЫЕ ВЕСЫ** (ампер-весы), рис. 77. Ток пропускают через две катушки: одна из них неподвижна, а другая прикреплена к коромыслу точных аналитических весов. Подвижная катушка может втягиваться внутрь неподвижной, когда через них пропущен ток. Силу втягивания можно очень точно измерить, уравновесив ее весом гирь на другом плече коромысла весов. Взаимодействием катушек с током можно определить ампер так же точно, как определены эталоны длины, массы и времени.

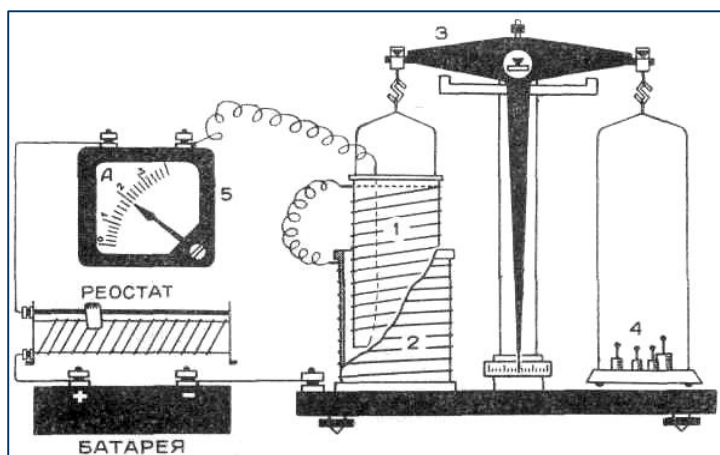


Рис. 77. Токковые весы. По обмоткам двух катушек (1 и 2), вставленных друг в друга, течет ток. Катушка 1 подвешена к коромыслу весов 3. Силу, втягивающую катушку 1 в катушку 2, уравновешивают весом гирь 4. Токowymi весами градуируют амперметр 6, которым затем будут измерять силу тока в любых других электрических цепях

§ 39. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

1⁰. Мы знаем, что электрический ток — это упорядоченное движение заряженных частиц, которое создается электрическим полем. Поле при этом совершает работу.

Работу сил электрического поля, создающего электрический ток, называют работой тока.

В процессе такой работы энергия электрического поля превращается в другой вид энергии — механическую, внутреннюю и др.

2⁰. От чего же зависит работа тока? Можно утверждать, что она зависит от *силы тока*, т. е. от электрического заряда — количества электричества, протекающего по цепи в 1 с. В этом мы убедились, знакомясь с различными действиями тока (см. § 35). Например, пропуская ток по железной или никелиновой проволоке, мы видели, что чем больше была сила тока, тем выше становилась температура проволоки, т. е. сильнее было тепловое действие тока.

Кроме того, в § 28,а была введена очень важная величина — *электрическое напряжение* или просто *напряжение U*, равная разности потенциалов между двумя точками поля в соответствии с формулой:

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) = A/q. \quad [9]^*$$

Отсюда видно, что **напряжение между двумя точками поля равно работе поля при перемещении единичного положительного заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда.** Таким образом, **напряжение между двумя точками определяет энергию электрического поля, которая может совершить работу**, перемещая заряды (например, через электродвигатель).

Напряжение — это энергетическая характеристика электрического поля.

Если правую часть уравнения $A=qU$ [8] разделить и умножить на время t , его можно записать так:

$$A = (q/t)Ut.$$

А учитывая, что $(q/t)=I$, так:

$$A = IUt. \quad [19]$$

С другой стороны, работа равна произведению мощности на время:

Работа = мощность × время

или

$$A = IUt = Pt. \quad [20]$$

Откуда:

$$P = IU, \quad [21]$$

где мощность обозначена уже знакомой буквой P :

Мощность = сила тока × напряжение.

За единицу мощности, как известно, принят 1 Вт=1 Дж/с. из последней формулы следует, что

$$1 \text{ ватт} = 1 \text{ вольт} \times 1 \text{ ампер}, \text{ или } 1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \times 1 \text{ А}$$

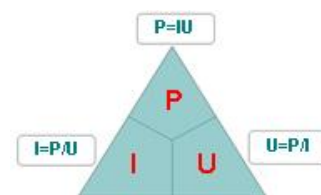
Из формулы [21] следует, что

$$U = P/I \text{ и } I = P/U. \quad [21]^*$$

3⁰. Мы получили очень важные формулы. Рассмотрим простейшие примеры их применения.

На *рис. 78,а* изображена электрическая цепь, в которую включена лампа, используемая для освещения помещений. Источником тока в этой цепи является городская осветительная сеть с напряжением $U=220\text{В}$.

На *рис. 78,б* изображена другая цепь, в которую включена лампочка от карманного фонарика. Источником тока здесь служит батарейка с напряжением $U=4.5\text{В}$.



Амперметры, включенные в указанные цепи, показывают одинаковую силу тока ($I=1,5A$) в обеих цепях. Однако лампа, включенная в городскую сеть, дает гораздо больше света и тепла, чем лампочка от карманного фонаря. Объясняется это тем, что при одинаковой силе тока, потребляемая мощность отличается очень сильно.

Мощность можно подсчитать по формуле [21].

В случае а):

$$P=1,5 A \times 220 V= 330 \text{ Вт.}$$

В случае б):

$$P=1,5 A \times 4,5 V= 6,75 \text{ Вт.}$$

4⁰. Электрический ток подобен течению воды в реках и водопадах, т. е. перетеканию воды с более высокого уровня на более низкий уровень. Здесь электрический заряд (количество электричества) соответствует массе воды ($q \rightarrow m$), протекающей через сечение реки, а напряжение U — разности уровней Δh , напору воды в реке. Работа, которую совершает вода, падая, например, с плотины, зависит от массы воды и высоты ее падения. Работа тока зависит от электрического заряда, протекающего через сечение проводника, и от напряжения на этом участке проводника. Чем больше разность уровней воды, тем большую работу совершает вода при своем падении; чем больше напряжение на участке цепи, тем больше работа тока. В озерах и прудах уровень воды всюду одинаков, и там вода не течет; если в электрической цепи нет напряжения, то в ней нет и электрического тока.

Если два озера не сообщаются между собой, но уровни их различны, ток воды между ними тоже невозможен.

Подобным образом разность уровней Δh верхнего и нижнего бьефа гидроэлектростанции определяет ту работу, которую может совершать гравитационное поле, перемещая воду ($G > 0$). Вода может вращать гидротурбину, рис. 79, а. Однако, если перекрыть задвижки на плотине — разорвать гидравлическую цепь, ток воды прекратится ($G=0$) и работа совершаться не будет, хотя разность уровней Δh (напряжение) сохранится, рис. 79, б.

Таким образом, чтобы в гидравлической цепи совершалась работа необходимо располагать разностью уровней Δh и током воды G , для чего цепь должна быть замкнутой — задвижки должны быть открыты.

Напомним, что в данном случае ток воды $G=m/t$ (аналог электрического тока), а $g\Delta h$ — разность потенциалов гравитационного поля (аналог электрического напряжения). Величина работы, совершаемой током воды в единицу времени (мощность), будет равна:

$$P=g\Delta hG=g\Delta h m/t.$$

Здесь m — масса воды; t — время, g — ускорение силы тяжести.

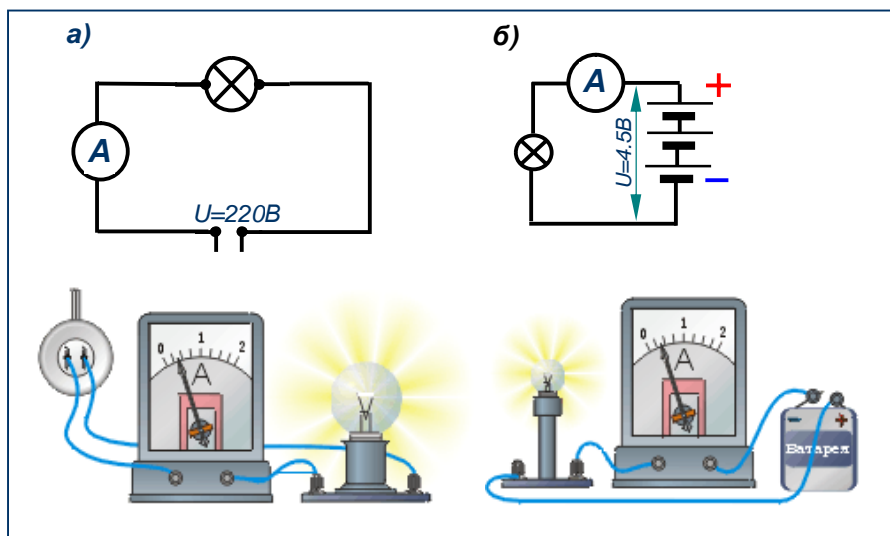


Рис. 78. Две электрических цепи: а) с лампой, подключённой к городской сети и б) с лампочкой, подключённой к батарейке от карманного фонарика. Сила тока в обеих цепях одинакова, но в случае (а) больше света и тепла.

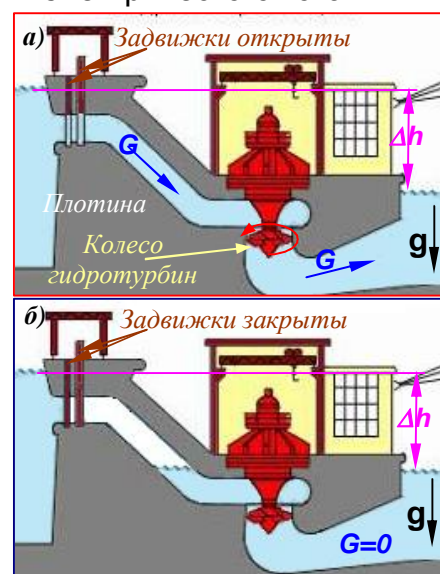


Рис. 79. Гидравлическая сеть из гидротурбины и входных задвижек между верхним и нижним бьефами.

Аналогичные процессы происходят в электрической цепи, но роль массы воды m играет величина электрического заряда q , ускорения силы тяжести g – напряжённость электрического поля E , а разность потенциалов гравитационного поля $g\Delta h$ – электрическое напряжение U .

Отмеченная электрогидравлическая аналогия является ещё одним примером единства природы, неизменности, общности (симметрии) внешне различных явлений.



Вопросы

1. Опишите опыт, который доказывает, что работа тока зависит не только от силы тока, но и от напряжения.
2. Что такое электрическое напряжение? Как можно определить его через работу тока и электрический заряд?
3. Что можно сказать об условии существования электрического тока в цепи?

§ 40. ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕНИЯ

1⁰. Единицы измерения напряжения устанавливают, исходя из формулы

$$U=A/q, \quad [9]^*$$

определяющей эту величину.

Единица напряжения названа **вольт** (**В**) в честь итальянского ученого Алессандро Вольта, создавшего первый гальванический элемент:

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж / Кл}$$

Кроме вольта применяют дольные и кратные ему единицы: милливольт (мВ) и киловольт (кВ).

$$1 \text{ мВ} = 0,001 \text{ В};$$

$$1 \text{ кВ} = 1000 \text{ В}.$$

2⁰. В таблице приведены встречающиеся на практике напряжения,



Вольта Алессандро (1745-1827)- итальянский физик, один из основателей учения об электрическом токе. Вольта создал первый гальванический элемент, чем положил начало учению об электрическом токе.

Напряжение на полюсах элемента Вольта	1,1
» сухого элемента	1,5
» щелочного аккумулятора (одного элемента)	1,25
» кислотного аккумулятора (одного элемента)	2
Напряжение в осветительной сети	127 и 220
Напряжение в линии электропередачи Волжская ГЭС - Москва	500 000
Напряжение между облаками во время грозы	До 100 000 000

в **вольтах**.

В отличие от тока напряжение не называют *сильным* или *слабым*; его называют *высоким* или *низким*.

Высокое напряжение опасно для жизни. Допустим, что напряжение между одним проводом высоковольтной линии передачи и землей 100 000 В. Если этот провод соединить каким-нибудь проводником с землей, то при силе тока 1 А мощность будет равна 100 000 Вт. Такую мощность, например, развивает при падении с высоты 10 м груз массой 1000 кг. Он может произвести большие разрушения. Этот пример показывает, почему так опасен ток высокого напряжения.

Но осторожность надо соблюдать и в работе с более низкими напряжениями, даже напряжение в несколько десятков вольт может оказаться опасным.

Для работы в сыром помещении безопасным считают напряжение до 12 В, в сухом помещении до 36 В.



Вопросы

1. Что принимают за единицу напряжения?

2. Какое напряжение используют в осветительной сети?
3. Чему равно напряжение на полюсах сухого элемента и кислотного аккумулятора?
4. Какие единицы напряжения, кроме вольта, применяют на практике?

§ 41. ВОЛЬТМЕТР. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

1⁰. Для измерения напряжения на полюсах источника тока или на каком-нибудь участке цепи применяют прибор, называемый **вольтметром**.

Вольтметр, используемый в школьных опытах, показан на *рис.80*. Однако конструкции этих приборов очень разнообразны, *рис. 81*.

Многие вольтметры по внешнему виду похожи на амперметры. Для отличия вольтметра от других электроизмерительных приборов на его шкале ставят букву **V**.



Рис. 80. Школьный демонстрационный вольтметр

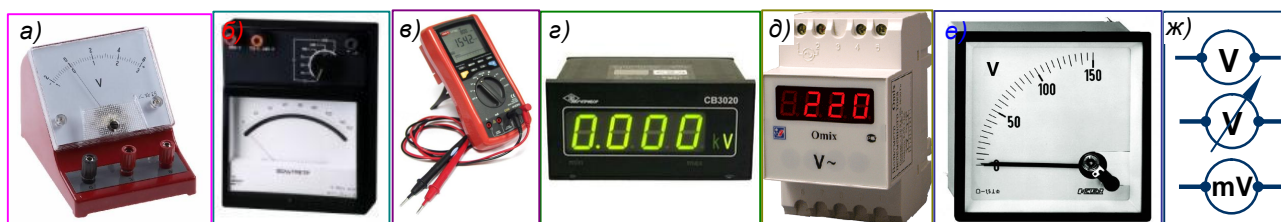


Рис. 81. Приборы для измерения напряжения. Вольтметры а) школьные; б) лабораторные; в) цифровой монтажный; г) цифровой; д) щитовой цифровой; е) щитовой стрелочный; ж) обозначения на схемах.

Как и у амперметра, у одного зажима вольтметра ставят знак «+». Этот зажим необходимо обязательно соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока. Иначе стрелка прибора будет отклоняться в обратную сторону.

Вольтметр включается иначе, чем амперметр. На *рис. 82* изображена электрическая цепь, в которую включена лампа, ключ, амперметр и вольтметр. Амперметром в этой цепи измеряют силу тока в лампе, для этого он включен в цепь последовательно с ней. Вольтметр должен показывать напряжение, существующее на зажимах лампы. Поэтому его включают в цепь не последовательно с лампой, а так, как показано на *рис. 82*.

Зажимы вольтметра присоединяют к тем точкам цепи, между которыми надо измерить напряжение.

Такое включение прибора называют **параллельным**. Параллельное соединение проводников будет рассмотрено ниже. Отметим только, что в отличие от амперметра вольтметр устроен так, что сила тока, проходящего через него, мала по сравнению с силой тока в цепи, поэтому вольтметр почти не изменяет напряжение между теми точками, к которым его подключают.

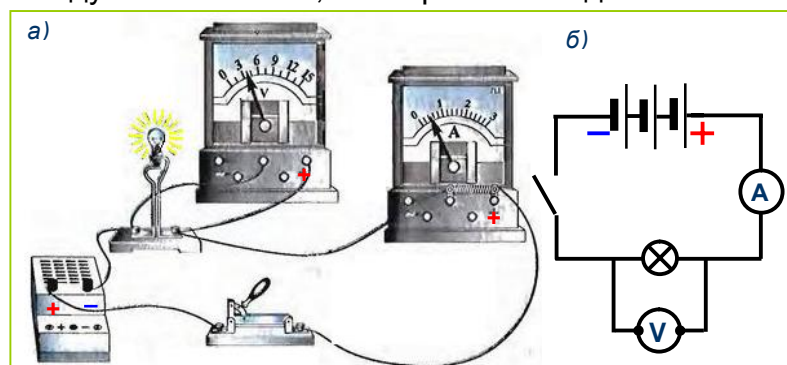


Рис. 82. Цепь, состоящая из батареи, лампы, ключа, амперметра и вольтметра. а) внешний вид; б) схема. Амперметр включён последовательно с лампой, вольтметр – параллельно.

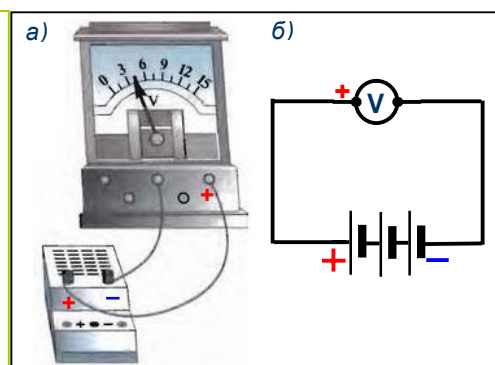
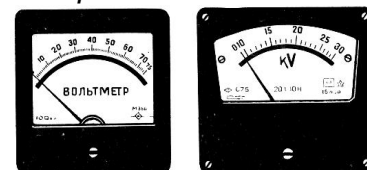


Рис. 83. Цепь, состоящая из батареи, и вольтметра. Вольтметр измеряет напряжению на полюсах батареи.

Для измерения напряжения на полюсах источника тока вольтметр подключают непосредственно к зажимам источника тока, так, как показано на *рис. 83*.



Вопросы



1. Как называют прибор для измерения напряжения?
2. Как включают вольтметр для измерения напряжения на участке цепи?
3. Как с помощью вольтметра измерить напряжение на полюсах источника тока?



Упражнение

1. Рассмотрите шкалу вольтметра (*рис. 80*). Определите цену деления. Перечертите в тетрадь его шкалу и нарисуйте положение стрелки для напряжений 4,5 В; 7,5 В; 10,5 В.
2. Определите цену деления вольтметра, изображенного на *рис. 83*. Какое напряжение он показывает?
3. Начертите схему цепи, состоящую из аккумулятора, лампы, ключа, амперметра и вольтметра для случая, когда вольтметром измеряют напряжение на полюсах источника тока.

§ 42. ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТОКА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

1⁰. Различные действия тока, такие, как нагревание проводника, магнитные и химические действия, зависят от силы тока. Изменяя силу тока в цепи, можно регулировать эти действия. Но чтобы управлять током в цепи, надо знать, от чего зависит сила тока в ней.

Мы знаем, что электрический ток в цепи – это упорядоченное движение заряженных частиц в электрическом поле. Чем сильнее действие электрического поля на эти частицы, тем, очевидно, и больше сила тока в цепи.

Но действие поля характеризуется физической величиной – напряжением (§ 39). Поэтому можно предположить, что **сила тока зависит от напряжения**. Эту зависимость можно установить на опыте.

2⁰. На *рис. 84, а* изображена электрическая цепь, состоящая из источника тока – аккумулятора, амперметра, спирали из никелиновой проволоки, ключа и параллельно присоединенного к спирали вольтметра. На *рис. 84, б* показана схема этой цепи (прямоугольником условно обозначен проводник).

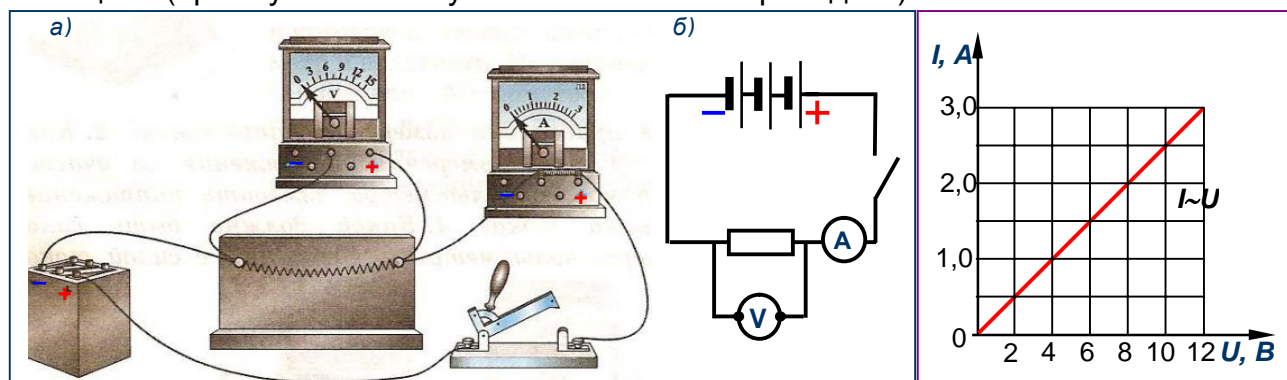


Рис. 84. Цепь с аккумулятором, амперметром, спиралью из никелиновой проволоки, ключом и параллельно спирали включённым вольтметром.

Рис. 85. Зависимость силы тока от напряжения.

Замыкают цепь и отмечают показания приборов. Затем присоединяют к первому аккумулятору второй такой же аккумулятор и снова замыкают цепь. Напряжение на спирали при этом увеличится вдвое, и амперметр покажет вдвое большую силу тока.

При трех аккумуляторах напряжение на спирали увеличивается втрое, во столько же раз увеличивается сила тока.

Таким образом, опыт показывает, что, во сколько раз увеличивается напряжение,

сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на концах проводника: $I \sim U$.

приложенное к одному и тому же проводнику, во столько же раз увеличивается сила тока в нем. Другими словами,

На рис. 85 показан график зависимости силы тока в проводнике от напряжения между его концами. На этом графике в условно выбранном масштабе отложены по горизонтальной оси напряжение в вольтах, а по вертикальной – сила тока в амперах.

3⁰. К этому выводу можно придти и теоретически, если вспомнить, что для существования тока в проводнике необходимо создать напряжённость электрического поля – разность потенциалов на концах проводника. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике (см. формулу [10]) и, следовательно, тем большую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно формуле [18]* это означает увеличение силы тока.

сила тока в проводнике увеличивается с увеличением напряжения на его концах.

Таким образом,

4⁰. Для каждого проводника существует определенная зависимость силы тока I от приложенной разности потенциалов на концах проводника U . Она называется **вольт-амперной характеристикой проводника**. Ее находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения, как это мы и делали при построении графика на рис. 85. У нас получилась прямая линия, исходящая из начала координат, т. е. $I \sim U$. Такой вид она имеет для металлических проводников и электролитов. Этими случаями мы пока и ограничимся.

В дальнейшем вы узнаете, что эта зависимость может быть более сложной. Знание вольт-амперной характеристики необходимо для проектирования различных приборов.



Вопросы

1. Как зависит сила тока в проводнике от напряжения на концах проводника?
2. Как на опыте показать зависимость силы тока от напряжения?
3. Какой вид имеет график зависимости силы тока от напряжения? Какую зависимость между величинами он отражает?



Упражнение

1. При напряжении на концах участка цепи, равном 2 В, сила тока в проводнике 0,4 А. Каким должно быть напряжение, чтобы в том же проводнике сила тока была 0,8 А?

2. При напряжении на концах проводника 2 В сила тока в проводнике 0,5 А. Какой будет сила тока в проводнике, если напряжение на его концах увеличится до 4 В? если напряжение на его концах уменьшится до 1 В?

§ 43. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. ЕДИНИЦЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

1⁰. Включая в электрическую цепь какого-нибудь источника тока различные проводники и амперметр, можно заметить, что при разных проводниках показания амперметра различны, т. е. при разных проводниках сила тока в данной цепи различна. Так, например, если вместо *железной* проволоки АВ (рис. 86) включить в

цепь такой же длины и сечения *никелиновую* проволоку *CD*, то сила тока в цепи уменьшится, а если включить *медную EF*, то сила тока значительно увеличится.

Вольтметр, поочередно подключаемый к концам этих проводников, показывает одинаковое напряжение. Значит, сила тока в цепи зависит не только от напряжения, но и от *свойств проводников*, включенных в цепь. Зависимость силы тока от свойств проводника объясняется тем, что разные проводники обладают различным **электрическим сопротивлением**.

В чем причина сопротивления? Если бы электроны в проводнике не испытывали никаких помех в своем движении, то они, будучи приведены в упорядоченное движение, двигались бы по инерции неограниченно долго. В действительности электроны взаимодействуют с ионами кристаллической решетки металла. При этом замедляется упорядоченное движение электронов и сквозь поперечное сечение проводника проходит за 1 с меньше их число. Соответственно уменьшается и скорость движения зарядов – уменьшается сила тока. Таким образом, причиной сопротивления является взаимодействие движущихся электронов с ионами кристаллической решетки.

Разные металлические проводники обладают различным сопротивлением из-за различия в строении их кристаллической решетки, а также из-за разной длины и площади поперечного сечения. Сопротивление проводника представляет собой как бы меру противодействия проводника направленному движению электрических зарядов.

Сопротивление – основная электрическая характеристика проводника.

От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении.

Физическая величина, характеризующая противодействие, оказываемое проводником электрическому току, называется электрическим сопротивлением (или просто сопротивлением) проводника. Она обозначается буквой *R*: *R* – сопротивление.

2⁰. За единицу сопротивления принимают ом (1 Ом) в честь немецкого физика Георга Симона Ома.

1 Ом — это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении на концах 1 вольт сила тока равна 1 амперу. Кратко это записывают так:

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/1 А.}$$

Применяют и другие единицы сопротивления: миллиом (мОм), килоом (кОм), мегаом (МОм).

$$1 \text{ мОм} = 0,001 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом.}$$

3⁰. Электрические сопротивления измеряются **омметром**, рис. 87. Действие

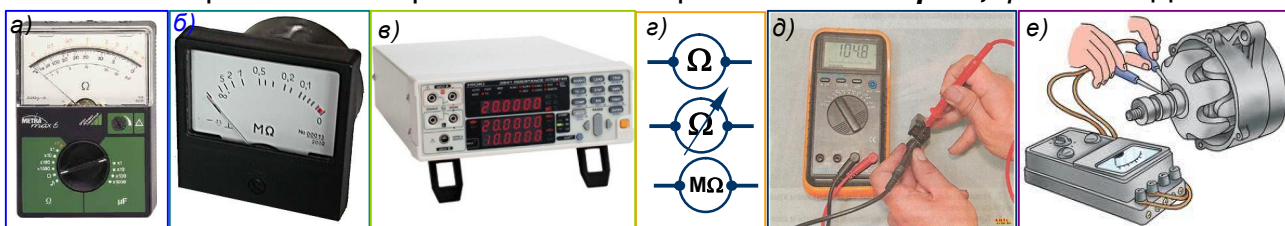


Рис.87. Приборы для измерения электрических сопротивлений – омметры: а) монтажный; б) щитовой; в) цифровой с широким диапазоном измерений сопротивлений; г) обозначения омметров на схемах; д) измерение сопротивления; е) проверка надёжности изоляции с помощью омметра.

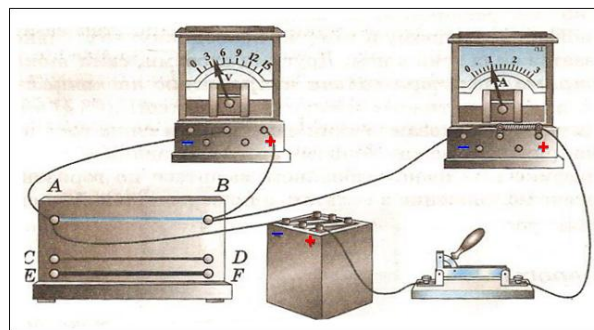


Рис. 86. При включении разных проводников сила тока в цепи различна.

омметра основано на измерении силы тока, протекающего через измеряемое сопротивление при постоянном напряжении источника питания.

4⁰. Иногда удобнее пользоваться величиной, обратной сопротивлению. Эту величину называют **электропроводностью**. Она характеризует способность проводника *проводить* электрический ток и обозначается буквой λ . Взаимосвязь R и λ выражается так:

$$\lambda = 1/R, [22]$$

Единица электропроводности называется сименсом (См). 1 См равен 1/1 Ом.



Вопросы

1. Как на опыте показать, что сила тока в цепи зависит от свойств проводника?
2. Что принимают за единицу сопротивления проводника? Как ее называют?
3. Какие единицы сопротивления, кроме Ома, используют?



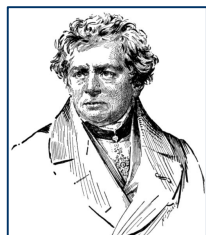
Упражнение

Сила тока в спирали электрической лампы 0,5 А при напряжении на ее концах 1 В. Определите сопротивление спирали.



§ 44. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

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



Ом Георг Симон (1787-1854) – немецкий физик, открывший закон связи между силой тока в цепи, напряжением и сопротивлением. Этот закон стал основой электротехники постоянных токов. Ом работал школьным учителем. Чувствительный прибор для измерения силы тока он изготовил сам. В качестве источника напряжения Ом использовал термоду: два спаянных вместе проводника из различных металлов. Увеличивая разность температур спаев, Ом менял напряжение, которое пропорционально этой разности температур. Кроме того, Ом нашел зависимость сопротивления проводника от длины и площади его поперечного сечения.

1⁰. В предыдущих параграфах были рассмотрены три величины, с которыми мы имеем дело во всякой электрической цепи, – это **сила тока I , напряжение U и сопротивление R** . Эти величины связаны между собой. Зависимость силы тока от напряжения мы установили в § 42. Там было показано, что *сила тока I в проводнике увеличивается с увеличением напряжения U (разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U$) на концах проводника*.

В описанных опытах (рис. 84) сопротивление проводника (участка цепи) не менялось, а менялось только напряжение на его концах. Поэтому можно сказать, что **сила тока в цепи прямо пропорциональна напряжению на концах проводника ($I \sim U$), если сопротивление проводника во время опыта не меняется ($R=const$)**, рис. 85.

2⁰. Теперь исследуем, как *меняется сила тока I с изменением величины сопротивления R при неизменном напряжении $U=const$* .

Обратимся к опыту. На рис. 88 изображен внешний вид электрической цепи для такого исследования, включающий участок цепи 1-2 (см. рис. 89) в виде сменного сопротивления R , источник тока (аккумулятор) и ключ для его включения и отключения.

В эту цепь на участке 1-2 по очереди включают различные сопротивления R . Напряжение на концах 1-2 во время опыта поддерживается постоянным $U=2 В =const$. За этим следят по показаниям вольтметра. Силу тока I в цепи измеряют амперметром.

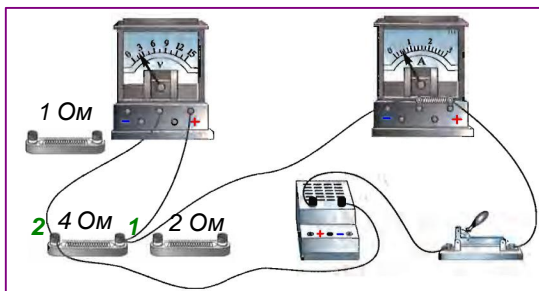


Рис. 88. Внешний вид собранной цепи для исследования зависимости силы тока от величины сопротивления 1-2

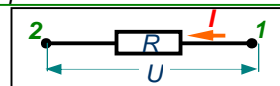


Рис. 89. Участок цепи 1-2, состоящий из проволочного сопротивления R .

В таблице приведены результаты выполненных опытов с тремя различными сопротивлениями R :

№ опыта	Напряжение U на участке 1-2, В	Сопротивление R проводника, Ом	Сила тока I в цепи, А
1	2	1	2
2	2	2	1
3	2	4	0,5

В первом опыте сопротивление $R=1$ Ом и сила тока в цепи $I = 2$ А. Второе сопротивление $R=2$ Ом, т. е. в два раза больше, а сила тока в два раза меньше. И наконец, в третьем случае сопротивление цепи увеличилось в четыре раза и во столько же раз уменьшилась сила тока. Напряжение во всех трех опытах было одинаковое, равное $U = 2$ В.

3⁰. На рис. 90 изображен график зависимости силы тока от сопротивления проводника при одном и том же напряжении на его концах. По горизонтальной оси отложены значения сопротивления R , в омах. По вертикальной оси – сила тока I в амперах.

Обобщая результаты опытов, приходим к выводу, что **при одинаковом напряжении на концах проводника сила тока обратно пропорциональна сопротивлению проводника.**

Зависимость силы тока от напряжения на концах участка цепи и сопротивления этого участка называется **законом Ома** по имени немецкого ученого Ома, открывшего этот закон в 1827 г. Закон Ома читается так: **сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:**

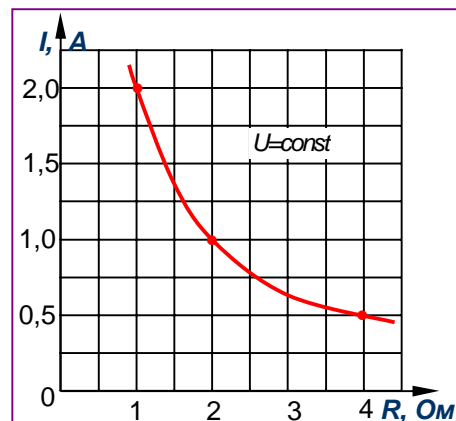


Рис. 90. Зависимость силы тока I от сопротивления R при $U=const$

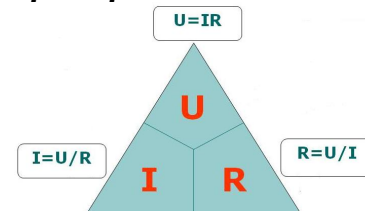
$$I = U/R. \quad [23]$$

Откуда:

$$U = I \cdot R. \quad [23]^*$$

и

$$R = U/I. \quad [23]**$$



Таким образом, зная две величины из трёх (U , R , I) для рассматриваемого участка цепи, всегда можно вычислить третью.

Закон Ома – основной закон электротехники.

Закон Ома внес такую ясность в правила расчета токов и напряжений в электрических цепях, что американский ученый Дж. Генри, узнав об открытиях Ома, не удержался от восклицания: «Когда я первый раз прочел теорию Ома, то она мне показалась молнией, вдруг осветившей комнату, погруженную во мрак».



Вопросы

1. Какие три величины связывает закон Ома?
2. Пользуясь рис. 88, расскажите, как при помощи опыта устанавливают зависимость силы тока в участке цепи от сопротивления этого участка.
3. Какова зависимость силы тока в проводнике от сопротивления этого проводника при неизменном напряжении?
4. Как формулируется закон Ома?
5. Как записывается формула закона Ома?
6. Как выразить напряжение на участке цепи, зная силу тока в нем и его сопротивление?

7. Как выразить сопротивление участка цепи, зная напряжение на его концах и силу тока в нем?



Упражнение

1. Напряжение на зажимах электрического утюга 220 В, сопротивление нагревательного элемента утюга 50 Ом. Чему равна сила тока в нагревательном элементе?

2. Сила тока в спирали электрической лампы 0,7 А, сопротивление лампы 310 Ом. Определите напряжение, под которым находится лампа.

3. Каким сопротивлением обладает вольтметр, рассчитанный на 150 В, если сила тока в нем не должна превышать 0,01 А?

4. Рассмотрите *рис. 88* и таблицу результатов опыта, выполняемого в соответствии с этим рисунком. Какой № опыта таблицы соответствует рисунку? Как следует изменить рисунок, чтобы он соответствовал другому опытам, указанным в таблице?

5. Определите по графику (*рис. 90*) сопротивление исследуемых проводников.

6. По показаниям приборов (см. *рис. 86*) определите сопротивление проводника АВ.

7. На *рис. 91* изображены графики зависимости силы тока от напряжения для двух проводников R_a и R_b . Какой из этих проводников обладает большим сопротивлением? Определите сопротивление каждого из проводников.

8. Какой вид будут иметь формулы [23]-[23]**, если вместо сопротивления R , использовать электропроводность λ участка цепи?

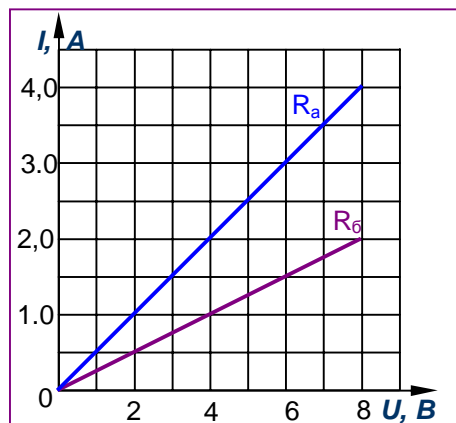


Рис. 91. Зависимость силы тока I от напряжения U при $R=\text{const}$

§ 45. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА. УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Рассмотрим зависимость сопротивления проводника от его размеров и материала.

1⁰. Мы знаем, что причиной электрического сопротивления проводника является взаимодействие электронов с ионами кристаллической решетки металла (§ 43). Поэтому можно предположить, что сопротивление проводника R зависит от его *длины l* и *площади поперечного сечения S* , а также от *вещества*, из которого он изготовлен.

На *рис. 92* изображена установка для проведения такого опыта. В цепь источника тока по очереди включают различные проводники, например:

- 1) никелиновые проволоки *одинаковой толщины*, но *разной длины*,
- 2) никелиновые проволоки *одинаковой длины*, но *разной толщины* (разной площади поперечного сечения);
- 3) никелиновую и нихромовую проволоки *одинаковой длины и толщины*.

Силу тока в цепи измеряют амперметром, напряжение — вольтметром.

Зная напряжение на концах проводника и силу тока в нем, по закону Ома можно определить сопротивление каждого из проводников.

Выполнив указанные опыты, мы установим, что:

- 1) из двух никелиновых проволок одинаковой толщины *более длинная* проволока имеет *большее сопротивление*;

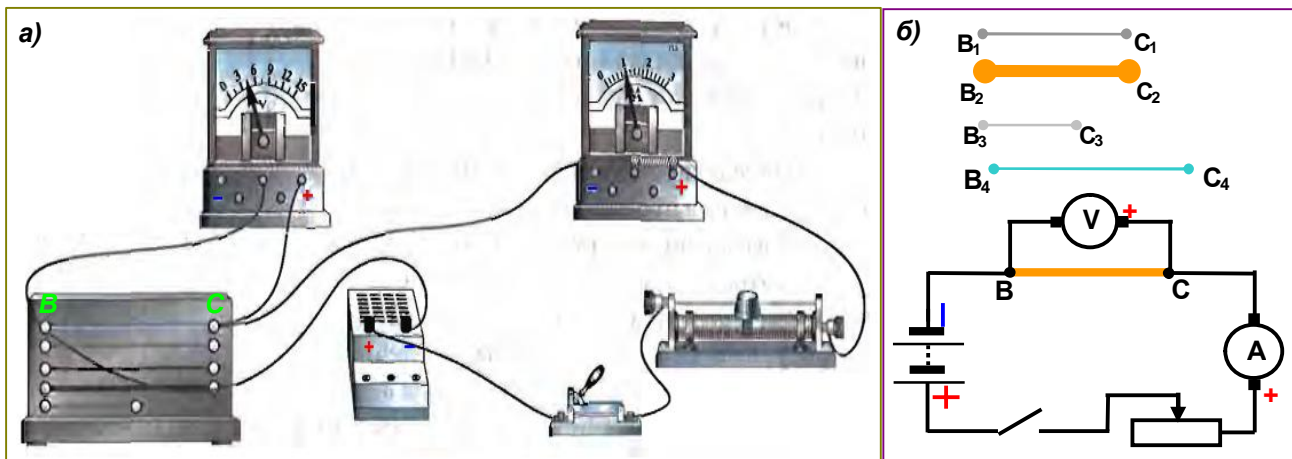


Рис. 92. Внешний вид установки (а) и схема (б) для исследования зависимости сопротивления проводника от его размеров и материала. Образцы исследуемых проводников подключаются к зажимам В и С.

2) из двух никелиновых проволок одинаковой длины **большее сопротивление** имеет проволока с **меньшим поперечным сечением**;


3) никелиновая и нихромовая проволоки **одинаковых размеров** имеют **разное сопротивление**.

Зависимость сопротивления проводника от его размеров и вещества, из которого изготовлен проводник, впервые на опытах изучил Ом. Он установил, что **сопротивление прямо пропорционально длине проводника, обратно пропорционально площади его поперечного сечения и зависит от вещества проводника**.

2⁰. Как учесть зависимость сопротивления от вещества, из которого изготавливают проводник? Для этого вычисляют так называемое **удельное сопротивление вещества**.

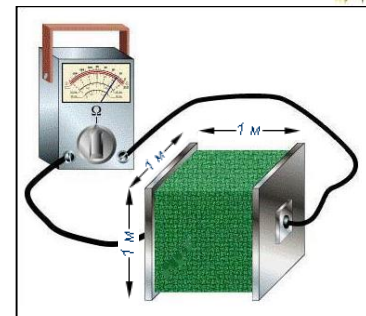
Удельное сопротивление – это физическая величина, которая определяет **сопротивление проводника из данного вещества длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 м²**.

Удельное сопротивление – это сопротивление материала длиной 1 метр и поперечным сечением 1 кв. метр



Введем буквенные обозначения: ρ – удельное сопротивление, l – его длина, S – площадь поперечного сечения проводника. Тогда сопротивление проводника R выразится формулой:

$$R = \frac{\rho l}{S}, [24]$$



Из нее получим, что:

$$l = \frac{RS}{\rho}, [24]^* \quad S = \frac{\rho l}{R}, [24]** \quad \rho = \frac{RS}{l}, [24]***$$

Из последней формулы можно определить единицу удельного сопротивления. Так как единицей сопротивления является 1 Ом, единицей площади поперечного сечения – 1 м², а единицей длины – 1 м, то единицей удельного сопротивления будет:

$$1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2 / 1 \text{ м} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Удобнее выражать площадь поперечного сечения проводника в квадратных миллиметрах, так как она чаще всего бывает небольшой. Тогда единицей удельного сопротивления будет:

$$1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$$

Этой единицей мы и будем пользоваться в дальнейшем.

3⁰. Удельное сопротивление с изменением температуры меняется. Опытным путем было установлено, что у металлов, например, удельное сопротивление с

повышением температуры увеличивается. В таблице на следующей странице приведены значения удельных сопротивлений некоторых веществ при 20 °С.

Удельное сопротивление некоторых веществ, Ом·мм²/м (при t = 20 °С)

Серебро	0,016	Никелин (сплав)	0,40	Нихром (сплав)	1,1
Медь	0,017				
Золото	0,024	Манганин (сплав)	0,43	Фехраль (сплав)	1,3
Алюминий	0,028				
Вольфрам	0,055	Константан (сплав)	0,50	Графит	13
Железо	0,10			Фарфор	10 ¹⁹
Свинец	0,21	Ртуть	0,96	Эбонит	10 ²⁰

Из всех металлов наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро и медь. Следовательно, **серебро и медь – лучшие проводники электричества.**

4⁰. При проводке электрических цепей используют алюминиевые, медные и железные провода.

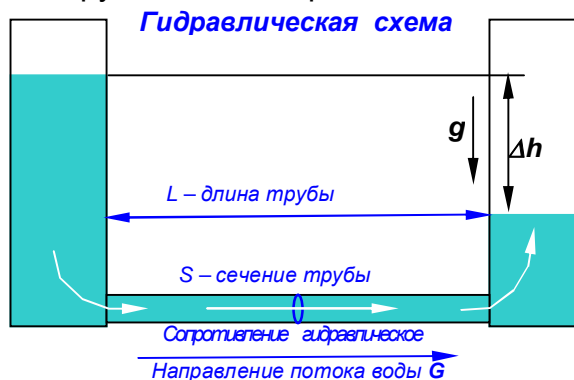
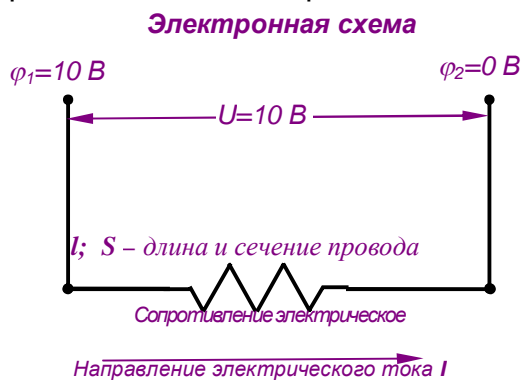
Во многих случаях бывают нужны приборы, имеющие большое сопротивление. Их изготавливают из специально созданных сплавов – веществ с большим удельным сопротивлением. Например, как видно из таблицы, сплав нихром имеет удельное сопротивление почти в 40 раз большее, чем алюминий.

Фарфор и эбонит имеют такое большое удельное сопротивление, что почти совсем не проводят электрический ток, их используют в качестве изоляторов.



Вопросы

1. Как зависит сопротивление проводника от его длины и от площади поперечного сечения? Проведите аналогию с трубкой, по которой течёт вода.



2. Как показать на опыте зависимость сопротивления проводника от его длины, площади поперечного сечения и вещества, из которого он изготовлен?
3. Что называется удельным сопротивлением проводника?
4. По какой формуле можно рассчитывать сопротивление проводников?
5. В каких единицах выражается удельное сопротивление проводника?
6. Из каких веществ изготавливают проводники, применяемые на практике?

§ 46. ПРИМЕРЫ НА РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА, СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

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

Пример 1. Длина медного провода, использованного в осветительной сети, 100 м, площадь поперечного сечения его 2 мм². Чему равно сопротивление такого провода?

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$l = 100 \text{ м}$$

$$S = 2 \text{ мм}^2$$

$$\rho = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$$

$R - ?$

Решение:

$$R = \rho l / S$$

Удельное сопротивление меди находим в таблице § 45, тогда:

$$R = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} \cdot 100 \text{ м} / 2 \text{ мм}^2 = 0,85 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R = 0,85 \text{ Ом}.$



Пример 2. Никелиновая проволока длиной 120 м и площадью поперечного сечения 0,5 мм² включена в цепь с напряжением 127 В. Определить силу тока в проволоке.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$l = 120 \text{ м}$$

$$S = 0,5 \text{ мм}^2$$

$$U = 127 \text{ В}$$

$$\rho = 0,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$$

$I - ?$

Решение: Силу тока можно определить по закону Ома: $I = U/R$.

Неизвестное сопротивление — по формуле $R = \frac{\rho l}{S}$.

Подставляя значения величин в эти формулы, находим:

$$R = 0,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} \cdot 120 \text{ м} / 0,5 \text{ мм}^2 = 96 \text{ Ом}$$

$$I = 127 \text{ В} / 96 \text{ Ом} \approx 1,3 \text{ А}.$$

Ответ: $I \approx 1,3 \text{ А}.$

Пример 3. Манганиновая проволока длиной 8 м и площадью поперечного сечения 0,8 мм² включена в цепь аккумулятора. Сила тока в цепи 0,3 А. Определить напряжение на полюсах аккумулятора.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$l = 8 \text{ м}$$

$$S = 0,8 \text{ мм}^2$$

$$I = 0,3 \text{ А}$$

$$\rho = 0,43 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$$

$U - ?$

Решение:

Напряжение на полюсах аккумулятора равно напряжению на концах проволоки. Это напряжение можно найти по закону Ома:

$$U = IR.$$

Неизвестное сопротивление определим по формуле $R = \frac{\rho l}{S}$, тогда:

$$U = \frac{I\rho l}{S}.$$

Подставляя значения величин в формулу, получим:

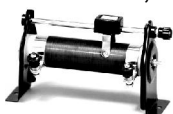
$$U = 0,3 \text{ А} \cdot 0,43 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} \cdot 8 \text{ м} / 0,8 \text{ мм}^2 = 1,3 \text{ В}.$$

Ответ: $U = 1,3 \text{ В}.$

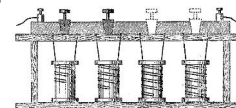


Упражнение

1. Длина одного провода 20 см, другого – 1,6 м. Площадь сечения и материал проводов одинаковы. У какого провода сопротивление больше и во сколько раз?
2. Рассчитайте сопротивления следующих проводников, изготовленных:
 - а) из алюминиевой проволоки длиной 80 см и площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$;
 - б) из никелиновой проволоки длиной 400 см и площадью поперечного сечения $0,5 \text{ мм}^2$;
 - в) из константановой проволоки длиной 50 см и площадью поперечного сечения $0,005 \text{ см}^2$.
3. Спираль электрической плитки изготовлена из нихромовой проволоки длиной 13,75 м и площадью поперечного сечения $0,1 \text{ мм}^2$. Плитка рассчитана на напряжение 220 В. Определите силу тока в спирали плитки.
4. Сила тока в железном проводнике длиной 150 мм и площадью поперечного сечения $0,02 \text{ мм}^2$ равна 250 мА. Каково напряжение на концах проводника?



§ 47. РЕОСТАТЫ И ДРУГИЕ РЕЗИСТОРЫ



1⁰. На практике часто приходится менять силу тока в цепи, делая ее то больше, то меньше. Так, изменяя силу тока в динамике радиоприемника, мы регулируем громкость звука. Изменением силы тока в электродвигателе швейной машины можно регулировать скорость его вращения.

Во многих случаях для регулирования силы тока в цепи применяют специальные приборы — реостаты.

Простейшим реостатом может служить проволока из материала с большим удельным сопротивлением, например никелиновая или нихромовая. Включив такую проволоку в цепь источника электрического тока через контакты А и С последовательно с амперметром (рис. 93) и передвигая подвижный контакт С, можно уменьшать или увеличивать длину включенного в цепь участка АС. При этом будет меняться сопротивление цепи, а следовательно, и сила тока в ней.

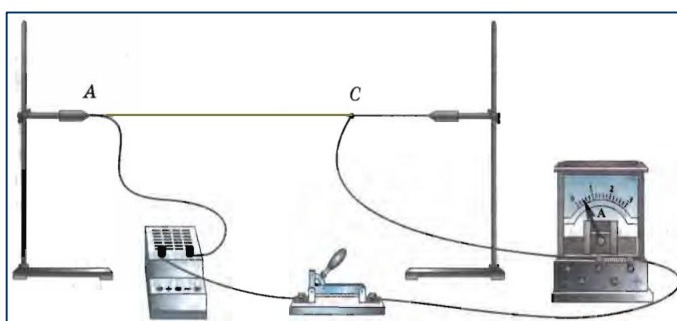


Рис. 93. Простейший реостат – регулируемое сопротивление АС для изменения силы тока в цепи.

2⁰. Реостатам, применяемым на практике, придают более удобную и компактную форму. Для этой цели используют проволоку с большим удельным сопротивлением. На рис.

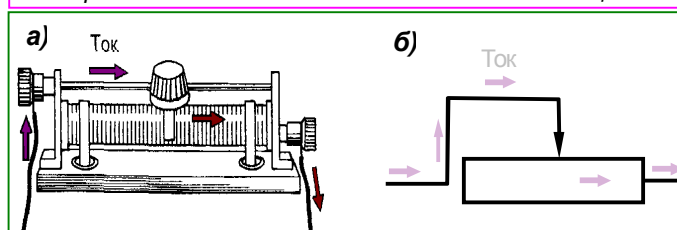


Рис. 94. Ползунковый реостат (а) и его обозначение на схемах.

94 изображен так называемый *ползунковый реостат* и его условное обозначение на схемах. В этом реостате никелиновая проволока намотана на керамический цилиндр. Проволока покрыта тонким слоем непроводящей ток окислы, поэтому витки ее изолированы друг от друга. Над обмоткой расположен металлический стержень, по которому может перемещаться ползунок. Своими контактами он прижат к виткам обмотки. От трения ползунка о витки слой окислы под его контактами стирается, и электрический ток в цепи проходит от витков проволоки к ползунку, а через него в стержень, имеющий на конце клемму. С помощью этой клеммы и

клеммы, соединенной с одним из концов обмотки и расположенной на корпусе реостата, реостат подсоединяют в цепь.

Перемещая ползунок по стержню, можно увеличивать или уменьшать сопротивление реостата, включенного в цепь.

3°. Каждый реостат рассчитан на определенное *сопротивление* и на наибольшую допустимую *силу тока*, превышать которую не следует, так как обмотка реостата накаляется и может перегореть. Сопротивление реостата и наибольшее допустимое значение силы тока указаны на реостате.

4°. В школьных экспериментах применяют демонстрационные **магазины сопротивлений**, состоящие из нескольких сопротивлений в виде проволочных катушек, рассчитанных на 10, 20 и 50 Ом (рис. 95). С помощью подобных наборов высокоточных (*образцовых*) сопротивлений можно, например, проверять измерительные приборы.

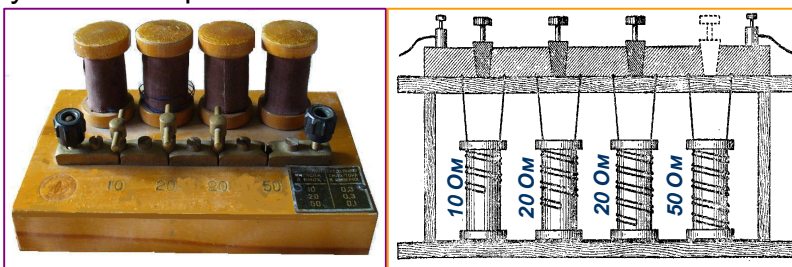


Рис. 95. Магазин сопротивлений из проволочных катушек на 10, 20, и 50 Ом – внешний вид и устройство.

Реостаты и магазины сопротивлений относятся к *переменным сопротивлениям*. Их величину можно менять. Кроме того, в электротехнике и электронике используется много различных *постоянных сопротивлений*.

5°. Эти и другие проводники, имеющие заданное (постоянное или переменное) сопротивление, называют **резисторами** (от лат. *resisto* – сопротивляюсь). Сопротивление резистора указывают на его корпусе либо в виде числового значения, либо в закодированной форме (например, в виде определенных цветных полосок). Условные обозначения резисторов на схемах были показаны на рис. 60.

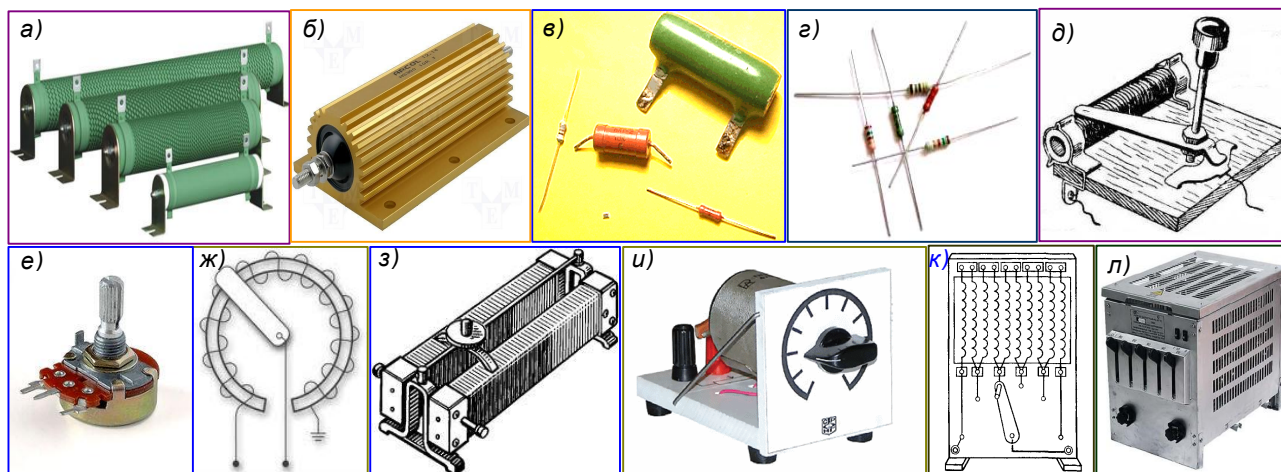


Рис. 96. Резисторы (сопротивления) постоянные и переменные различной величины и мощности. а) проволочные постоянные сопротивления, б) сопротивление на 100 Ом, 200 ватт, в) сопротивления различной мощности, г) мелкие сопротивления для приборов, д) простейший реостат, е) реостат для электронной аппаратуры, ж) устройство такого реостата, з) большой демонстрационный реостат, и) и к) магазины сопротивлений, л) силовой реостат.

Резистор – один из наиболее распространённых компонентов в электронике и в электротехнике. Его назначение – сопротивляться течению тока, преобразуя часть его энергии в тепло. В соответствии с этим основными характеристиками его являются *величина сопротивления* и допустимая (по соображениям перегрева) *мощность рассеивания тепла*. Некоторые из резисторов изображены на рис. 96.

В зависимости от материала, из которого изготовлена токопроводящая часть резистора, различают металлические, углеродистые, керамические и другие резисторы. Для защиты от пыли, влаги и механических повреждений снаружи их

покрывают стеклоэмалью или каким-либо другим твердым материалом. Таковы резисторы, применяемые в электронных схемах. Мощные резисторы имеют вид проволочных спиралей, помещенных в углубление фарфоровой колодки. Иногда для охлаждения резисторов используют радиаторы. Резисторы электронных приборов делают с маркировкой в виде цветных полосок.

Вообще, конструкции резисторов, как и конденсаторов, очень разнообразны. Изменяя (*подстраивая*) сопротивления цепи с помощью различных резисторов, можно влиять на силу тока в её элементах. От этого, в свою очередь, зависят действия, оказываемые током в различных устройствах.



Вопросы

1. Для чего предназначен реостат?
2. Объясните по *рис. 94*, как устроен ползунковый реостат. Как можно включать его в цепь?
3. Почему в реостатах используют проволоку с большим удельным сопротивлением?
4. Для каких величин указывают на реостате их допустимые значения?
5. Как на схемах электрических цепей изображают реостат?
6. Что такое магазин сопротивлений? Как устроен магазин сопротивлений?
7. Что такое резисторы? Для чего они предназначены? Какие бывают резисторы? Как различные резисторы изображаются на схемах?
8. Зачем на резисторе иногда делают металлический кожух в виде радиатора с рёбрами, *рис. 96, б*?
9. Назовите две основные характеристики резисторов, по которым их следует выбирать для практического использования.



Упражнение

1. На *рис. 96, к*) изображен резистор, с помощью которого можно менять сопротивление в цепи не плавно, а ступенями — скачками. Рассмотрите рисунок и по нему опишите, как действует такой резистор. Как он называется?
2. Если каждая спираль резистора, показанного на *рис. 96, к* имеет сопротивление 3 Ом, то какое сопротивление будет введено в цепь при положении переключателя, изображенном на рисунке? Куда надо поставить переключатель, чтобы с помощью этого резистора увеличить сопротивление цепи еще на 18 Ом?
3. Рассмотрите внимательно *рис. 96* и расскажите подробно об особенностях изображённых на нём резисторов.
4. В цепь включены: источник тока, ключ, электрическая лампа и ползунковый реостат. Нарисуйте в тетради схему этой цепи. Куда надо передвинуть ползунок реостата, чтобы лампа светилась ярче?
5. Требуется изготовить реостат на 20 Ом из никелиновой проволоки площадью сечения 3 мм². Какой длины проволока потребуется для этого?

§ 47а. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

$$R_t = R_o(1 + \alpha t)$$

Кроме размеров и материала, сопротивление проводника зависит от его *температуры*. Эта зависимость у металлов и электролитов различна.

1⁰. Включим последовательно в цепь электрическую лампу и железную проволоку, свёрнутую спиралью. Нагревая спираль на горелке, мы увидим, что свечение лампы становится менее ярким. Если в цепь вместо лампы включить

амперметр, то он покажет, что при нагревании железной спирали ток в цепи уменьшается (рис. 97, а). Отсюда следует, что при нагревании железной проволоки её сопротивление увеличивается.

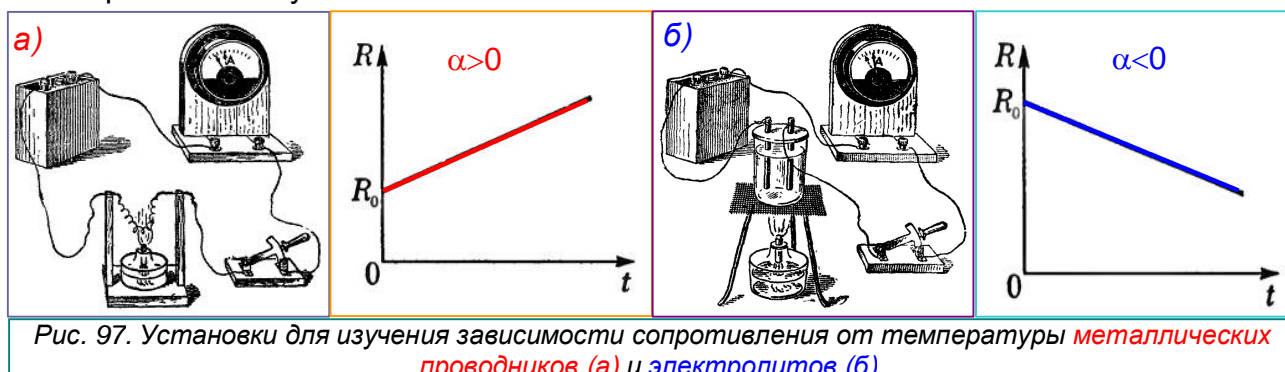


Рис. 97. Установки для изучения зависимости сопротивления от температуры **металлических проводников (а)** и **электролитов (б)**.

Заменяя в этом опыте железную проволоку на проволоку из любых других металлов, мы увидим, что **при нагревании сопротивление у металлов увеличивается**. У чистых металлов изменение сопротивления с температурой значительно, у сплавов меньше. Есть специальные сплавы, у которых сопротивление почти не меняется при повышении температуры; таковы, например, сплавы константан, манганин и др. Проволока, изготовленная из этих сплавов, идёт, например, на устройство эталонов и магазинов сопротивлений, а также на изготовление реостатов.

2⁰. Иное наблюдается в электролитах. Если в цепь вместо железной проволоки включить какой-нибудь электролит (рис. 97, б), то можно заметить, что при нагревании электролита ток в нём всё время увеличивается. Значит, **сопротивление электролитов при повышении температуры уменьшается**.

3⁰. Отношение величины изменения сопротивления проводника при его нагревании на 1⁰С к величине первоначального сопротивления проводника при 0⁰С называется **температурным коэффициентом сопротивления**.

Если сопротивление проводника при 0⁰ равно R₀, а при температуре t равно R_t, то температурный коэффициент сопротивления α определится из формулы:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$$

Отсюда:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad [25]$$

Температурные коэффициенты сопротивлений различных металлических проводников приведены в следующей таблице.

Проводник	α , 1/град	Проводник	α , 1/град	Проводник	α , 1/град
Сталь	0,0050	Никелин	0,0003	Свинец	0,0041
Вольфрам	0,0046	Нихром	0,0003	Платина	0,0025
Алюминий	0,0042	Константан	0,00005	Ртуть	0,0027
Серебро	0,0040	Манганин	0,000015		
Медь	0,0010	Цинк	0,0039		

4⁰. Зависимость сопротивления проводника от температуры используют в **термометрах сопротивления**, рис. 98. Обычно в качестве термометрического тела такого термометра берут платиновую проволоку, зависимость сопротивления которой от температуры хорошо изучена. Платиновыми термометрами можно измерять температуру в пределах от -20 до +600⁰С с точностью до 0,0001⁰С.

5⁰. При очень низких температурах у некоторых материалов наблюдается одно

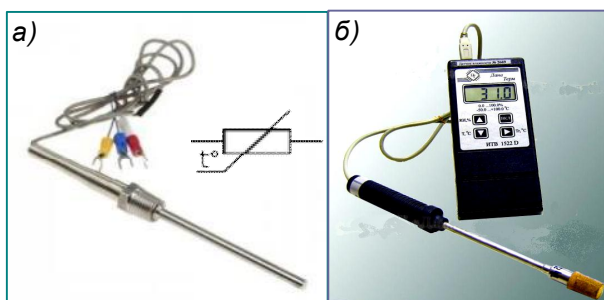


Рис. 98. Термометры сопротивления. а) чувствительный элемент и его изображение на схемах; б) термометр сопротивления, готовый для использования

удивительное явление: начиная с некоторой температуры, сопротивление их внезапно, скачком уменьшается до нуля. Это явление называется **сверхпроводимостью**.

Температура, при которой металл становится сверхпроводящим, очень низка; например, у ртути она равна $2,4^0\text{ K}$, у олова $3,7^0\text{ K}$, у свинца $7,2^0\text{ K}$. Известны несколько десятков чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость — квантовое явление

Открытие в 1986—1993 гг. ряда высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) далеко отодвинуло температурную границу сверхпроводимости и позволило практически использовать сверхпроводящие материалы не только при температуре жидкого гелия ($4,2\text{ K}$), но и при температуре кипения жидкого азота (77 K), гораздо более дешевой криогенной жидкости.



Вопросы

1. Что происходит с сопротивлением металлических проводников при нагревании?
2. Что происходит с сопротивлением электролитов при их нагревании?
3. Что такое температурный коэффициент сопротивления? Как рассчитать сопротивление проводника при изменении его температуры?
4. Что такое термометр сопротивления? как он устроен?
5. Что такое сверхпроводимость?

§ 48. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ



1⁰. Электрические цепи, с которыми приходится иметь дело на практике, обычно состоят не из одного проводника тока, а из системы различных проводников, которые могут быть соединены между собой по-разному. Зная сопротивление каждого проводника и способ их соединения, можно рассчитать общее

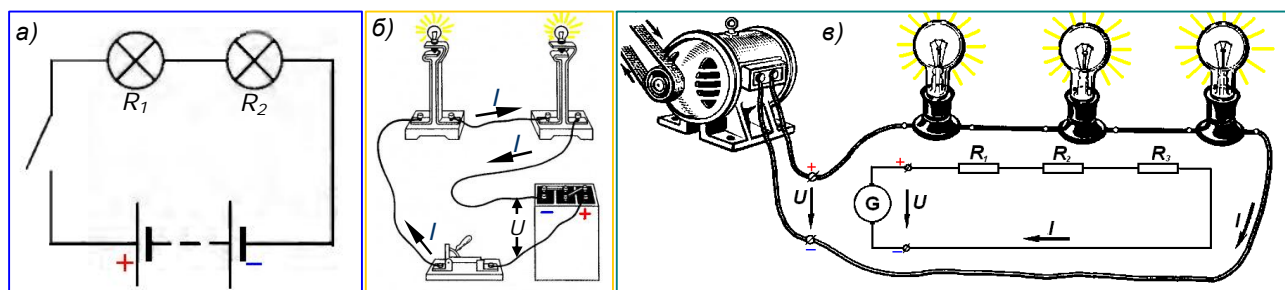


Рис. 99. Последовательное соединение двух лампочек, подключённых к батарее через ключ, показано слева — схема а) и внешний вид установки б). Последовательное подключение (схема и внешний вид) трёх лампочек к электрогенератору показано справа (в).

сопротивление цепи.

2⁰. На рис. 99 изображены цепи последовательного соединения электрических ламп. Мы знаем, что

при последовательном соединении сила тока в любых частях цепи одинакова.

$$I = I_1 = I_2. \quad [26]$$

В гирляндах на ёлке (рис. 100) обычно используют маленькие лампочки, соединённые последовательно. При таком включении, если выключать одну лампу, то цепь разомкнется, и другие лампы погаснут.

Поэтому последовательно можно соединять только одинаковые (точнее — рассчитанные на одинаковую силу тока) лампочки, иначе одни из них будут светить не в полную силу, а другие могут сгореть от перенапряжения.



Рис. 100. Гирлянды лампочек на ёлке.

То же самое, конечно, относится и к другим последовательно включённым проводникам (резисторам).

3⁰. А чему равно сопротивление последовательно соединённых проводников, *рис. 99*?

Соединяя проводники последовательно, мы как бы увеличиваем длину проводника. Поэтому сопротивление цепи становится больше сопротивления одного проводника.

Общее сопротивление цепи при последовательном соединении равно сумме сопротивлений отдельных проводников (или отдельных участков цепи):

$$R = R_1 + R_2. \quad [27]$$

4⁰. Напряжение на концах отдельных участков цепи рассчитывается на основе закона Ома:

$$U_1 = I \cdot R_1; \quad U_2 = I \cdot R_2. \quad [23]^*$$

Из приведенных равенств видно, что напряжение будет большим на проводнике с наибольшим сопротивлением, так как сила тока везде одинакова, *рис. 101*.

Полное напряжение в цепи при последовательном соединении, или напряжение на полюсах источника тока, равно сумме напряжений на отдельных участках цепи:

$$U = U_1 + U_2. \quad [28]$$

Это равенство вытекает из закона сохранения энергии. Ведь электрическое напряжение на участке цепи измеряется работой электрического тока, совершающейся при прохождении по этому участку цепи электрического заряда в 1 Кл. Эта работа совершается за счет энергии электрического поля, и энергия, израсходованная на всем участке цепи, равна сумме энергий, которые расходуются на отдельных проводниках, составляющих участок этой цепи.

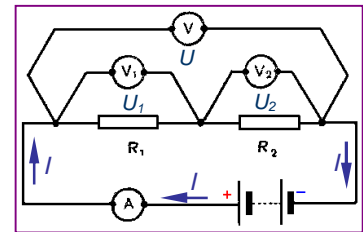


Рис. 101. Последовательное соединение проводников.

Все приведенные закономерности справедливы для любого числа последовательно соединённых проводников.

5⁰. При последовательном соединении сила тока в любой части цепи одинакова $I = U_1/R_1 = U_2/R_2$. Следовательно

$$U_1/U_2 = R_1/R_2.$$

6⁰. Рассмотрим **пример**.

Два проводника сопротивлением $R_1 = 2$ Ом и $R_2 = 3$ Ом соединены последовательно. Сила тока в цепи $I = 1$ А. Определить сопротивление цепи, напряжение на каждом проводнике и полное напряжение всего участка цепи.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$R_1 = 2 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом},$$

$$I = 1 \text{ А}.$$

Определить: R-? U-?: U-?: U-?

Решение:

Сила тока во всех последовательно соединённых проводниках одна и та же и равна силе тока в цепи, т. е.:

$$I_1 = I_2 = I = 1 \text{ А}.$$

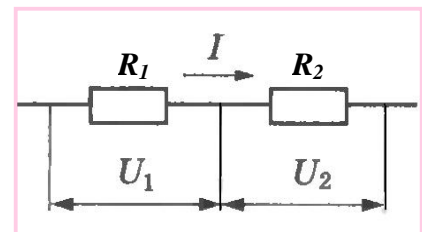
Общее сопротивление цепи:

$$R = R_1 + R_2,$$

$$R = 2 \text{ Ом} + 3 \text{ Ом} = 5 \text{ Ом}.$$

Напряжение на каждом из проводников найдем по закону Ома:

$$U_1 = IR_1; \quad U_1 = 1 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 2 \text{ В};$$



$$\begin{aligned} I &= I_1 = I_2 \\ R &= R_1 + R_2 \\ U &= U_1 + U_2 \end{aligned}$$

$$U_2 = IR_2; U_2 = 1 \text{ А} \cdot 3 \text{ Ом} = 3 \text{ В.}$$

Полное напряжение в цепи:

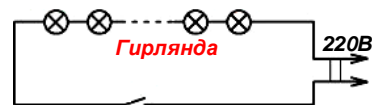
$$U = U_1 + U_2, \text{ или } U = IR.$$

$$U = 2 \text{ В} + 3 \text{ В} = 5 \text{ В}, \text{ или } U = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В.}$$

Ответ: $R = 5 \text{ Ом}$, $U_1 = 2 \text{ В}$, $U_2 = 3 \text{ В}$, $U = 5 \text{ В}$.



Вопросы



1. Какое соединение проводников называют последовательным? Изобразите его на схеме.
2. Какая электрическая величина одинакова для всех проводников, соединенных последовательно?
3. Как найти общее сопротивление цепи, зная сопротивление отдельных проводников, при последовательном соединении?
4. Как найти напряжение участка цепи, состоящего из последовательно соединенных проводников, зная напряжение на каждом?
5. У вас есть одинаковые разноцветные лампочки, каждая из которых рассчитана на 12 В. В сети 220В. Сколько лампочек нужно соединить в гирлянду, чтобы они горели без перекала?



Упражнение

1. Цепь состоит из двух последовательно соединенных проводников, сопротивление которых 4 и 6 Ом. Сила тока в цепи 0,2 А. Найдите напряжение на каждом из проводников и общее напряжение.
2. Для электропоездов применяют напряжение 3000 В. Как можно использовать для освещения вагонов лампы, рассчитанные на напряжение 50 В каждая?
3. Две одинаковые лампы, рассчитанные на 220 В каждая, соединены последовательно и включены в сеть с напряжением 220 В. Под каким напряжением будет находиться каждая лампа?
4. Электрическая цепь состоит из источника тока — батареи аккумуляторов, создающей в цепи напряжение 6В, лампочки от карманного фонаря сопротивлением 13,5 Ом, двух спиралей сопротивлением 3 Ом и 2 Ом, ключа и соединительных проводов. Все детали цепи соединены последовательно. Начертите схему цепи. Определите силу тока в цепи, напряжение на концах каждого из потребителей тока.

§ 49. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ



1⁰. Другой способ соединения проводников, применяемый в практике, называется **параллельным соединением**. На *рис. 102* изображены цепи параллельного соединения электрических ламп. Обратите внимание на важные особенности такого соединения.

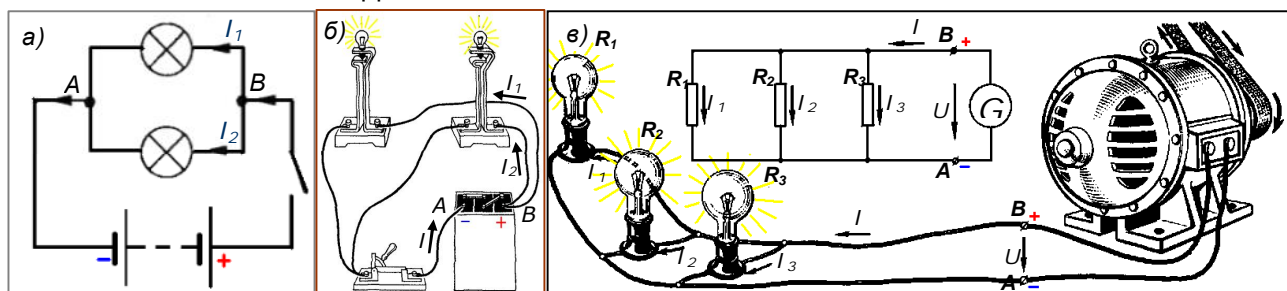


Рис. 102. Параллельное соединение двух лампочек, подключённых к батарее через ключ, показано слева: а) схема; б) внешний вид установки. Параллельное подключение (схема и внешний вид) трёх лампочек к электрогенератору показано справа (в).



Рис. 103. Уличные фонари.

При параллельном соединении все входящие в него проводники одним своим концом присоединяются к одной точке цепи **A**, а вторым концом к другой точке **B** (рис. 102). Поэтому

напряжение на участке цепи АВ и на концах всех параллельно соединенных проводников одно и то же:

$$U = U_1 = U_2. \quad [30]$$

Поэтому параллельное соединение удобно применять в быту и в технике, так как все потребители в этом случае используют одинаковое напряжение. Кроме того, при выключении одного потребителя другие продолжают действовать, ток в них не прерывается, так как цепь остается замкнутой. Так соединяются, например, штепсельные розетки, уличные фонари (рис. 103) и т. п.

2⁰. При параллельном соединении ток в точке **B** (рис. 102 и 105) разветвляется, проходя через параллельно подключенные проводники, а затем вновь сходится в точке **A**, подобно тому как поток воды реки разветвляется, распределяется по отдельным каналам, сходящимся затем вновь, рис. 104.

Поэтому

сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в отдельных параллельно соединенных проводниках:

$$I = I_1 + I_2. \quad [31]$$

3⁰. А чему равно сопротивление параллельно соединенных проводников?

Соединяя проводники параллельно, мы как бы увеличиваем площадь поперечного сечения проводника. Поэтому общее сопротивление цепи уменьшается и становится меньше сопротивления каждого из проводников, входящих в цепь.

Так, например, сопротивление цепи R , состоящей из *двух одинаковых* ламп, сопротивлением R_1 каждая, в два раза меньше сопротивления одной лампы: $R = R_1/2$. Сопротивление *трех параллельно включенных одинаковых* ламп будет в 3 раза меньше каждой из них и т. д.

Выведем формулу для сопротивления цепи, состоящей из параллельно включенных проводников.

В соответствии с законом Ома для каждого участка цепи сила тока $I = U/R$. Поэтому уравнение [31] можно переписать так:

$$U/R = U/R_1 + U/R_2.$$

Или, после сокращения на одну и ту же величину, получим уравнение, связывающее полное сопротивление цепи R и сопротивления параллельных её участков R_1 и R_2 :

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2. \quad [32]$$

Для данного простейшего случая *двух* параллельно включенных сопротивлений нетрудно выразить полное сопротивление цепи:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad [32]^*$$

Напряжения на параллельно соединенных проводниках равны: $U = R_1 I_1 = R_2 I_2$. Следовательно:

$$I_1/I_2 = R_2/R_1. \quad [33]$$

Таким образом, **при параллельном соединении проводников ток делится обратно пропорционально величине их сопротивлений.**

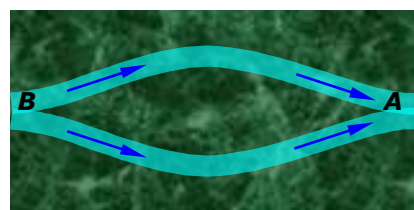


Рис. 104. Поток воды разветвляется и сходится вновь.

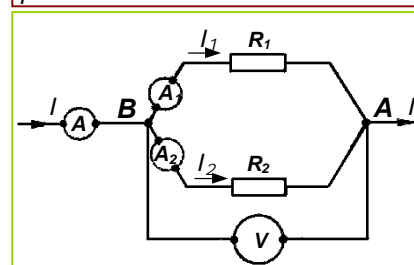
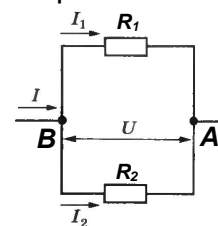


Рис. 105. При параллельном соединении проводников ток разветвляется и сходится вновь.



4⁰. Формулы, справедливые для любого числа (n) параллельно соединенных проводников, выглядят так:

$$U=U_1=U_2=\dots=U_n. \quad [30]$$

$$I=I_1+I_2+\dots+I_n. \quad [31]$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad [32]$$

5⁰. Если вместо величин сопротивлений R_i , пользоваться величинами электропроводности λ_i проводников¹, вместо [32], получим более простую формулу:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n. \quad [34]$$

Таким образом, электропроводность цепи, состоящей из n параллельно соединенных проводников, равна сумме электропроводностей всех проводников.

При параллельном соединении проводников сила тока больше в том проводнике, электропроводность которого больше.

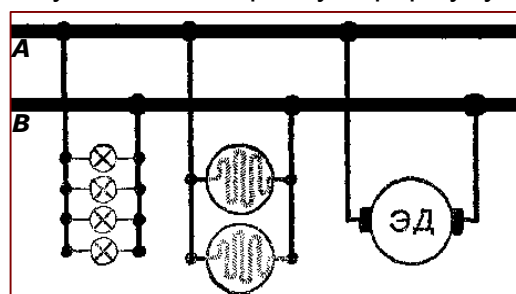


Рис. 106. Параллельное включение в сеть различных потребителей электроэнергии.

6⁰. В одну и ту же электрическую цепь параллельно могут быть включены самые различные потребители электрической энергии. На рис. 106 показано параллельное включение электрических ламп, нагревательных приборов и электродвигателя.

Такая схема соединения потребителей тока используется, например, в жилых помещениях: в точках **A** и **B** провода осветительной сети вводятся в квартиру. Потребители, параллельно включаемые в данную сеть, должны быть рассчитаны на одно и то же напряжение, равное напряжению в сети.

Напряжение в сети, используемое у нас для освещения и в бытовых приборах бывает 127 и 220 В. Поэтому электрические лампы и различные бытовые электроприборы изготовляют на 127 и 220 В.

7⁰. В практике часто применяется смешанное (последовательное и параллельное) соединение проводников.

Зная сопротивления проводников, соединенных параллельно, и напряжение на этом участке цепи, можно определить многие другие электрические величины этой цепи. Для этого используются формулы [30] - [34] и закон Ома для участка цепи [23].

8⁰. **Пример.** В осветительную сеть комнаты включены две электрические лампы, сопротивления которых 200 и 300 Ом. Напряжение в сети 120 В. Определить силу тока в каждой лампе, силу тока в подводящих проводах (т. е. силу тока до разветвления), общее сопротивление участка, состоящего из двух ламп.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$R_1 = 200 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 300 \text{ Ом};$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$I_1 - ? \quad I_2 - ? \quad I_3 - ? \quad R - ?$$

Решение:

Напряжение на каждой лампе равно напряжению в сети, так как лампы соединены параллельно, т. е. $U_1=U_2=120 \text{ В}$. Силу тока в каждой лампе определяем, пользуясь законом Ома: $I = U/R$:

$$I_1 = U/R_1 = 120 \text{ В} / 200 \text{ Ом} = 0,6 \text{ А}$$

$$\begin{aligned} U &= U_1 = U_2 \\ I &= I_1 + I_2 \\ R &= \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

¹ Напомним, что $\lambda_i = 1/R_i$ [22]

$$I_2 = U/R_2 = 120 \text{ В} / 300 \text{ Ом} = 0,4 \text{ А}$$

Сила тока в подводящих проводах равна сумме сил тока в лампах:

$$I = I_1 + I_2 = 0,6 \text{ А} + 0,4 \text{ А} = 1 \text{ А}.$$

Общее сопротивление участка цепи, состоящего из двух параллельно соединенных ламп, находим по закону Ома:

$$R = U/I = 120 \text{ Ом}.$$

Это же можно сделать, используя формулу [25.2]*.

Ответ: $I_1 = 0,6 \text{ А}$, $I_2 = 0,4 \text{ А}$, $I = 1 \text{ А}$, $R = 120 \text{ Ом}$.

Решив задачу, мы убедились, что общее сопротивление участка цепи $R = 120 \text{ Ом}$, состоящего из двух параллельно соединенных проводников сопротивлением $R_1 = 200 \text{ Ом}$ и $R_2 = 300 \text{ Ом}$, меньше сопротивления каждого проводника.



Вопросы

1. Какое соединение проводников называют параллельным? Изобразите его на схеме.
2. Какая из электрических величин одинакова для всех проводников, соединенных параллельно?
3. Как выражается сила тока в цепи до ее разветвления через силы токов в отдельных ветвях разветвления?
4. Как изменяется общее сопротивление разветвления после увеличения числа проводников в разветвлении?
5. Какое соединение проводников применяется в жилых помещениях?
6. Какие напряжения используются для бытовых нужд?
7. Почему лампы в квартире соединяются параллельно, а лампочки в ёлочных гирляндах – последовательно?
8. Сопротивление каждого проводника равно 1 Ом. Чему равно сопротивление двух таких проводников, соединенных: 1) последовательно; 2) параллельно?



Упражнение

1. Два проводника сопротивлением 10 и 15 Ом соединены параллельно и подключены к напряжению 12 В. Определите силу тока в каждом проводнике и силу тока до разветвления.

2. Почему бытовые приборы в помещении необходимо соединять параллельно?

3. Три потребителя сопротивлением 20, 40, 24 Ом соединены параллельно. Напряжение на концах этого участка цепи 24 В. Определите силу тока в каждом потребителе, общую силу тока в участке цепи и сопротивление участка цепи.

4. Два проводника имеют сопротивления — один 5 Ом, другой 500 Ом. Почему при последовательном соединении этих проводников их общее сопротивление будет больше 500 Ом, а при параллельном соединении меньше 5 Ом?

5. На рис. 107 изображена схема смешанного соединения проводников, сопротивления которых такие: $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$, $R_3 = 12 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$.

Амперметр показывает силу тока 1 А. Определите напряжение между точками В и С и силу тока во всех проводниках.

6. На рис. справа изображены различные бытовые потребители электроэнергии. Как они

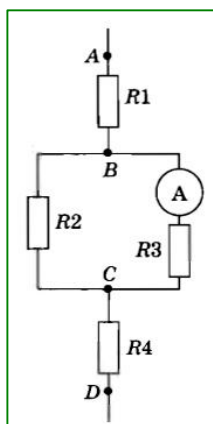
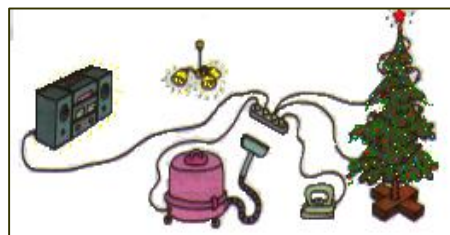
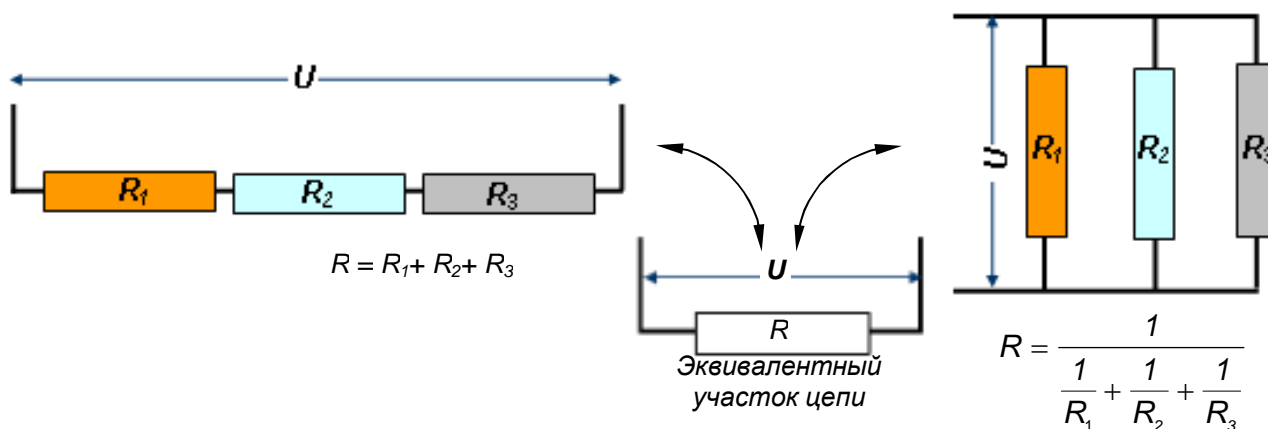


Рис. 107.
Смешанное
соединение
проводников.



подключаются к сети и почему?

Примечание. Из изложенного выше следует, что участки цепей, состоящие из нескольких последовательно или параллельно соединённых сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 можно заменить эквивалентным участком цепи с одним сопротивлением R по такой схеме:



Такая замена часто упрощает решение задач.

§ 50. РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

$$A = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t$$

1⁰. При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу. Ее принято называть **работой тока**. Выше (см. §39 и формулы [19] - [13.2]) мы уже вычисляли работу электрического тока. Повторим этот вывод несколько иначе.

Мы знаем, что напряжение на концах участка цепи численно равно работе, которая совершается при прохождении по этому участку электрического заряда в 1 Кл. При прохождении по этому же участку электрического заряда, равного не 1 Кл, а, например, 5 Кл, совершенная работа будет в 5 раз больше. Таким образом, чтобы определить работу электрического тока на каком-либо участке цепи, надо напряжение на концах этого участка цепи умножить на электрический заряд (количество электричества), прошедший по нему:

$$A = Uq, \quad [9]$$

где A — работа, U — напряжение, q — электрический заряд. Электрический заряд, прошедший по участку цепи, можно определить, измерив силу тока и время его прохождения:

$$q = It. \quad [18]**$$

Используя это соотношение, получили формулу работы электрического тока, которой удобно пользоваться при расчетах:

$$A = UIt. \quad [19]$$

Работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения на концах этого участка на силу тока и на время, в течение которого совершалась работа.

Используя уравнения [23] и [23]* закона Ома, из [19] получим более общее выражение для работы тока:

$$A = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t. \quad [35]$$

2⁰. Работу измеряют в **джоулях**, напряжение — в **вольтах**, силу тока — в **амперах** и время — в **секундах**, поэтому можно написать:

$$1 \text{ джоуль} = 1 \text{ вольт} \times 1 \text{ ампер} \times 1 \text{ секунду, или } 1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}.$$

Выходит, что для измерения работы электрического тока нужны три прибора: вольтметр, амперметр и часы. На практике работу электрического тока измеряют

специальными приборами — **счетчиками**. В устройстве счетчика как бы сочетаются три названных выше прибора. Счетчики электроэнергии сейчас можно видеть почти в каждой квартире.



Современный бытовой электросчётчик

3⁰. **Пример.** Какую работу совершает электродвигатель за 1 ч, если сила тока в цепи электродвигателя 5 А, напряжение на его клеммах 220 В? КПД двигателя 80% .
Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$t = 1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$$

$$I = 5 \text{ А}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$\text{КПД} = 80\%$$

$$A_g - ?$$

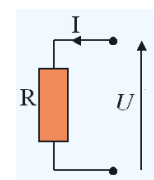


Решение:

Полная работа тока $A = UIt = 220 \text{ В} \cdot 5 \text{ А} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,960\,000 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \approx 4\,000\,000 \text{ Дж}$.

Работа двигателя A_n , т. е. полезная работа тока составляет 80% от всей работы тока: $A_g = A \cdot \text{КПД} = 4\,000\,000 \text{ Дж} \cdot 80\% : 100\% = 3\,200\,000 \text{ Дж} = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ кДж}$.

Ответ: $= 3,2 \cdot 10^3 \text{ кДж}$.



Вопросы

1. Чему равно электрическое напряжение на участке цепи?
2. Как через напряжение и электрический заряд, прошедший через участок цепи, выразить работу электрического тока на этом участке?
3. Как выразить работу тока через напряжение, силу тока и время?
4. Какими приборами измеряют работу электрического тока? В каких единицах измеряется работа тока электросчётчиками?



Упражнение

1. Какую работу совершает электрический ток в электродвигателе за 30 мин, если сила тока в цепи 0,5 А, а напряжение на клеммах двигателя 12 В?
2. Напряжение на спирали лампочки от карманного фонаря равно 3,5 В, сопротивление спирали 14 Ом. Какую работу совершает ток в лампочке за 5 мин?
3. Два проводника, сопротивлением по 5 Ом каждый, соединены сначала последовательно, а потом параллельно и в обоих случаях включены под напряжение 4,5 В. В каком случае работа тока за одно и то же время будет больше и во сколько раз?

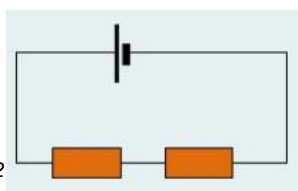


$$I = I_1 = I_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

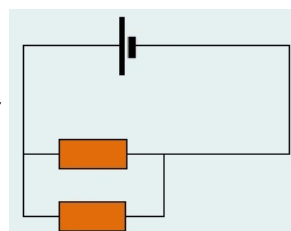
$$U = U_1 + U_2$$

$$U_1/U_2 = R_1/R_2$$



$$A = I^2 R t$$

$$A = \frac{U^2}{R} t$$



$$U = U_1 = U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

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

$$I_1/I_2 = R_2/R_1$$



При работе любого из электроприборов ток совершает работу

§ 51. МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА²

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

1⁰. Мы знаем, что мощность численно равна работе, совершенной в единицу времени. Следовательно, чтобы найти среднюю мощность электрического тока, надо его работу разделить на время:

$$P = A/t \quad [20]$$

где P — мощность тока (механическую мощность мы обозначали буквой M).

Используя уравнения [35], получим наиболее общее выражение для мощности тока:

$$P = UI = I^2 R = U^2/R. \quad [36]$$

2⁰. За единицу мощности, как известно, принят 1 Вт, равный 1 Дж/с. Из формулы $P = UI$ следует, что

$$1 \text{ ватт} = 1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ ампер, или } 1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Используют также единицы мощности, кратные ватту: гектоватт (**гВт**), киловатт (**кВт**), мегаватт (**МВт**).

$$1 \text{ гВт} = 100 \text{ Вт},$$

$$1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт},$$

$$1 \text{ МВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт}.$$

3⁰. Чтобы вычислить искомую мощность, необходимо напряжение на избранном участке цепи умножить на силу тока, измерить которые можно с помощью вольтметра и амперметра.

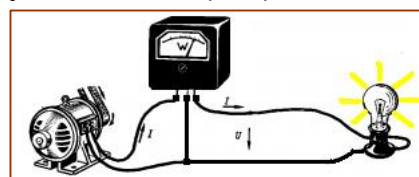


Рис. 108. Ваттметр, фактически включающий два прибора: вольтметр и амперметр.

Существуют специальные приборы — **ваттметры**, которые непосредственно измеряют мощность электрического тока в цепи, рис. 108 (обратите внимание на то, как подключается этот прибор, заменяющий собой вольтметр и амперметр).

В таблице приведены мощности некоторых источников и потребителей электрического тока, **кВт**.

Лампа карманного фонаря	≈0,001
Холодильник домашний	0,110-0,16
Лампы осветительные (бытовые)	0,015-0,2
Электрический утюг	0,3-1
Стиральная машина	0,35-2,5
Электрическая плитка	0,6-1,25
Электропылесос	до 1,2
Лампы в звездах башен Кремля	5
Двигатель электровоза ВЛ10	650
Электровоз ВЛ10	5200
Электродвигатель прокатного стана	6000—9000
Гидрогенератор Братской ГЭС	250 000
Турбогенератор	50 000—1 200 000

Вопросы

1. Что называют мощностью?
2. Как рассчитать мощность?
3. Как выражается мощность электрического тока через напряжение и силу тока?
4. Что принимают за единицу мощности?
5. Как выражается единица мощности через единицы напряжения и силы тока?
6. Какие единицы мощности используют в практике?

² См. также §39, формула [15.2].



Упражнение

1. В цепь с напряжением 127 В включена электрическая лампа, сила тока в которой 0,6 А. Найдите мощность тока в лампе.
2. Электроплитка рассчитана на напряжение 220 В и силу тока 3 А. Определите мощность плитки.
3. Пользуясь данными таблицы мощностей, вычислите, какую работу совершает за 1 ч электрический ток в лампе карманного фонаря, осветительной лампе мощностью 200 Вт, в лампе звезды башни Кремля.
4. Рассмотрите один-два электроприбора, используемые в квартире. Найдите по паспорту приборов их мощность. Определите работу тока в них за 10 мин.



§ 52. ЕДИНИЦЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ПРАКТИКЕ

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж.}$$

1⁰. В паспортах приемников тока – лампах, плитках, электродвигателях – обычно указывается их мощность. По мощности легко определить работу тока за заданный промежуток времени, пользуясь формулой $A = Pt$.

Выражая мощность в ваттах, а время в секундах, получим работу в джоулях:

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

Однако эту единицу работы неудобно использовать на практике, так как в потребителях электроэнергии ток производит работу в течение длительного времени, например в бытовых приборах – в течение нескольких часов, в электропоездах – по нескольку часов и даже суток, а расчет израсходованной энергии по электросчетчику производится чаще всего за месяц, *рис. 109*. Поэтому при вычислении работы тока или затрачиваемой и вырабатываемой электрической энергии приходится переводить эти отрезки времени в секунды, что усложняет расчеты. Поэтому на практике, вычисляя работу тока, гораздо удобнее время выражать в часах, а работу тока не в джоулях, а в других единицах: ватт-час (Вт·ч), гектоватт-час (гВт·ч), киловатт-час (кВт·ч).

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ гВт} \cdot \text{ч} = 100 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 360\,000 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж.}$$

2⁰. **Пример.** Имеется электрическая лампа, рассчитанная на ток мощностью 100 Вт. Ежедневно лампа горит в течение 6 ч. Найти работу тока за один месяц (30 дней) и стоимость израсходованной энергии при тарифе 30 к. за 1 кВт·ч.

Запишем условие задачи и решим ее.

Дано:

$$P = 100 \text{ Вт}$$

$$t = 6 \text{ ч} \cdot 30 = 180 \text{ ч}$$

$$\text{Тариф} - 30 \text{ к./кВт} \cdot \text{ч}$$

$$A - ?$$

$$\text{Стоимость} - ?$$

Решение:

$$A = Pt.$$

$$A = 100 \text{ Вт} \cdot 180 \text{ ч} = 18\,000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

$$\text{Стоимость} = 30 (\text{к./кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 5 \text{ р. } 40 \text{ к.}$$

Ответ: $A = 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, стоимость = 5 р. 40 к.



Вопросы

1. Какую величину обычно указывают в паспортах приемников тока?
2. Как можно выразить работу тока через мощность и время?
3. Какие единицы работы тока используют?



Упражнение

1. Мощность электрического утюга равна 0,6 кВт. Вычислите работу тока в нем за 1,5 ч. Сколько при этом расходуется энергии?
2. В комнате имеется две электролампы по 60 Вт и две по 40 Вт. Каждую из них включают на 3 ч в сутки. Определите стоимость энергии, израсходованной лампами за один месяц (30 дней). (Действующий тариф за 1 кВт • ч узнайте у учителя.)
3. Рассмотрите *рис. 106*. Подсчитайте электроэнергию, расходуемую за 1 месяц (30 дней) всеми показанными на схеме приборами, если известно, что напряжение в сети (между точками а и б) равно 220 В, лампы имеют мощность по 40 Вт каждая и включаются на 4 ч в день. Электронагревательные приборы имеют мощность 800 и 1000 Вт и включаются на 1ч и 0,5 ч в день соответственно. Электродвигатель пылесоса мощностью 600 Вт включается на 0,5 ч один раз в неделю. Вычислите стоимость расходуемой энергии. (Действующий тариф за 1 кВт • ч узнайте у учителя).



Задание

1. Узнайте мощности имеющихся у вас в квартире электрических приборов и примерное время их работы в течение недели. Вычислите стоимость израсходованной ими за неделю энергии и сравните полученную вами сумму с той, которая определяется по счетчику.

2. По счетчику (*рис. 109*) определите и запишите, какая электроэнергия расходуется в вашей квартире за неделю (или месяц). В течение следующей недели (месяца) старайтесь экономить энергию — выключать, когда это возможно, электроприборы. Определите по счетчику, сколько энергии вы сумели сэкономить.

Примечание. Экономия электроэнергии имеет большое значение. Например, 1 кВт • ч энергии позволяет выплавить около 20 кг чугуна.



Белые цифры на шкале счётчика показывают киловатт-часы

Рис. 109. Бытовой электросчётчик.

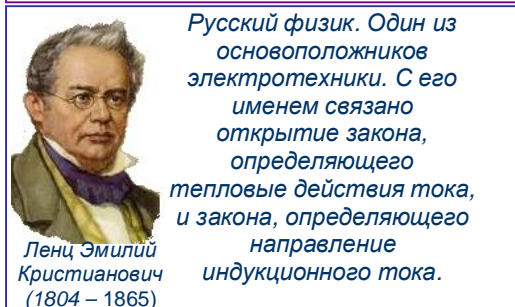
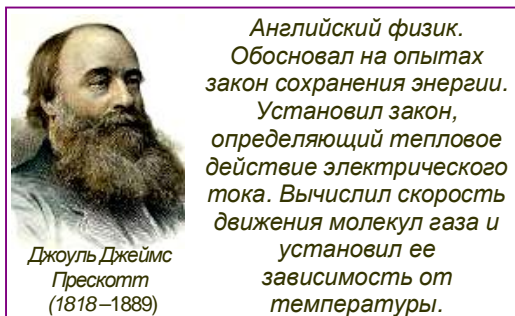
§ 53. НАГРЕВАНИЕ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ – ЛЕНЦА

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} = I U t$$

¹⁰. Электрический ток нагревает проводник. Это явление нам хорошо известно. Объясняется оно тем, что свободные электроны в металлах или ионы в растворах солей, кислот, щелочей, перемещаясь под действием электрического поля, взаимодействуют с ионами или атомами вещества проводника и передают им свою энергию. Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то согласно закону сохранения энергии происходит только нагревание проводника. Нагретый проводник отдает полученную энергию окружающим телам, но уже путем теплопередачи.

2⁰. В этом случае вся работа тока A переходит в тепло Q , выделяемое проводником, по которому течет ток:



$$A = Q. \quad [37]$$

Таким образом, если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, формула [37] определяет количество теплоты Q , передаваемое этим участком цепи другим телам.

В этом случае, подставляя наиболее общее выражение для работы тока [36], получим выражение для тепла Q в виде:

$$Q = UIt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t. \quad [38]$$

3⁰. К этому же выводу, но на основании тщательных опытов впервые пришли независимо друг от друга английский ученый Джеймс Джоуль и русский ученый Эмилий Христианович Ленц. Этот вывод называется **законом Джоуля – Ленца**.

Формулой $Q = I^2Rt$ удобно пользоваться в случае последовательного соединения проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках.

При параллельном соединении удобна формула $Q = \frac{U^2}{R}t$, так как напряжение на всех проводниках одинаково.

4⁰. Обычно закон **Джоуля – Ленца** формулируется так:

количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени.

Уравнение [38] представляет собой просто более универсальный вид этого закона и позволяет вычислить количество теплоты, выделяемое на любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.



Вопросы

1. Как можно объяснить нагревание проводника электрическим током?
2. По какой формуле можно рассчитать количество теплоты, выделяемое проводником с током?
3. Как, пользуясь законом Ома, можно выразить количество теплоты, выделяемое проводником с током, через силу тока, сопротивление проводника и время? Через напряжение, сопротивление и время?
4. Как формулируется закон Джоуля – Ленца? Почему он носит такое название?
5. Напишите уравнение закона Джоуля – Ленца, удобное для последовательного и параллельного соединения проводников.



Упражнение

1. Какое количество теплоты выделится за 30 мин проволочной спиралью сопротивлением 20 Ом при силе тока 5 А?
2. С какой целью провода в местах соединения не просто скручивают, а еще и спаивают? Ответ обоснуйте.

3. Спираль нагревательного прибора — рефлектора при помощи шнура и вилки соединяется с розеткой. Шнур состоит из проводов, подводящих ток к спирали, покрытых изоляцией. Спираль и провода соединены последовательно. Как распределяется подаваемое от сети напряжение между проводами и спиралью? Почему спираль раскаляется, а провода почти не нагреваются? Какими особенностями устройства спирали и проводов достигается эта разница?

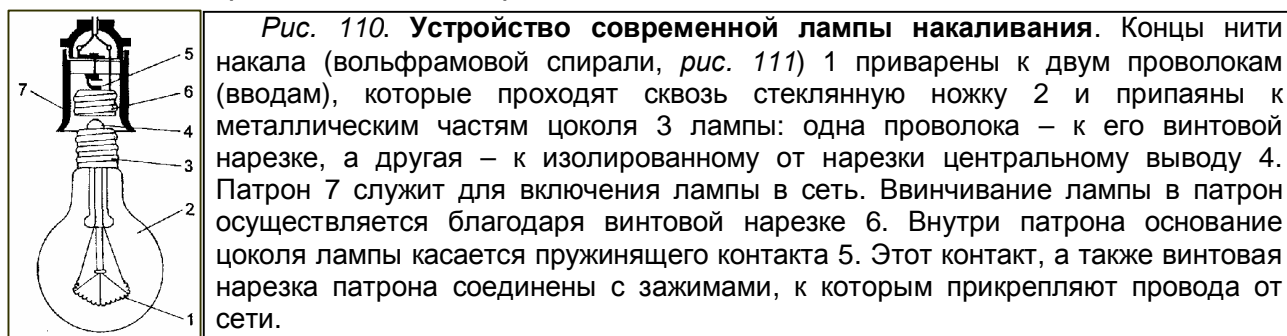
4. В цепь источника тока 4,5 В включены сначала последовательно, а затем параллельно три проволоки одинакового сечения 0,2 мм² и длины 10 м: **медная**, **стальная** и **никелиновая**. Какая из них и в каком случае больше нагреется? Определите количество теплоты, которое выделяется на каждом проводнике в первом и втором случаях.



§ 54. ЛАМПА НАКАЛИВАНИЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

1². Основная часть современной лампы накаливания – спираль из тонкой вольфрамовой проволоки. Вольфрам – тугоплавкий металл, его температура плавления 3387 °С. В лампе накаливания вольфрамовая спираль нагревается до ≈3000 °С. При такой температуре она достигает белого каления и светится ярким светом. Спираль помещают в стеклянную колбу, из которой выкачивают воздух, чтобы спираль не перегорала. Но в вакууме вольфрам быстро испаряется, спираль становится тоньше и тоже сравнительно быстро перегорает. Чтобы предотвратить быстрое испарение вольфрама, современные лампы наполняют инертными газами – азотом, криптоном, аргоном

2⁰. На *рис. 110* изображена газонаполненная лампа накаливания.



Промышленность выпускает лампы накаливания на напряжение 220 В (для осветительной сети), 50 В (для железнодорожных вагонов), 12 В (для автомобилей), 3,5 и 2,5 В (для карманных фонарей).

Если напряжение на лампе окажется меньше номинального, то её мощность уменьшится, и свечение станет менее ярким. Наоборот, при увеличении напряжения по сравнению с номинальным на 1% лампа начнет светить ярче, но срок ее службы сократится на 15%. Если напряжение превысит номинальное на 15%, лампа тут же выйдет из строя.

Почти вся подаваемая в лампу энергия превращается в излучение. Потери за счёт теплопроводности и конвекции малы. Для человеческого глаза, однако, доступен только малый диапазон длин волн этого излучения. Основная часть излучения лежит в невидимом инфракрасном диапазоне и воспринимается в виде тепла. Коэффициент полезного действия ламп

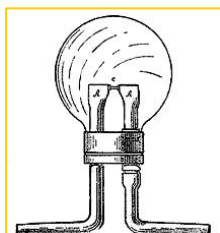


Рис. 111. Спираль лампы мощностью 200 Вт (сильно увеличено)

накаливания достигает (при температуре нити около 3400 К) своего максимального значения 15 %. При практически достижимых температурах в 2700 К (обычная лампа на 60 Вт) КПД составляет 5 %.

С целью экономии электроэнергии во многих странах ведутся интенсивные работы по созданию более экономичных источников света.

3⁰. Лампа накаливания была изобретена в 1872 г. русским электротехником А. Н. Лодыгиным. Основным элементом его первой лампы был тонкий угольный стерженек, нагреваемый током до температуры, при которой он начинал светиться. Эти лампы были недолговечными.



Первая лампа
Лодыгина

Несколько позднее его современник Эдисон в США разработал один из первых коммерчески успешных вариантов электрической лампы накаливания. В ночь на 1 января 1880 г. семьсот эдисоновских ламп осветили здание с лабораторией, где работал изобретатель, а также двор, ворота и окружающий забор. Сотни людей с изумлением наблюдали этот чудесный свет, озаривший все вокруг в эту новогоднюю ночь.



Лампа
Эдисона с
нитью
накала из
угольного
волокна.

Весть об эдисоновском свете быстро распространилась по всей Америке. А еще через некоторое время первая партия ламп (1800 штук) была отправлена в Европу. Новые и удобные источники света стали использовать для электрического освещения улиц, домов и кораблей.

Но Лодыгин, продолжал совершенствовать свою конструкцию: вместо угольной нити он применил вольфрамовую, которая и используется поныне. Через несколько лет этой нити придали зигзагообразную, а затем и спиральную форму и лампа приобрела современный вид.

4⁰. Тепловое действие тока используют в различных электронагревательных приборах и установках. В домашних условиях широко применяют электрические плитки, утюги, чайники, кипятильники. В промышленности тепловое действие тока используют для выплавки специальных сортов стали и многих других металлов, для электросварки. В сельском хозяйстве с помощью электрического тока обогревают теплицы, кормозапарники, инкубаторы, сушат зерно, приготавливают силос.

Основная часть всякого нагревательного электрического прибора — нагревательный элемент, рис. 112.



Рис. 112. Термoeлектрические нагреватели (ТЭН). ТЭН для стиральной машины: а) внешний вид и б) устройство. ТЭН в) для электропаяльника; г) для утюга; для чайника. Электроплита с открытыми термoeлектрическими элементами.

Нагревательный элемент представляет собой проводник с большим удельным сопротивлением, способный, кроме того, выдерживать, не разрушаясь, нагревание до высокой температуры (до 1000–1200 °С). Чаще всего для изготовления нагревательного элемента применяют сплав никеля, железа, хрома и марганца, известный под названием «нихром». Удельное сопротивление нихрома примерно в 70 раз больше удельного сопротивления меди. Большое удельное сопротивление нихрома дает возможность изготавливать из него весьма удобные – малые по размерам – нагревательные элементы.

В нагревательном элементе проводник в виде проволоки или ленты наматывается на пластинку из жароустойчивого материала: слюды, керамики. Так, например, нагревательным элементом в электрическом утюге служит нихромовая лента, от которой нагревается нижняя часть утюга.



Вопросы

1. Пользуясь *рис. 110*, расскажите, как устроена современная лампа накаливания.
2. Из какого металла изготавливают проволоки для спиралей ламп?
3. Зачем баллоны современных ламп накаливания наполняют инертным газом?
4. Как устроен патрон для включения лампы накаливания в сеть?
5. Назовите первых изобретателей электрического освещения с помощью ламп накаливания.
6. Приведите примеры использования тепловых действий тока.
7. Какими свойствами должен обладать металл, из которого изготавливают спирали или ленты нагревательного элемента?
8. Какие известные вам материалы обладают необходимыми для нагревательного элемента свойствами?



Задание

Подготовьте доклад на одну из тем (по выбору).

1. История развития электрического освещения.
2. Использование теплового действия электрического тока в устройстве теплиц и инкубаторов.

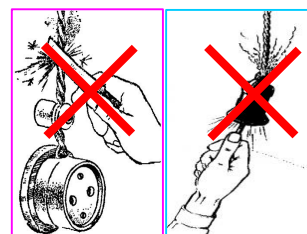


§ 55. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ



1⁰. Электрические цепи всегда рассчитаны на определенную силу тока. Если по этой или иной причине сила тока в цепи становится больше допустимой, то провода могут значительно нагреться, а покрывающая их изоляция – воспламениться.

Причиной значительного увеличения силы тока в сети может быть или одновременное включение мощных потребителей тока, например электрических плиток, или короткое замыкание.



Коротким замыканием называют соединение концов участка цепи проводником, сопротивление которого очень мало по сравнению с сопротивлением этого участка цепи.

Рис. 113. Работа под напряжением может привести к короткому замыканию и поражению током

Короткое замыкание может возникнуть, например, при ремонте проводки под током (*рис. 113*) или при случайном соприкосновении оголенных проводов.

2⁰. Сопротивление цепи при коротком замыкании незначительно, поэтому в цепи возникает большая сила тока, провода при этом могут сильно нагреться и стать причиной пожара. Чтобы избежать этого, в сеть включают **предохранители**.

Электрический предохранитель — устройство, выполняющее защитную функцию. Предохранитель защищает электрическую цепь и её элементы от перегрева и возгорания при протекании тока слишком большой силы («сверхтока»). Предохранитель должен сразу отключить линию, если сила тока вдруг окажется больше допустимой нормы.

Предохранители устанавливают на входе в квартиру или служебные помещения на специальном щитке. В каждый из проводов последовательно включают отдельный предохранитель. Кроме того их устанавливают на входе электрических проводов в электрические установки и электронные приборы.

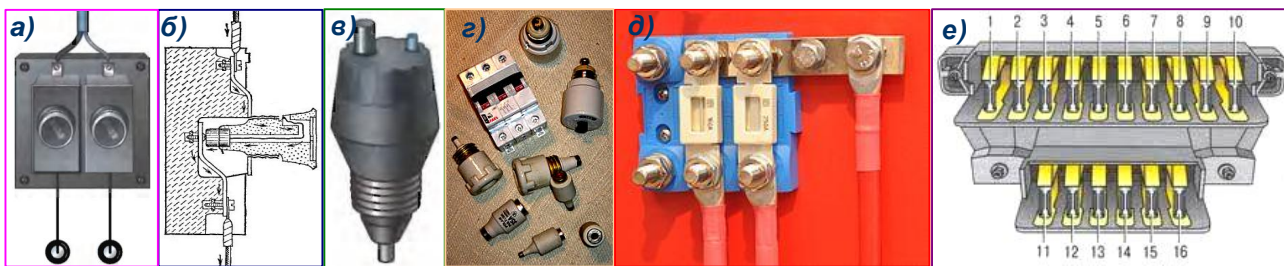


Рис. 114. Электрические предохранители. Предохранители на щитке а) при вводе проводов в квартиру; б) устройство плавкого предохранителя («пробки»); в) автоматический выключатель – предохранитель, действие которого основано не на плавлении, а на тепловом расширении тел при нагревании («автоматическая пробка»); г) предохранители различного назначения; д) плавкие предохранители на яхте. е) плавкие предохранители на автомобиле.

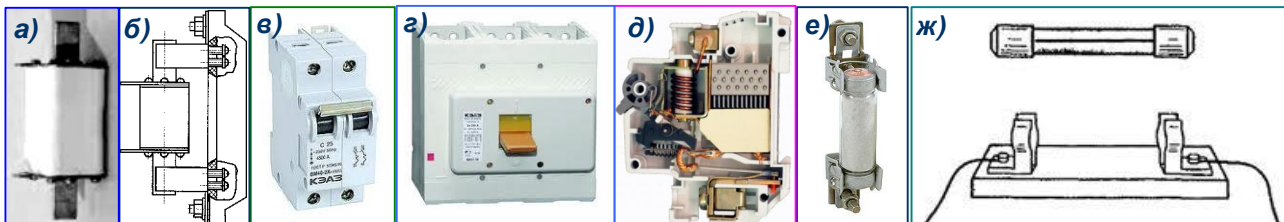


Рис. 115. Электрические предохранители. а) вставка ножевого предохранителя на ток большой силы; б) ножевой предохранитель на щитке; в) автоматический выключатель; г) автоматический выключатель трёхфазного тока. д) внутреннее устройство автоматического выключателя. е), ж) плавкие предохранители для тока небольшой силы, используемые в приборах.

Конструкции предохранителей определяются, прежде всего, допустимой силой тока для каждой конкретной электрической цепи, рис. 114 – 115.

Предохранители с плавящимся проводником называют **плавкими предохранителями**. Они обычно изготавливаются из медной проволоки, покрытой оловом. Если сила тока превысит допустимое значение, то проволока расплавится и цепь окажется разомкнутой.

Предохранители, действие которых основано не на плавлении, а на *тепловом расширении тел* при нагревании, называют **автоматическими выключателями**. При возникновении неисправности в цепи это устройство отключается автоматически. Основу таких предохранителей обычно составляет *биметаллическая пластинка*.

В цепи электрические предохранители обозначается буквами «FU» (международное обозначение, от слова англ. *Fuse*) или «Пр» (обозначение в СССР) и прямоугольником со сплошной линией в центре, рис. 60.

3⁰. Выбор предохранителя должен происходить исходя из технических возможностей проводки защищаемого электрооборудования. Иногда при отсутствии необходимого предохранителя, или с целью сознательного обхода защиты, используют металлическую перемычку между контактами – «жучок». Однако следует иметь в виду, что выгорание предохранителя свидетельствует о наличии серьёзных проблем в электрической цепи, в частности, о коротком замыкании. Замена штатного предохранителя «жучком» может привести к выходу из строя дорогих электрических устройств и к возгоранию. Последнее часто является причиной пожаров, рис. 116.

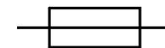
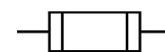


Рис. 116. Пожары в результате короткого замыкания электропроводки в квартире, автомобиле, на яхте.



Вопросы

1. Что может случиться с проводом, если сила тока превысит допустимую норму?
2. Что может служить причиной значительного увеличения силы тока в сети?
3. В чем причина короткого замыкания?
4. Чем объяснить, что при коротком замыкании сила тока в цепи может достигнуть огромного значения?
5. Для какой цели служат предохранители, включаемые в сеть?
6. Какие бывают предохранители?
7. Как устроен плавкий предохранитель?
8. На чём основана работа автоматического выключателя?
9. Как обозначаются электрические предохранители?
10. Что такое «жучёк»? Чем опасно его применение?



Символы
обозначения
предохранителя



ПРИЛОЖЕНИЕ №1

ВНЕШНИЙ И ВНУТРЕННИЙ УЧАСТКИ ЦЕПИ. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС). ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ И СЛЕДСТВИЯ ИЗ НЕГО

1⁰. Цепь, по которой идёт ток, является замкнутой. В ней можно выделить два участка: **внешний** и **внутренний**. Внешний участок (**ВА**) составляют различные **потребители**, а внутренний участок (**АВ**) содержит источник тока³, *рис. 117*.

2⁰. Чтобы в цепи шёл ток, необходимо создать и поддерживать разность потенциалов на каждом участке замкнутой цепи. Это делает источник тока. Суммарная разность потенциалов на внешнем и внутреннем участках цепи, создаваемая **источником тока**, называется **электродвижущей силой**; сокращённо – ЭДС. Она обозначается буквой **E**.

E – постоянная величина, зависящая от особенностей источника тока.

3⁰. **Работа сторонних сил**. ЭДС, создаваемая источником тока в электрической

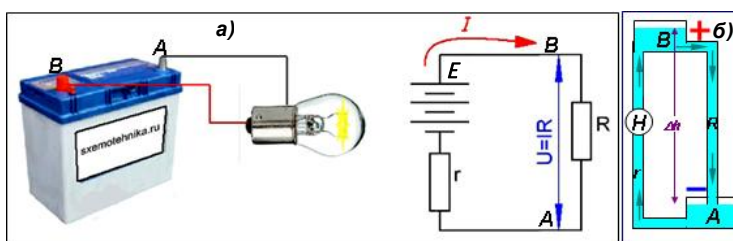


Рис. 117. Полная (замкнутая) электрическая цепь (а) и её гидравлический аналог (б).

АВ – внутренний; **ВА** – внешний участки цепи.

Источник тока (аккумулятор) создаёт ЭДС, обеспечивая движение электронов. Гидравлический насос (Н) создаёт напор воды, обеспечивая её циркуляцию.

ЭДС источника тока – это разность потенциалов, создаваемая источником тока, численно равная работе по перемещению единичного положительного заряда вдоль всей замкнутой цепи.

цепи, подобна напору воды, создаваемому гидравлическим насосом в гидравлической цепи, *рис. 117, б*. Для создания ЭДС источником тока, как и для создания и поддержания напора воды гидравлическим насосом, необходимо

³ Деление полной цепи на внешний **ВА** и внутренний **АВ** участки – условно: каждый из них может содержать провода, связанные с *источником* тока и с *нагрузкой* соответственно.

совершать работу какими-то *внешними силами*. Эти внешние силы F_{cm} принято называть **сторонними**, а совершаемую ими работу A_{cm} – **работой сторонних сил**.

Если во внешней цепи заряды перемещаются под действием электрического поля E , то внутри самого источника заряды должны перемещаться против сил поля. Поэтому, эти силы должны иметь неэлектростатическую природу. Они могут быть механическими, как в электрофорной машине, химическими, как в гальваническом элементе, магнитными, как в генераторе тока.

ЭДС равна работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри источника тока от одного полюса к другому.

Из закона сохранения энергии следует, что работа тока в замкнутой цепи должна быть равна работе сторонних сил

$$A_{cm} = E q = E I t$$

Например, в гальванических элементах работа сторонних сил совершается за счёт энергии, которая выделяется при химических процессах растворения электродов в электролите, *рис. 117, а*. В небольшом электромагнитном генераторе тока работа сторонних сил может совершаться за счёт убыли потенциальной энергии груза – опускающейся гири, *рис. 118*. На электростанциях для вращения электрогенераторов, создающих ЭДС, используют энергию воды, ветра, топлива.

Во всех рассмотренных случаях работа сторонних сил идёт на создание и поддержание ЭДС источника тока.

4°. ЭДС так же, как и напряжение, измеряется в вольтах.

Обычный гальванический элемент («батарейка») имеет ЭДС 1,5 В, а батарея автомобильного аккумулятора – 12 В.

5°. В замкнутой цепи электрический ток I последовательно протекает по внешнему и по внутреннему участкам цепи, *рис. 117, 118*. Источник тока обладает сопротивлением, поэтому падение напряжения существует как на внешнем, так и на внутреннем участках цепи. Иными словами, ЭДС в замкнутой цепи уравнивается падениями напряжения на этих участках:

где $IR=U$ – падение напряжения на внешнем участке (**BA**) цепи, а $\Delta U = Ir$ – падение

$$E = IR + Ir = U + \Delta U = I(R + r), \quad [38]$$

напряжения на внутреннем участке (**AB**) цепи.

ЭДС – это сумма разностей потенциалов по всей замкнутой электрической цепи.

6°. Если цепь разомкнута ($R \rightarrow \infty$), и ток не идет ($I \rightarrow 0$), ЭДС равна разности потенциалов между клеммами источника тока:

$$U = E.$$

Когда ток в цепи есть, внешняя разность потенциалов U уменьшается (*рис. 119*):

$$U < E.$$

ЭДС источника тока равна сумме падений напряжения на внешнем и внутреннем участках замкнутой цепи.

Величину $U=IR$ называют *напряжением на зажимах источника*. Именно его показывает вольтметр, измеряющий напряжение источника между началом и концом внешнего участка цепи (**BA**). Оно всегда меньше ЭДС на величину $\Delta U = Ir$, см. *рис. 119*.

7°. Поскольку мерой работы источника, отнесённой к единице заряда, является ЭДС источника, приведенное равенство является непосредственным выражением *закона сохранения энергии* в применении к замкнутой электрической цепи.

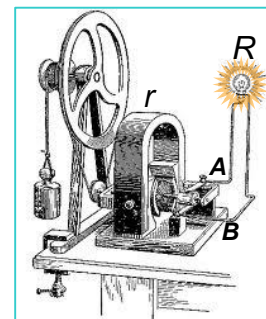
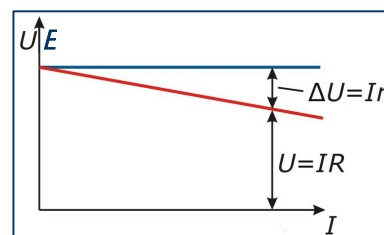


Рис. 118. Сила тяжести гири совершает работу, вращая генератор, создающий ЭДС.



*Рис. 119. Падения напряжения в замкнутой цепи: $\Delta U = Ir$ – на внутреннем участке цепи; $U = IR$ – напряжение на зажимах источника тока (**BA**)*

Действительно, источник тока совершает работу по разделению зарядов, в результате которой возникает электрическая энергия. Эта энергия равна сумме работ, совершаемых током во внешнем и внутреннем участках цепи.

В гидравлической цепи гидравлический насос аналогичным образом поддерживает разность уровней воды. Чтобы обеспечить циркуляцию воды, он вынужден преодолевать сопротивления внутреннего и внешнего участков гидравлической цепи.

8°. Приведённую выше формулу [38] можно, очевидно, переписать так:

$$I = \frac{E}{R+r} \quad [38]^*$$

В таком виде она выражает **закон Ома для полной цепи**, который читается так:
сила тока в полной (замкнутой) цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению электрической цепи.

9°. Следствия из закона Ома для полной цепи:

1. Если $R \gg r$, то величиной r можно пренебречь. Тогда $E=IR=U$. Это означает, что E можно измерить, если подключить вольтметр с очень большим сопротивлением R к источнику тока, не подключённому к внешней цепи.

2. Если $R \ll r$, то можно пренебречь величиной R . Тогда ток в замкнутой цепи будет максимальным. Это и есть **ток короткого замыкания**:

$$I_{к.з.} = E/r. \quad [39]$$

3. Если R растёт, то согласно [38]*, ток I в цепи уменьшается. При уменьшении силы тока I в цепи напряжение на зажимах источника U увеличивается, так как $U = E - Ir$, см. график на *рис. 119*.

10°. **КПД цепи**. Умножая правую и левую части уравнения [38] на силу тока I , получим уравнение для мощности тока, текущего по цепи:

$$P = P_n + P_m, \quad [40]$$

Здесь $P = IE$ – мощность полная (во всей цепи);

$P_n = I^2 R$ – мощность полезная (во внешней части цепи);

$P_m = I^2 r$ – мощность, теряемая в виде теплоты в окружающую среду на внутреннем участке цепи.

Иногда используется понятие коэффициента полезного действия – КПД цепи:

$$\eta = P_n / P = R / (R+r) = U / (U + \Delta U) \leq 1 \quad [41]$$

Из последней формулы следует, что внутреннее сопротивление r источника тока (и подводящих проводов) целесообразно делать как можно меньше, *рис. 120*.

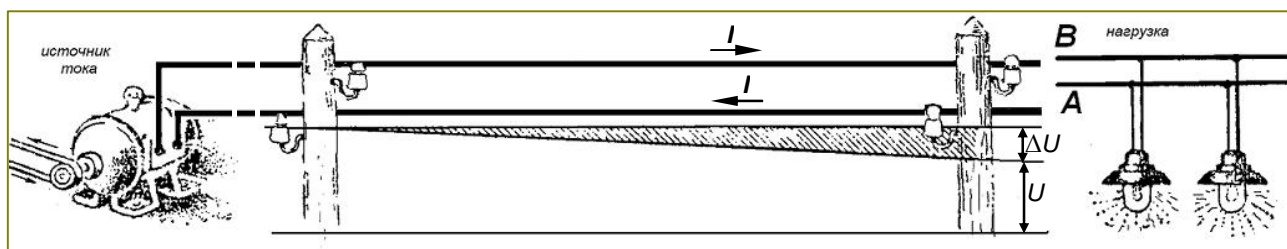
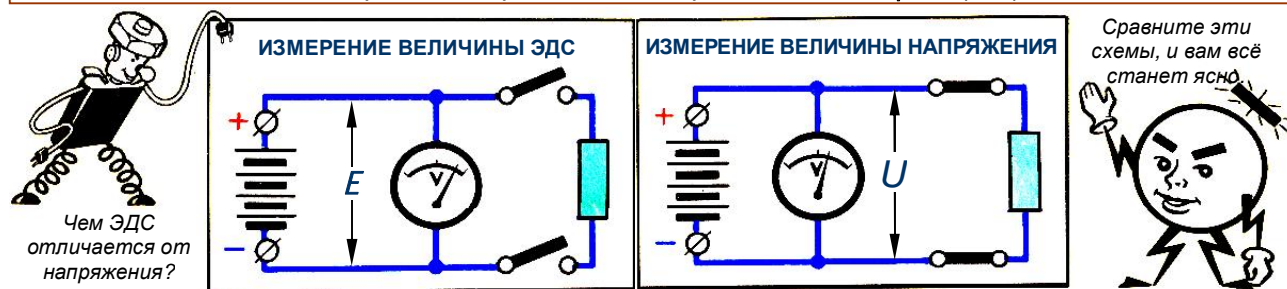


Рис. 120. Потеря напряжения ΔU при передаче электричества от источника тока к нагрузке. Здесь BA – внешний; AB – внутренний участки цепи. КПД передачи энергии падает с ростом r , т. к. $\eta = R/(R+r)$.



ПРИЛОЖЕНИЕ №2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Растворы и расплавы веществ, содержащих ионы и проводящие электрический ток, называются **электролитами**. К ним относятся водные растворы кислот, оснований и солей, а также расплавы солей.

1⁰. **Электролитическая диссоциация.** При растворении электролитов под влиянием электрического поля полярных молекул воды происходит распад молекул электролитов на ионы. Молекулы растворимых веществ состоят из взаимосвязанных ионов противоположного знака (например, Na^+Cl^- , H^+Cl^- , $\text{Cu}^{++}\text{SO}_4^{--}$ и т. д.). Силы притяжения между этими ионами обеспечивают целостность таких молекул. Но взаимодействие этих молекул с полярными молекулами растворителя, например воды, приводит к ослаблению взаимного притяжения противоположно заряженных ионов, *рис. 121*.

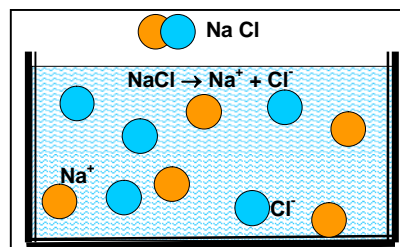
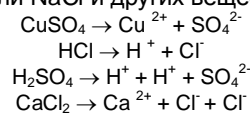


Рис. 121. Диссоциация поваренной соли NaCl и других веществ:



Распад нейтральных молекул растворенного вещества на **положительные** и **отрицательные** ионы под действием растворителя называется **электролитической диссоциацией**.

Степень диссоциации α называется отношение числа молекул ΔN , диссоциировавших на ионы, к общему числу N молекул вещества:

$$\alpha = \frac{\Delta N}{N} \cdot [42]$$

Степень диссоциации, зависит от температуры, концентрации раствора и электрических свойств растворителя. С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.

При диссоциации ионы **металлов** и **водорода** H^+ всегда заряжены **положительно**, а ионы **кислотных радикалов** и **группы** OH^- – **отрицательно**.

Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы – **рекомбинировать**. При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся за секунду на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь объединяются в нейтральные молекулы.

2⁰. Ионы в электролите движутся хаотично, но при создании электрического поля характер движения становится упорядоченным: **положительные** ионы (**катионы**) движутся к катоду, **отрицательные** ионы (**анионы**), *рис. 122*. Таким образом, ток в электролитах обусловлен движением **положительных** и **отрицательных ионов**.

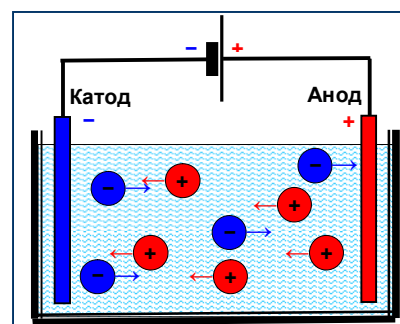


Рис. 122. Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение **положительных** и **отрицательных ионов**

3⁰. Электролиты называются **проводниками II рода**, то есть проводниками с **ионной проводимостью** (в отличие от металлов - проводников I рода, обладающих электронной проводимостью).

Протекание тока через электролит сопровождается переносом вещества и выделением на электродах веществ, входящих в состав электролита. Положительные ионы (**катионы**) – ионы металлов и водородные ионы – движутся к **катоду**, отрицательные ионы (**анионы**) – кислотные остатки и гидроксильные группы OH^- – движутся к **аноду**.

4⁰. **Ток насыщения.** При малом напряжении на электродах лишь малое число ионов будет достигать электродов, поэтому сила тока будет невелика. С ростом напряжения все большее число ионов вовлекается в упорядоченное движение к электродам, поэтому ток будет увеличиваться. При достаточно большом напряжении все ионы будут вовлечены в упорядоченное движение. Ток, соответствующий этому состоянию, называется **током насыщения**. Если продолжить повышение напряжения, то будет расти скорость упорядоченного движения ионов, однако число ионов, достигающих электродов в единицу времени, останется постоянным. Поэтому сила тока, протекающего через электролит, останется неизменной, *рис. 123*.

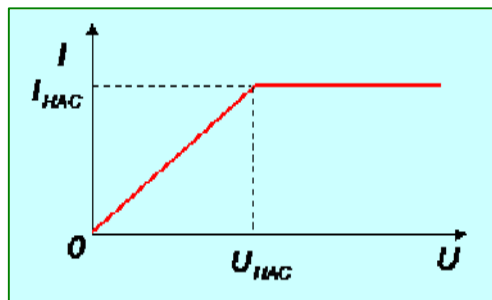
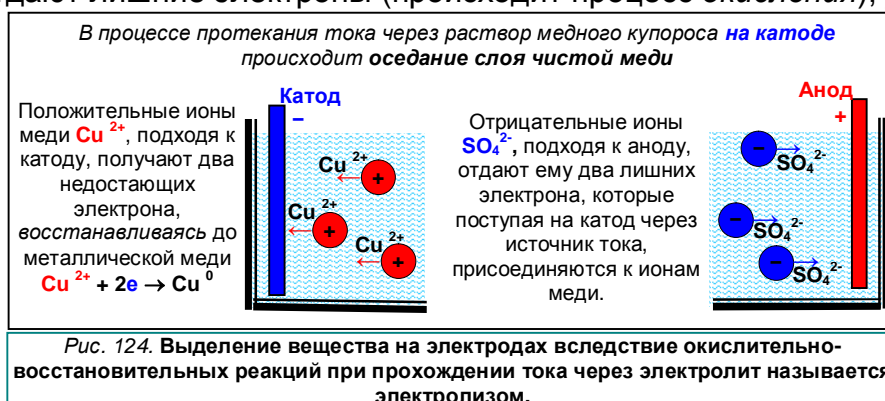


Рис. 123. Вольтамперная характеристика электролита

Чтобы в состоянии насыщения повысить силу тока, необходимо увеличить степень диссоциации электролита, для чего его следует нагреть. Число ионов при нагревании увеличится, и сила тока возрастет.

5⁰. **Электролиз.** При электролизе положительно заряженные ионы (**катионы**) движутся к **катоду** и приобретают на нем недостающие электроны. Происходит процесс **восстановления**. В то же время отрицательные ионы (**анионы**) движутся к **аноду**, где отдают лишние электроны (происходит процесс **окисления**), *рис. 124*.



6⁰. **Закон электролиза.** В 1843 году Фарадей, исследуя явление электролиза, установил **закон электролиза**:

масса вещества m , выделившегося на электроде, пропорциональна заряду q , прошедшему через электролит

$$m = kq \quad [43],$$

где k — коэффициент, зависящий от массы и заряда ионов металла.

Электролиз (от греч. «лизис» — *разложение, растворение, распад*) — это совокупность физико-химических явлений на находящихся в жидкости электродах при прохождении электрического тока.

Так как $q = It$, то

$$m = kIt. \quad [43]^*$$

Величина k называется **электрохимическим эквивалентом** данного вещества и обычно выражается в миллиграммах на кулон (**мг/Кл**).

Измеряя величины m и $q = It$, можно из формулы [43], определить электрохимические эквиваленты различных веществ (см. табл.).

Вещество	k в мг/Кл
Ag^{+1} (серебро)	1,118
H^{+1} (водород)	0,01045
Cu^{+2} (медь)	0,3294
Zn^{+2} (цинк)	0,3388

7⁰. Электрохимический эквивалент имеет простой физический смысл: он равен отношению массы иона m_{0i} к его заряду q_{0i} :

$$k = m_{0i}/q_{0i} = \frac{M}{neN_A} \cdot [44]$$

Здесь M – молярная (или атомная) масса вещества; N_A – число Авогадро, т. е. число ионов в одном моле; n – валентность иона; e – элементарный заряд. Очевидно, что

$$q_{0i} = en; \quad m_{0i} = M/N_A.$$

Таким образом, закон электролиза можно записать и так:

$$m = (m_{0i}/q_{0i})It. \quad [43]**$$

8⁰. Убедиться в справедливости закона Фарадея можно на опыте. Соберем установку, показанную на рис. 125. Все три электролитические ванны заполнены одним и тем же раствором электролита, но токи, проходящие через них, различны. Обозначим силы токов через I_1, I_2, I_3 . Тогда $I_1 = I_2 + I_3$. Измеряя массы m_1, m_2, m_3 веществ, выделившихся на электродах в разных ваннах, можно убедиться, что они пропорциональны соответствующим силам токов I_1, I_2, I_3 .

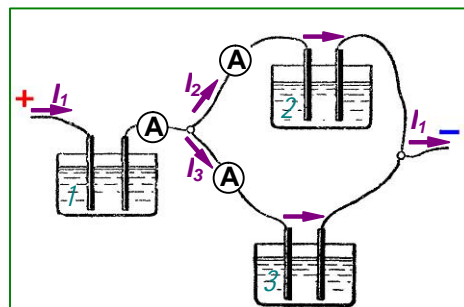


Рис. 125. Схема установки для проверки закона электролиза

9⁰. **Определение элементарного заряда.** Из формул [43]* и [44] следует, что модуль заряда электрона равен:

$$e = \frac{M}{mnN_A} \cdot It \quad [45]$$

Зная массу m выделившегося вещества при прохождении заряда It , молярную массу M , валентность атомов n и постоянную Авогадро N_A , можно найти значение модуля заряда электрона. Оно оказывается равным $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Именно таким путем и было впервые в 1874 году получено значение элементарного электрического заряда.

10⁰. **Примеры применения электролиза:** прочитайте и рассмотрите рис. 126-129.

Чтобы с помощью электролиза разложить воду на водород и кислород, проще всего добавить 2-4% серной кислоты, так как совершенно чистая вода практически не содержит ионов и, следовательно, тока не пропускает. Погрузив в воду два электрода и подключив их к аккумулятору, мы обнаружим, что у электродов выделяются пузырьки – это газы водород и кислород. Они быстро поднимаются вверх и могут быть собраны в перевернутых пробирках, рис. 126. При образовании значительного количества газов, заметно уменьшение масса воды – она разлагается.

Если электроды погружать не в воду, а в растворы или расплавы солей, кислот и щелочей, то можно наблюдать выделение других газов и твердых веществ, оседающих на поверхности электродов. По этой причине электролиз широко применяют в технике.

Электролитическим путём в промышленности получают многие металлы: алюминий, медь, магний, хром, титан и др. Например, для получения чистого алюминия в специальную металлическую ванну вливают расплавленную при 900 °С руду, содержащую алюминий в химически связанном виде (обычно в виде оксидов). В ванну опускают угольные стержни, которые служат анодами, а сама ванна – катодом. При прохождении тока через расплав на дне ванны выделяется жидкий алюминий, который сливают через отверстие внизу ванны. При помощи электролиза получают алюминий из расплава бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешевым и наряду с железом самым распространенным в технике и быту.



Рис. 126. Электролитическое разложение воды с добавлением 2% кислоты

Медь, применяемая в электротехнике и радиотехнике должна быть чистой. Для очистки (**рафинирования**) меди от примесей в электролитическую ванну заливают раствор сульфата меди II (**медный купорос**) и опускают две пластины: анод – толстую пластину из неочищенной меди и катод – тонкий лист из чистой меди. При пропускании электрического тока анод постепенно растворяется,

примеси выпадают в осадок, а на катоде оседает чистая медь. Аналогичным способом получают и другие чистые металлы – никель, свинец, золото.

Для придания изделиям красивого внешнего вида, прочности, предохранения от коррозии, их покрывают тонким слоем какого-либо металла – никеля, хрома и других металлов, используя электролиз. Получается прочное покрытие. Этот процесс называют **гальваностегией**.

Если обеспечить хорошее отслаивание электролитического покрытия от поверхности, на которую осаждается металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), то можно получить копию с рельефной поверхности.

Русским ученым Б. С. Якоби (1801-1874) был разработан метод изготовления копий изделий с помощью электролитического осаждения металла – **гальванопластика**. В 1836 году этот способ был использован для изготовления полых фигур для Исаакиевского собора в Петербурге.

Гальванопластику используют для изготовления копий изделия.

Если резное металлическое изделие поместить в раствор электролита и включить ток, то наиболее сильное электрическое поле образуется у микроскопических выступов на поверхности этого изделия. Если оно подключено к «+» источника тока, то наиболее интенсивно ионы металла будут «вырываться» именно из выступов, и поверхность металла выровняется. Так осуществляют **гальванополировку**.

Электролиз используется и в медицине. Это лечебная процедура, называется **электрофорез** (от греч. «форезис» – перенесение), Электроды накладывают на тело человека. Между телом и электродом помещают бумагу или ткань, пропитанную электропроводящим лекарственным препаратом. При включении тока начинается движение заряженных частиц из бумаги или ткани в кожу, а затем в тело человека. Так происходит процесс ввода лекарств, скорость которого можно регулировать, изменяя силу тока.

С помощью электролиза получают электронные платы, служащие основой всех электронных изделий. На диэлектрик наклеивают тонкую медную пластину, на которую наносят особой краской сложную картину соединяющих проводов. Затем пластину помещают в электролит, где вытравливаются незакрытые краской участки медного слоя. После этого краска смывается, а на плате появляются детали микросхемы.

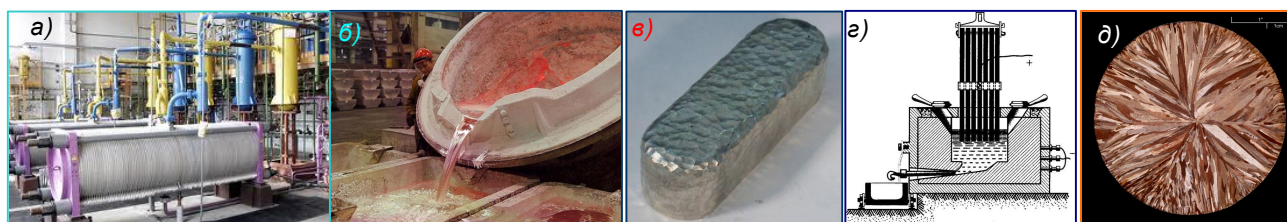


Рис. 127. Примеры применения электролиза. а) промышленные установки для разложения воды и получения водорода; б) разлив рафинированной меди; в) рафинированное олово; г) получение чистого алюминия; д) рафинированная медь.



Рис. 128. а) Установка для гальванопластического покрытия медью середины XIX века; б) Позолота методом гальваностегии; в) Металлические детали с различными покрытиями электрохимическим способом; г) Получение гальванопластической копии-пуансона.

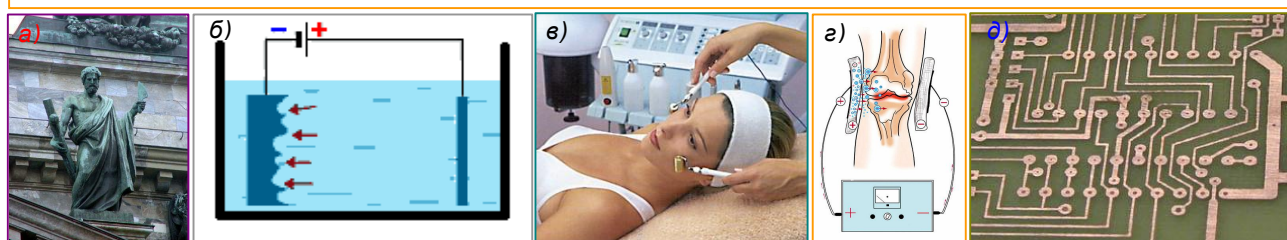


Рис. 129. а) Статуи Исаакиевского собора, выполненные Якоби; б) схема гальвано полировки; в) процедура электрофореза; г) электрофорез сустава (схема); д) электронная плата.

Электролиз применяют также и для синтеза различных неорганических и органических веществ; это изучается в отдельной науке – **электрохимии**.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

1⁰. При нормальных условиях газы не проводят электрический ток и используются как изоляторы, *рис. 130*. Они не содержат носителей свободных зарядов – электронов и ионов. Чтобы газ стал проводником, его необходимо ионизировать.

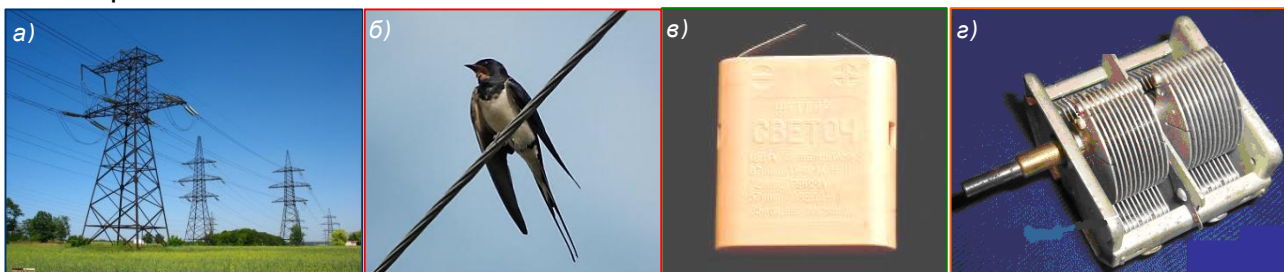
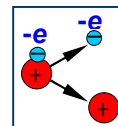


Рис. 130. При обычных условиях воздух диэлектрик. Поэтому возможны воздушные линии электропередачи (а). Птицы могут сидеть на проводах с высоким напряжением (б). Батарейка не разрезается, так как её полюса изолированы друг от друга (в). Ротор и статор конденсатора тоже изолированы друг от друга (г).

2⁰. **Ионизация** – процесс вырывания одного или нескольких электронов из молекул (атомов), в результате которого образуются положительные ионы (*рис. справа*). Если молекула (атом) газа присоединит к себе электроны, образуется отрицательный ион. Какое-то количество электронов остаётся свободными. Таким образом, в газах возникает *ионно-электронная* проводимость.



Чтобы оторвать электроны от молекул (атомов) необходима **энергия ионизации (энергия связи) $W_{и}$** , которая может быть получена за счёт нагревания (*термическая ионизация*); *излучения* (ультрафиолетового, рентгеновского, космического).

В атомной физике для измерения энергии используют **электрон-вольт (1 эВ)**.

1 эВ - энергия, которую приобретает электрон, ускоряясь в электрическом поле между двумя точками поля с напряжением 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Например, для атома водорода энергия связи $W_{и} = 13,6 \text{ эВ}$.

На *рис. 131* показаны примеры ионизации газа *внешними ионизаторами* – нагреванием и рентгеновским излучением.

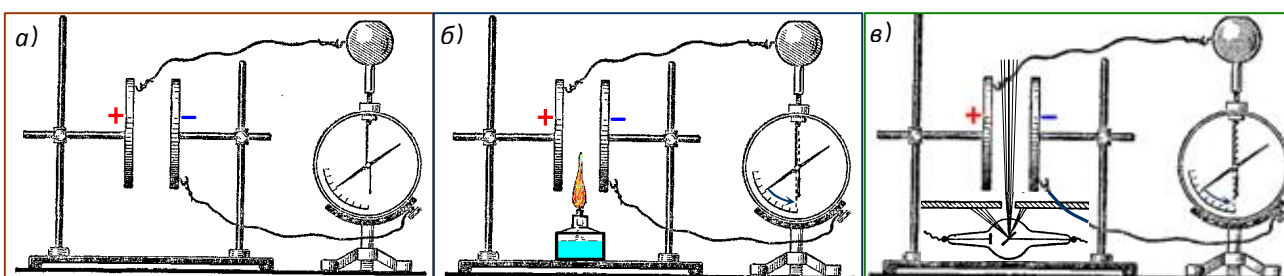
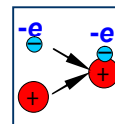


Рис. 131. Несамостоятельная проводимость газов. а) заряженные пластины конденсатора, разделённые воздушным промежутком сохраняют заряд: электрометр регистрирует напряжение между пластинами; б) термическая ионизация газа: пламя спиртовки ионизирует воздух между пластинами – стрелка электрометра быстро приближается к нулевой отметке: конденсатор разряжается; в) ионизация газа рентгеновским излучением: электрометр регистрирует разряд конденсатора.

Процесс прохождения электрического тока через газ называют **газовым разрядом**.

3⁰. **Рекомбинация**. Если ионизатор перестанет действовать, то можно заметить, что заряженный электрометр снова будет сохранять заряд. Это показывает, что после прекращения действия ионизатора газ перестаёт быть проводником. Ток прекращается после того, как все ионы и электроны достигнут электродов. Кроме того, при сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь

образовать нейтральный атом (рис. справа). Такой процесс называют **рекомбинацией** заряженных частиц.



В отсутствие внешнего поля заряженные частицы исчезают только вследствие рекомбинации, и газ становится диэлектриком. Если действие ионизатора не прерывается, то устанавливается динамическое равновесие, при котором среднее число вновь образующихся пар заряженных частиц равно среднему числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

4⁰. Ионизация за счёт действия достаточно **сильного электрического поля** между электродами не требует действия внешних ионизаторов (нагрева, излучения) и сама по себе может приводить к мощным самостоятельным газовым разрядам.

Дело в том, что в любом газе содержится незначительное количество свободных электронов и ионов. Ускоряясь под действием электрического поля, электрон на расстоянии *длины свободного пробега* (так называют путь частицы между двумя последовательными столкновениями) набирает энергию (рис. справа). Если кинетическая энергия электрона, подлетающего к атому, окажется больше энергии ионизации W_i электронов в атоме, то атом будет ионизован.

Так в газе возникают дополнительные ионы и электроны. При этом чрезвычайно важно, что процесс ионизации при достаточно высокой напряжённости поля носит **лавинный** характер.

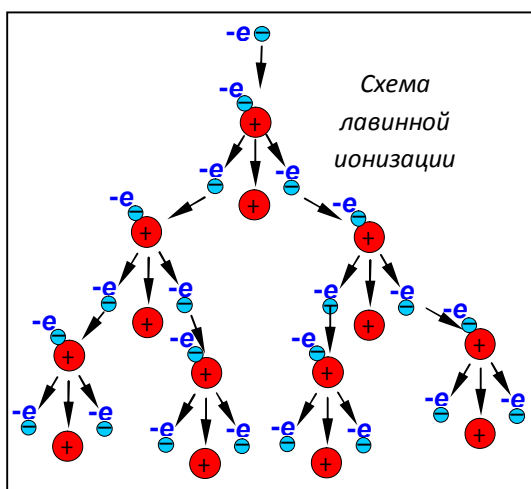


Рис. 132. Здесь схематично показано, как быстрый электрон, разбив нейтральный атом, вызвал целую лавину ионов и электронов. Образовалось огромное число свободных заряженных частиц. Теперь уже внешний ионизатор не нужен. Основными поставщиками ионов и электронов становятся нейтральные атомы.

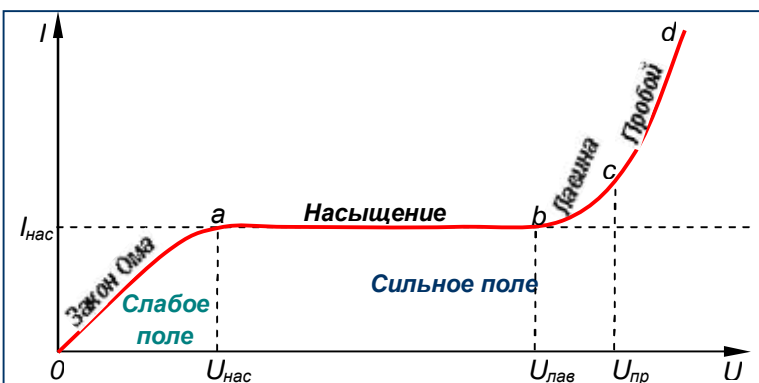


Рис. 133. Вольтамперная характеристика газового разряда. При наличии внешнего ионизатора с увеличением U растёт число заряженных частиц, достигающих второго электрода. На участке $0a$ сила тока I растёт практически пропорционально напряжению U . Возрастание силы тока I наблюдается вплоть до значения напряжения $U=U_{нас}$, при котором все заряженные частицы, образующиеся в объёме газа, достигают второго электрода. При этом $I=I_{нас}$. На участке ab кривой ток не меняется: $I=I_{нас}$. Крутое возрастание тока на участке bc кривой связано с возникновением ударной лавинной ионизации, которая при дальнейшем росте напряжения ведёт к пробое диэлектрика: участок кривой cd .

5⁰. Основной характеристикой газового разряда является зависимость силы тока I от напряжения U на электродах – вольтамперная характеристика газового разряда, рис. 133.

Процесс прохождения тока через газ при постоянном воздействии внешнего ионизатора (нагрев, излучение) называется **несамостоятельным разрядом**, так как при прекращении действия ионизатора прекращается и ток в газе. На рис. 133 это соответствует участку кривой $0ab$.

6⁰. Если после точки b продолжать увеличивать напряжение U , то сила тока I станет резко возрастать (см. участок bcd). Это означает, что в газе появились дополнительные ионы сверх тех, что образовывались за счёт действия внешнего ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, что происходит

благодаря лавинному росту числа заряженных частиц, *рис. 132*. Внешний ионизатор в этом случае становится ненужным.

Так происходит переход несамостоятельного (нуждающегося во внешнем ионизаторе) разряда в **самостоятельный разряд**, который не нуждается во внешнем ионизаторе.

7⁰. Величина $U_{лав}$ существенно зависит от давления газа. Дело в том, что электрон, разгоняясь на пути свободного пробега, приобретает кинетическую энергию $0,5 \cdot m_e v^2$ тем большую, чем больше длина свободного пробега l . Ведь сила электрического поля eE , разгоняя электрон, совершают над ним работу $eEl = 0,5 \cdot m_e v^2 = W_u$.

Но с уменьшением давления газа, длина свободного пробега частиц возрастает обратно пропорционально давлению газа:

$$W_u \sim E/p.$$

Поэтому самостоятельный разряд возникает при меньших напряжениях везде, где давление газа (воздуха) меньше – в верхних слоях атмосферы, в вакуумных трубках.

8⁰. Рассмотрим несколько видов самостоятельных разрядов: тлеющий, коронный, искровой, дуговой.

1. **Тлеющий разряд** происходит в разряженном газе. Чем меньше плотность (давление) газа, тем меньшее напряжение (разность потенциалов) требуется для его возбуждения. Поэтому для получения тлеющего разряда используют трубку, в которой создан вакуум – **разрядную трубку**, *рис. 134*.

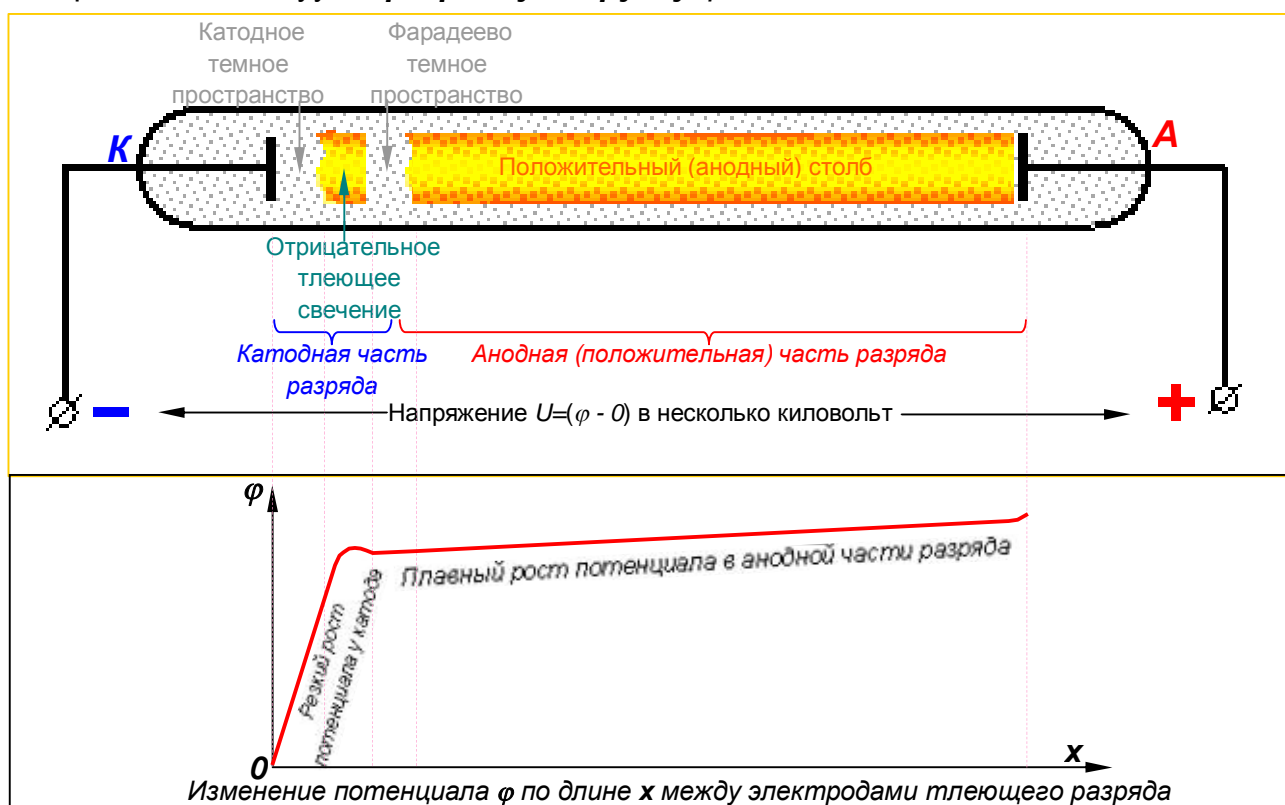


Рис. 134. Тлеющий разряд возникает при давлениях в несколько десятков мм. рт. ст. и сопровождается свечением. В области свечения происходит ударная ионизация. Образующиеся при этом электроны устремляются к аноду, а положительные ионы – к катоду. Проходя область катодного падения потенциала, они приобретают вблизи катода большую кинетическую энергию и, ударяясь о катод, выбивают из него электроны, которые тоже устремляются к аноду. Таким образом, тлеющий разряд вызывается двумя видами ионизации: ударной ионизацией и выбиванием электронов катода положительными ионами (*вторичная ионизация*).

Свечение при тлеющем разряде объясняется тем, что при рекомбинации молекул газа, сопровождающей их ионизацию, энергия освобождается в виде излучения. Это так называемое **свечение рекомбинации**.

Газоразрядные трубки, светящиеся различными цветами, применяются для декоративных целей, для рекламы, *рис. 135*.

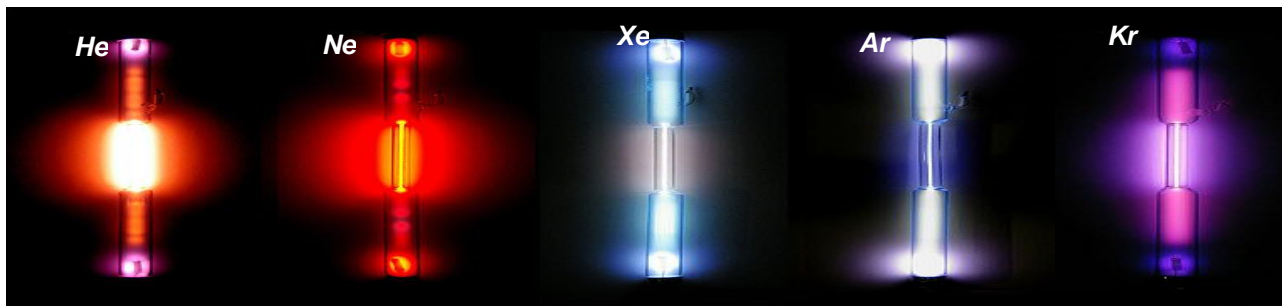


Рис. 135. Разрядные трубки со светящимися инертными газами – гелием (He), неонem (Ne), аргоном (Ar), криптоном (Kr), ксеноном (Xe).

В природе свечение разряженных газов наблюдается в виде полярного сияния (*рис. 136*), представляя собой свечение верхних сильно разреженных слоёв атмосферы при прохождении через них потоков заряженных космических частиц.



Рис. 136. Полярное сияние – свечение разряженных слоёв ионосферы при прохождении через них заряженных космических частиц.

2. Коронный разряд – это высоковольтный разряд в газе, возникающий вблизи электродов с большой кривизной поверхности (около заострений, тонких проводов), где напряженность поля E особенно велика (≥ 30 кВ/см) при давлениях порядка атмосферного, *рис. 137; 138*. Вокруг электрода возникает бледно-голубое или

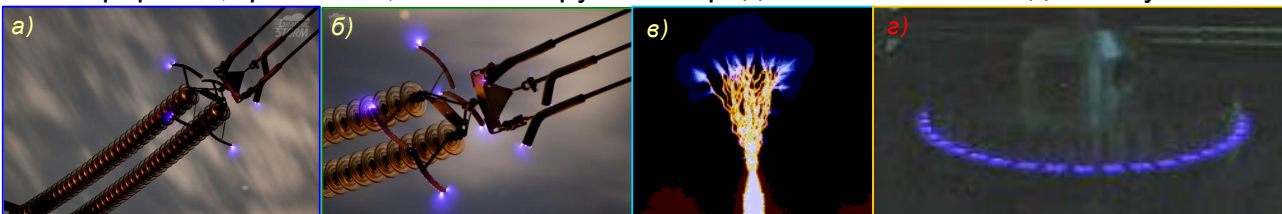


Рис. 137. Коронный разряд возникает при нормальном давлении на острых элементах конструкции около проводов линий высокого напряжения (а, б); на свободных концах проводов (в); на зубцах металлической шестерни (г);

фиолетовое свечение, имеющее вид оболочки или короны, которое сопровождается шелестящим шумом. Коронный разряд на проводах высоковольтной линии приводит к утечке электроэнергии. Поэтому стремятся увеличить диаметр проводов линии электропередачи.



Рис. 138. В естественных условиях коронный разряд может возникать на верхушках деревьев, мачтах — так называемые огни святого Эльма (а, б), на выступах растений (г).

Коронный разряд применяется

- для очистки газов от пыли и других загрязнений (электростатический фильтр);
- для обнаружения трещины в изделиях;
- в копировальных аппаратах (ксероксах) и лазерных принтерах для заряда светочувствительного барабана, переноса порошка с барабана на бумагу и для снятия остаточного заряда с барабана.

Сосуд, наполненный дымом, внезапно делается совершенно прозрачным, если внести в него острые металлические электроды, соединенные с электрической машиной, а все твердые и жидкие частицы будут осаждаться на электродах. Объяснение этого заключается в следующем: как только и проволоки зажигается корона, воздух внутри трубки сильно ионизируется. Газовые ионы прилипают к частицам пыли и заряжают их. Так как внутри трубки действует сильное электрическое поле, заряженные частицы пыли движутся под действием поля к электродам, где и оседают.

Громоотвод и коронный разряд. В атмосфере всего земного шара происходит около 100 молний в секунду. И хотя вероятность поражения молнией какого-либо отдельного человека ничтожно мала, молнии причиняют немало вреда. Около половины всех аварий линиях электропередачи вызывается молниями. Поэтому защита от молнии представляет собой важную задачу.

Ещё Ломоносов и Франклин указали, как построить громоотвод, защищающий от удара молнии. Громоотвод – это длинная проволока, верхний конец которой заостряется и укрепляется выше самой высокой точки защищаемого здания.

Нижний конец проволоки соединяют с металлическим листом, закопанным в Землю. Во время грозы на Земле появляются большие индуцированные заряды, создающие у поверхности Земли сильное электрическое поле. Напряженность его особенно велика около острых проводников. Поэтому на заостренном конце громоотвода возникает коронный разряд. Вследствие этого индуцированные заряды не могут накапливаться на здании, и молнии не происходит. В тех же случаях, когда молния все же возникает, она ударяет (искровой разряд!) в громоотвод и заряды уходят в Землю, не причиняя вреда зданию.

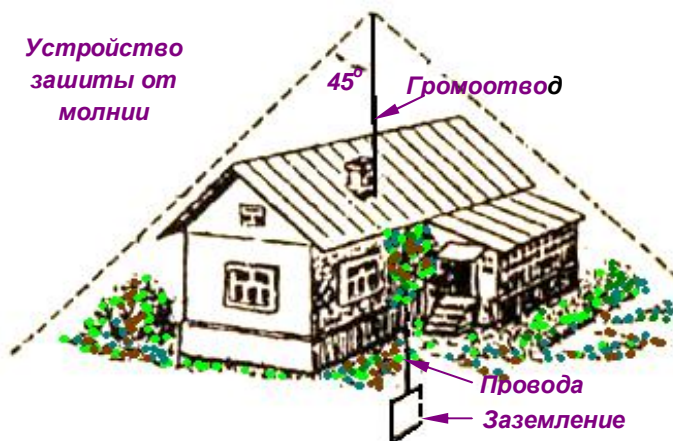
В некоторых случаях коронный разряд с громоотвода бывает настолько сильным, что у острия возникает явно видимое свечение. Такое свечение иногда появляется и возле других заостренных предметов, например, на концах корабельных мачт, острых верхушек деревьев и т. д. Это явление было замечено еще несколько веков тому назад и вызывало суеверный ужас людей, не понимавших истинной его сущности.

3. Искровой разряд обычно происходит, если мощность источника энергии недостаточна для поддержания стационарного *дугового* или *тлеющего* разряда. В этом случае, одновременно с резким возрастанием разрядного тока, напряжение на разрядном промежутке в течение очень короткого времени (от несколько микросекунд до сотен микросекунд) падает, что приводит к прекращению разряда. Затем разность потенциалов между электродами вновь растет, достигает напряжения зажигания и процесс повторяется.

В других случаях, когда мощность источника энергии достаточно велика, наблюдается вся совокупность явлений, характерных для этого разряда, но они являются лишь переходным процессом, ведущим к установлению разряда другого типа — чаще всего дугового.

Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то наблюдается форма самостоятельного разряда, называемая искровым разрядом.

Искровой разряд имеет вид прерывистых ярких зигзагообразных нитей — каналов ионизованного газа (*стрингеров*). Нити пронизывают пространство между электродами и исчезают, сменяясь новыми. При этом наблюдается яркое свечение газа и выделяется большое количество теплоты. В искровых каналах, где создаются высокое давление и температуры до $\sim 10000^\circ \text{C}$, возникают электронные и ионные лавины, которыми определяются все свойства искрового разряда. Процесс носит взрывной характер и служит причиной звуковых эффектов.



Его пример в природе – *молния*, сопровождаемая раскатами грома, *рис. 139*.

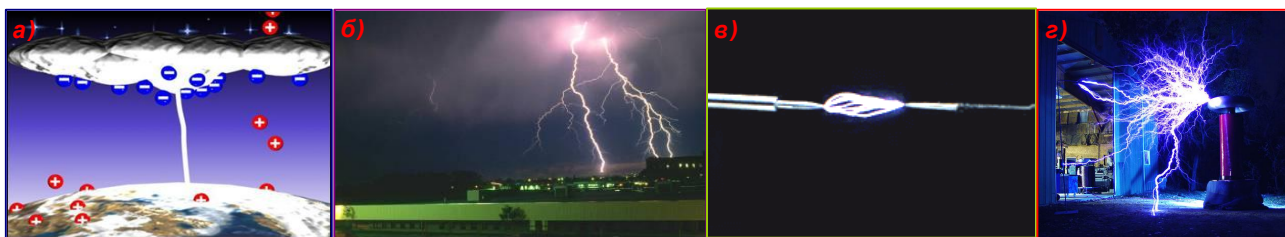


Рис. 139. Искровой разряд. Формирование молний между отрицательно заряженным тучами и положительно заряженной поверхностью земли, (а). Длина молнии между облаком и Землей 2 - 3 км, а разность потенциалов может достигать 10^9 В, (б). Несколько искровых разрядов, отснятых при длительной выдержке, (в). Исследование искрового разряда на стенде в лаборатории, (г).

Главный канал молнии имеет диаметр от 10 до 25 см и длину до нескольких километров. Сила тока в ней достигает сотен тысяч ампер.

4. Дуговой разряд – самостоятельный разряд в газе, протекающий при высокой температуре катода, либо при высоком напряжении между электродами. Дуговой разряд был открыт В. В. Петровым в 1802 году.

Для дугового разряда характерен большой ток и небольшая разность потенциалов между электродами (порядка нескольких десятков вольт). Причина такого разряда – интенсивное испускание термоэлектронов раскаленным катодом. Эти электроны ускоряются электрическим полем и производят ударную ионизацию молекул газа, благодаря чему электрическое сопротивление газового промежутка между электродами сравнительно мало. Температура газа в канале дугового разряда достигает $5000-6000^\circ\text{C}$. Поэтому в нем происходит интенсивная термоионизация. При горизонтальном расположении электродов разрядный канал изгибается кверху под действием конвекционных потоков нагретого разрядом газа (*рис. 140*).

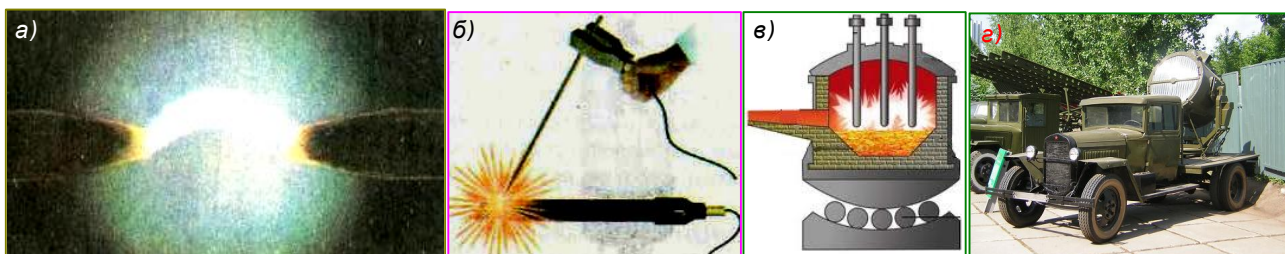
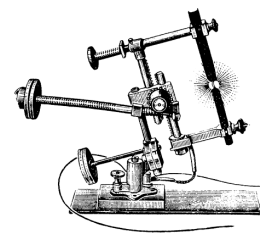
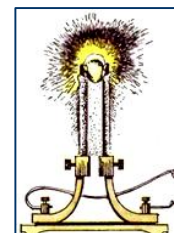


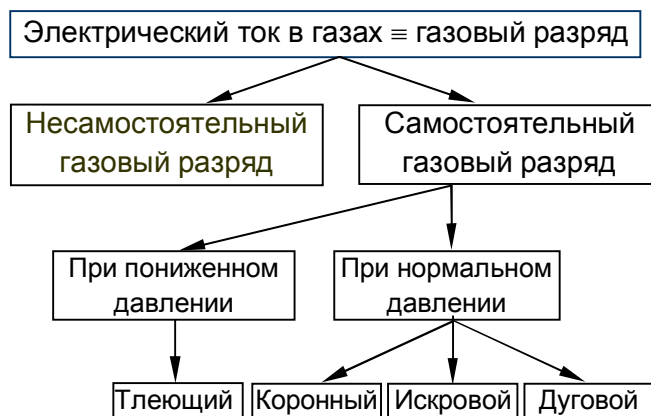
Рис. 140. Дуговой разряд. Дуговой разряд между двумя угольными электродами, (а). Дуговая электросварка, (б). Дуговая печь для выплавки металлов, (в). Дуговой зенитный прожектор с параболическим стеклянным отражателем времён Второй мировой войны, (г).

Дуговой разряд применяется при сварке и выплавке металлов, при изготовлении мощных источников света, в дуговых лампах, в ртутных выпрямителях. Высокая температура дугового разряда позволяет использовать его для устройства дуговой печи. В настоящее время дуговые печи, питаемые током очень большой силы, применяются в ряде областей промышленности: для выплавки стали, чугуна, ферросплавов, бронзы, получения карбида кальция, окиси азота и т. д.

В 1876 году П. Н. Яблочков впервые использовал электрическую дугу как источник света. В «свече Яблочкова» угли были расположены параллельно и разделены изогнутой прослойкой, а их концы соединены проводящим «запальным мостиком». Когда ток включался, запальный мостик сгорал и между углями образовывалась электрическая дуга. По мере сгорания углей изолирующая прослойка испарялась.



9⁰. Изложенное выше о газовом разряде можно представить в виде такой схемы:



10⁰. **О плазме.** Рассматривая газовый разряд, мы встречались с состояниями газа, отличающимися высокой степенью ионизации. Таково, например, состояние газа в положительном столбе тлеющего разряда, в дуговом разряде, в канале искрового разряда. Такое состояние газа называют **плазмой**¹.

Плазма – это частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

Плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы (отношение числа ионизированных атомов к их общему числу) может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Электропроводность и теплопроводность полностью ионизованной плазмы зависят от температуры по законам, соответственно, $\sim T^{3/2}$ и $\sim T^{5/2}$.

Обратите внимание, что примером полностью ионизованного вещества являются металлы: в них нет отдельных нейтральных атомов и молекул. Ионная решётка металлов является упорядоченной структурой заряженных микрочастицы.

Плазмой окружена наша планета. Слабо ионизованной плазмой в природных условиях являются верхние слои атмосферы на высоте 100 - 300 км – ионосфера. Ионизация воздуха в верхнем слое атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Они также состоят из плазмы.

Солнце, горячие звезды и некоторые межзвездные облака являются примерами полностью ионизованной плазмы, которая образуется при очень высокой температуре (высокотемпературная плазма). Высокотемпературная плазма находится в эпицентре ядерного взрыва *рис. 141, г*.

Искусственно созданной плазмой различной степени ионизации является плазма в газовых разрядах, газоразрядных лампах.

Плазма обладает рядом свойств, позволяющих рассматривать ее как особое, четвертое состояние вещества (см. Примечание к Кроссворду 2 главы 2).

Управление движением плазмы с помощью электрических и магнитных полей является основой использования её как рабочего тела. Это используется в двигателях, а также для прямого превращения внутренней энергии в электрическую, *рис. 141*.

Заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы, пока электрическая нейтральность не восстановится и электрическое поле не исчезнет.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно

¹ Первоначально слово *плазма* начали употреблять в биологии для обозначения бесцветных жидких компонентов крови и живых тканей. В физике оно приобрело иной смысл.

убывающие с расстоянием. Поэтому каждая частица плазмы взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц, так что, наряду с беспорядочным (тепловым) движением, частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны. Высокая электропроводность плазмы увеличивается по мере роста степени ее ионизации. При высоких температурах полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Плазму делят на **низкотемпературную** и **высокотемпературную**.

Из плазмы состоит и межзвездная среда, заполняющая пространство между звездами и галактиками. Плотность межзвездной среды очень мала в среднем менее одного атома на 1 см^3 . Ионизация атомов межзвездной среды вызывается излучением звезд и космическими лучами, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звезд температура межзвездной плазмы очень мала. Понятие **высокотемпературная плазма** употребляется обычно для плазмы термоядерного синтеза, который требует температур в миллионы К.

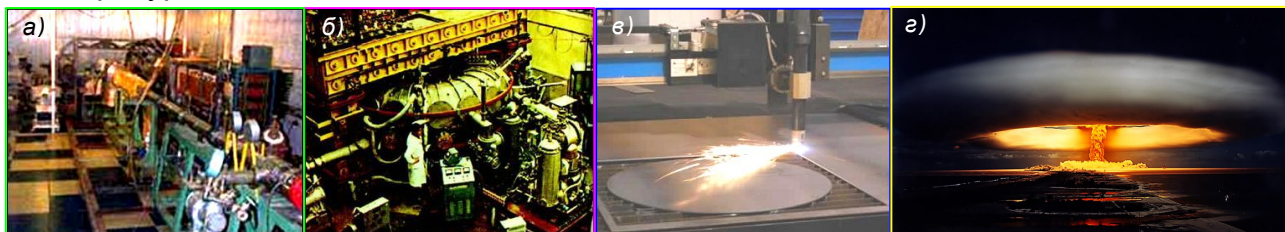


Рис. 141. Кое-что о применении плазмы. Низкотемпературная плазма применяется в магнитогидродинамических (МГД) генераторах – источниках тока, в которых струя плазмы под действием магнитных сил разделяется на два пучка положительно и отрицательно заряженных частиц (а). Токамак – это магнитная ловушка высокотемпературной плазмы для исследования проблемы управляемого термоядерного синтеза – получения пригодной для практического использования огромного количества энергии (б). Мощные струи плазмы плазматронов применяются для сварки и резки металлов, бурения твердых пород (в). Высокотемпературная плазма находится в эпицентре ядерного взрыва (г).



Вопросы

1. В чем состоит ионизация газа, и чем она может быть вызвана?
2. Что называется работой ионизации и от чего она зависит?
3. Изложите сущность физических процессов, происходящих при несамостоятельном газовом разряде. Чем объясняется существование тока насыщения?
4. В чем отличие самостоятельного газового разряда от несамостоятельного, и каково необходимое условие его существования?
5. Перечислите известные вам типы самостоятельных газовых разрядов. В чем состоят их особенности? Где они применяются?
6. Что называется плазмой? Какими особыми свойствами она обладает?



Известно, что прикасаться к электрическим проводам нельзя: по ним идет ток высокого напряжения, который может убить. Но на провода садятся птицы, и ток их не убивает. Оказывается, что опасно прикасаться к проводу, стоя на земле или сидя на столбе, поддерживающем провод. Опасно брать за два провода. Тогда ток, пройдя через тело в землю, в столб или в другой провод, и поражает человека. А птицы сидят на одном проводе: ток почти совсем не идет по их телу и не заметен для них. Если же большая птица, взмахнув крыльями, зацепит соседний провод, то и её поражает ток.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Возможность управления проводимостью лежит в основе широкого применения полупроводников.

1. Вводные замечания.

1⁰. Долгое время полупроводники не играли заметной практической роли. В электротехнике и радиотехнике применяли исключительно различные проводники и диэлектрики. Положение изменилось, когда сначала была предсказана теоретически, а затем обнаружена и изучена легко осуществимая возможность управления электрической проводимостью полупроводников.

2⁰. К полупроводникам относятся вещества, удельное электрическое сопротивление ρ которых может изменяться в широких пределах и очень быстро убывает с повышением температуры T , *рис. 142* и освещённости. Но самым удивительным свойством полупроводников оказалось свойство односторонней проводимости контакта двух полупроводниковых кристаллов различного типа.

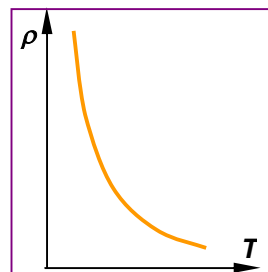


Рис. 142. Зависимость удельного сопротивления от температуры у полупроводников

К полупроводникам принадлежат 12 химических элементов – В, С, Si, P, S, Ge, As, Se, Sn, Sb, Te, I, (*рис. 143*), а также соединения PbS, CdS, GaAs и др.

		III	IV	V	VI	
2	2	5 B 10,811 бор	6 C 12,011 углерод	7 N 14,0067 азот	8 O 15,9994 кислород	9 F 18,998403 фтор
3	3	13 Al 26,98154 алюминий	14 Si 28,0855 кремний	15 P 30,97376 фосфор	16 S 32,066 сера	17 Cl 35,453 хлор
4	4	Sc 21 44,95591 скандий	Ti 22 47,88 титан	V 23 50,9415 ванадий	Cr 24 51,9961 хром	Mn 25 54,9380 марганец
	5	31 Ga 69,723 галлий	32 Ge 72,59 германий	33 As 74,9216 мышьяк	34 Se 78,96 селен	35 Br 79,904 бром
5	6	Y 39 88,9059 иттрий	Zr 40 91,224 цирконий	Nb 41 92,9064 ниобий	Mo 42 95,94 молибден	Tc 43 [98] технеций
	7	49 In 114,82 индий	50 Sn 118,710 олово	51 Sb 121,75 сурьма	52 Te 127,60 теллур	53 I 126,9045 йод

Рис. 143. К полупроводникам принадлежат 12 химических элементов в средней части таблицы Д. И. Менделеева – В, С, Si, P, S, Ge, As, Se, Sn, Sb, Te, I.

Наибольшее применение из элементов имеют германий Ge и кремний Si, имеющие на внешней электронной оболочке по четыре валентных электрона.

Полупроводники могут быть чистыми и с примесями. Соответственно различают **собственную** и **примесную** электрическую проводимость полупроводников.

3⁰. Обычно к полупроводникам относят кристаллы, в которых для освобождения (активации) электрона требуется энергия не более 1,5÷2,5 эВ. Ее значения в электрон-вольтах указаны на *рис. 143* в **кружках**. Кристаллы с большими значениями энергии связи относятся к диэлектрикам.

Типичными полупроводниками являются кристаллы германия (*рис. 144, а, б*) и кремния. В них атомы объединены ковалентной связью – связью, осуществляемой с помощью общих электронных пар, *рис. 144, в*. Каждый из четырёх электронов атома

готов образовать ковалентную пару с валентными электронами соседнего атома, рис. 144, г.

4⁰. Образование свободных электронов и дырок в полупроводниках.

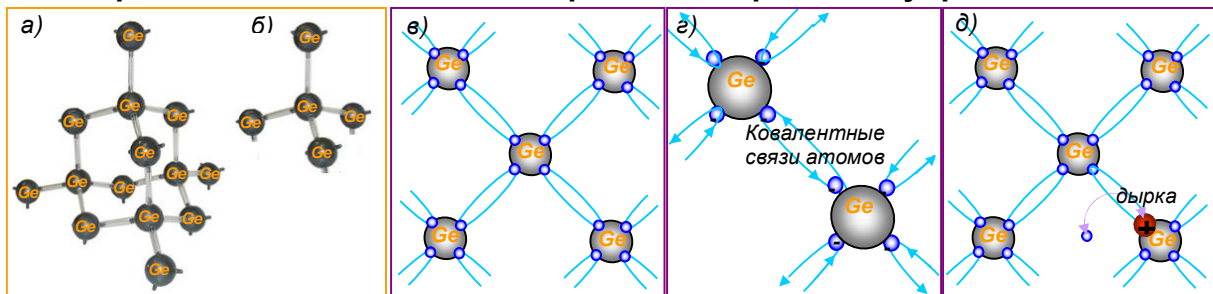


Рис. 144. Структура кристаллической решётки чистого германия: а) фрагмент б) звено: каждый атом скреплён с четырьмя соседними. Плоская схема (в) кристаллической решётки германия. Атомы имеют общие валентные электроны – 4 своих + 4 соседних (г). Образование свободных электронов и дырок (д).

При температуре около 300 К средняя энергия теплового движения атомов в кристалле полупроводника составляет около 0,04 эВ. Это значительно меньше энергии, необходимой для отрыва валентного электрона (например, для атома кремния 1,1 эВ). Однако из-за неравномерного распределения энергии теплового движения некоторые атомы германия ионизируются: образуются **свободные электроны**, рис. 144, д. Освободившиеся электроны не могут быть захвачены соседними атомами, так как все их валентные связи насыщены.

Удаление электрона с внешней оболочки одного из атомов кристаллической решетки приводит к превращению этого атома в положительный ион. Этот ион может нейтрализоваться, захватив электрон у одного из соседних атомов. Далее, в результате переходов электронов от атомов к положительным ионам происходит процесс хаотического перемещения в кристалле места с недостающим электроном. Внешне этот процесс воспринимается как хаотическое перемещение положительного электрического заряда, называемого **дыркой**, и отрицательных зарядов – свободных **электронов**, рис. 144, д.

Характер движения дырки в кристалле можно уяснить из следующей аналогии. Когда из шеренги выходит один солдат, образуется «вакансия». Если все стоящие справа солдаты будут последовательно перемещаться на освободившееся место, то всё будет происходить так, как будто само свободное место передвигается в сторону, противоположную перемещению солдат.

2. Собственная проводимость полупроводников.

1⁰. При наличии электрического поля движение свободных электронов и дырок становится упорядоченным. При этом во внешнем электрическом поле **E** электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности **E**

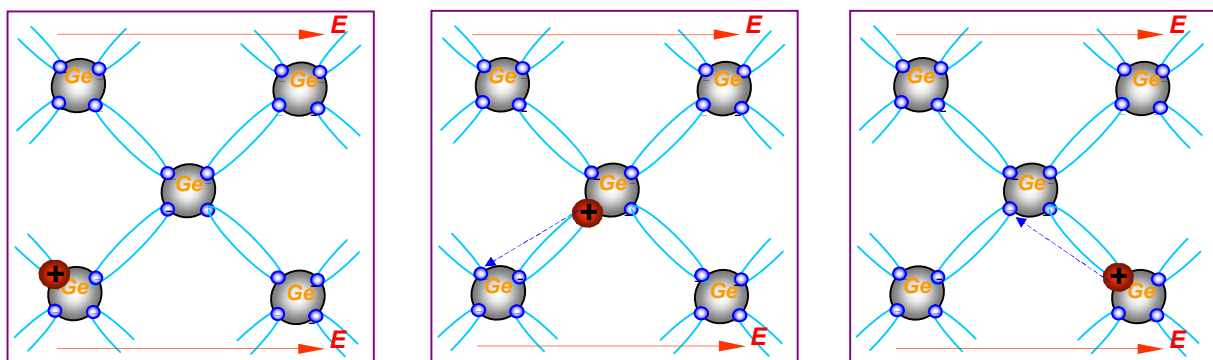


Рис. 145. Схема движения дырки и электронов в полупроводнике при наличии электрического поля: электроны движутся против (n -проводимость), а дырки – по направлению (p -проводимость) электрического поля **E**, т. е. к «полюсам», создающим поле.

электрического поля. **Положительные дырки** перемещаются в направлении напряженности **E** электрического поля, т. е. туда, куда двигался бы положительный заряд под действием электрического поля, рис. 145.

Процесс перемещения **электронов** и **дырок** во внешнем поле происходит по всему кристаллу полупроводника.

Электропроводность чистого полупроводника, обусловлена:

1) упорядоченным перемещением **электронов**. Она называется **электронной** или **негативной** проводимостью – проводимостью *n*- типа (от латинского «*negativus*» **отрицательный**)

2) упорядоченным перемещением **дырок**. Она называется **дырочной** проводимостью или **позитивной** проводимостью – проводимостью *p*-типа (от латинского «*positivus*» — **положительный**).

2⁰. С повышением температуры возрастает число свободных электронов в кристаллах чистых полупроводников. Это означает, что их удельная электропроводность увеличивается. Соответственно **удельное сопротивление ρ чистых полупроводников при нагревании уменьшается**, рис. 142. Этим полупроводники отличаются от металлов, у которых удельное сопротивление при нагревании увеличивается.

Кроме нагревания, разрыв ковалентной связи и возникновение собственной проводимости полупроводников могут быть вызваны освещением (фотопроводимость), а также действием сильных электрических полей.

Собственная проводимость чистых проводников складывается из:

- 1) **электронной проводимости (*n*-типа – негативной)**; 2) **дырочной проводимости (*p*-типа – позитивной)**.

3. Примесная электропроводность полупроводников

1⁰. **Примесной проводимостью полупроводников называется их электропроводность, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей (примесных центров)**. Примесные центры это: а) атомы или ионы посторонних химических элементов, внедренные в решетку полупроводника; б) избыточные атомы или ионы элементов полупроводников, внедренные в междоузлия решетки; в) другие дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, трещины, сдвиги, возникающие при деформациях кристаллов, и т. д.

2⁰. Примеси изменяют электропроводность полупроводников. При изменении концентрации примесей изменяется число носителей электрического тока — **электронов** и **дырок**. Возможность управления числом носителей тока (например, нагреванием или освещением) лежит в основе широкого применения полупроводников в науке и технике. В металлах такая возможность отсутствует.

3⁰. Примеси могут служить дополнительными поставщиками **электронов** в кристаллы полупроводников.

Заменим, например, в решетке полупроводника германия один атом, имеющий четыре валентных электрона, атомом примеси, имеющим пять валентных электронов (**мышьяк**, фосфор, сурьма). Тогда четыре электрона примесного атома будут участвовать в образовании ковалентных связей с электронами соседних атомов германия, а пятый электрон не сможет участвовать в образовании ковалентной связи. Он будет «лишним», легко сможет его покинуть и стать **свободным электроном**, рис. 146.

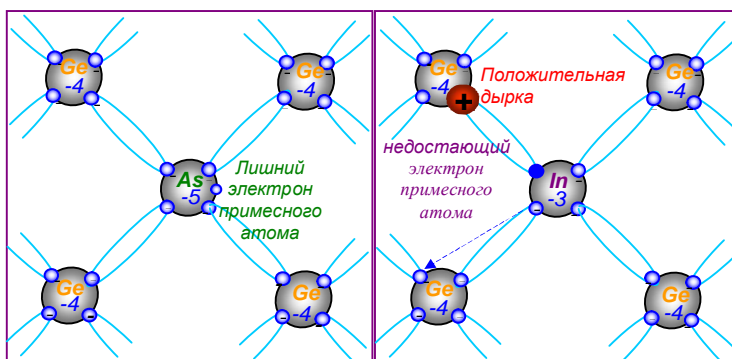


Рис. 146. Полупроводник *n*-типа; (от лат. «*negativus*» – **отрицательный**). Примесь: **As** – донор (от лат. «*donare*» – дарить) электрона.

Рис. 146*. Полупроводник *p*-типа; (от лат. «*positivus*» – **положительный**). Примесь: **In** – акцептор (от лат. *acceptor* – приёмщик) электрона.

Под действием электрического поля E такие электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нем возникает **электронная примесная проводимость**. Полупроводники с такой проводимостью называются **электронными** или полупроводниками ***n*-типа**. Атомы примесей, поставляющие электроны, называются **донорами** от латинского «*donare*» — *дарить, жертвовать*.

4°. При замещении в кристалле полупроводника одного атома с четырьмя валентными электронами атомом примеси, который имеет три валентных электрона (*индий*, бор, алюминий), возникнет недостаток одного электрона (рис. 146, б). Но примесный атом может создать все связи, если он заимствует электрон у ближайшего основного атома в решетке. Тогда на месте электрона, ушедшего из основного атома, образуется **положительная дырка**, которая в свою очередь может быть заполнена электроном из соседнего атома решетки, и т. д. Последовательное заполнение положительных дырок электронами равносильно движению дырки в полупроводнике и появлению в нем носителей тока, рис. 146*.

Под действием электрического поля **дырка** будет перемещаться в направлении вектора напряженности поля E , возникнет **дырочная примесная проводимость**. Полупроводники с такой проводимостью называются примесными дырочными или **полупроводниками *p*-типа**. Атомы примесей, которые приводят к примесной дырочной проводимости, называются **акцепторами** (от латинского «*acceptor*» — *приемщик*).

Существуют:

- 1) **донорные** (отдающие) примеси. Это поставщики дополнительных электронов в полупроводник (например, *мышьяк As*). Они легко отдают электроны и увеличивают число свободных электронов в полупроводнике.
- 2) **акцепторные** (принимающие) примеси создают "дырки", забирая в себя электроны (например, *индий In*).



5°. Если в полупроводник одновременно вводятся примеси донора и акцептора, то характер проводимости (ее ***n*-** или ***p*-** тип) определяется примесью с более высокой концентрацией носителей тока — **электронов** или **дырок**. При любом типе электропроводности полупроводника концентрация носителей тока в нем значительно меньше, чем в металлах. Но величина этой концентрации, как и энергия носителей тока в полупроводниках, в отличие от металлов, весьма сильно зависит от температуры. **При нагревании число носителей тока резко возрастает.**

Наличие примесей сильно увеличивает проводимость полупроводников. При наличии примесей у них существует **собственная + примесная** проводимость.

4. Электрические свойства контакта полупроводников ***p*-** и ***n*-** типов.

1°. Область монокристаллического полупроводника, в котором происходит смена проводимости с **электронной** на **дырочную** (или наоборот), называется **электронно-дырочным переходом** (***p-n*-переходом**). Обычно ***p-n*-переход** образуется в кристалле полупроводника, где введением соответствующих примесей создаются области с различной (***p*-** и ***n*-**) проводимостью.

2°. При контакте двух полупроводников с различными типами проводимости происходит взаимная диффузия носителей тока через границу (контакт).

Электроны из ***n*-**полупроводника диффундируют в **дырочный** полупроводник. При этом вблизи границы в нем образуется избыточный положительный заряд.

Диффузия **дырок** из ***p*-**полупроводника по аналогичным причинам приведет к возникновению вблизи границы в ***p*-**полупроводнике избыточного отрицательного заряда.

В результате на границе электронно-дырочного перехода образуется запирающий электрический слой толщины l , рис. 147. Электрическое поле этого слоя препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу.

3°. Внешнее электрическое поле E влияет на сопротивление запирающего электрического поля.

Если n -полупроводник подключен к отрицательному полюсу источника тока, а p -полупроводник к положительному, то под действием внешнего электрического поля электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике будут двигаться навстречу друг другу к границе раздела полупроводников. Электроны, перейдя границу, «заполняют» дырки. При таком прямом (пропускном) направлении внешнего электрического поля толщина запирающего слоя и его сопротивление непрерывно уменьшаются, рис. 148. В этом направлении электрический ток проходит через границу двух полупроводников.

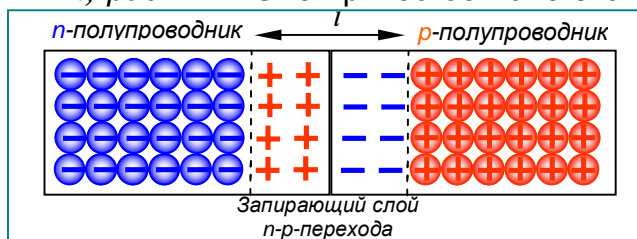


Рис. 147. На границе электронно-дырочного перехода образуется запирающий электрический слой толщины l . Электрическое поле запирающего слоя препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу раздела двух полупроводников. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с остальными объемами полупроводников.

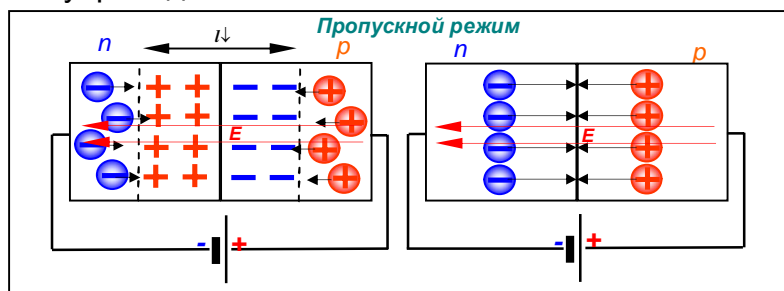


Рис. 148. Если n -полупроводник подключен к «-», а p - к «+» источника тока, то под действием электрического поля электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике будут двигаться навстречу друг другу к границе раздела. Электроны, переходя границу, «заполняют» дырки. При таком направлении внешнего поля толщина запирающего слоя и его сопротивление уменьшаются. В этом направлении ток проходит через границу полупроводников.

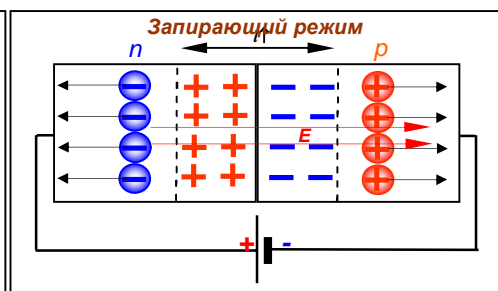


Рис. 149. Если n -полупроводник соединен с «+», а p - с «-» источника тока, электроны и дырки перемещаются в противоположные стороны. Толщина и сопротивление запирающего слоя возрастут. Такое направление поля называется запирающим. При этом ток через границу не проходит.

4°. Если n -полупроводник соединен с положительным полюсом источника, а p -полупроводник — с отрицательным, то электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике под действием электрического поля будут перемещаться от границы раздела в противоположные стороны (рис. 149). Это приводит к утолщению запирающего слоя и увеличению его сопротивления. Направление внешнего электрического поля, расширяющее запирающий слой, называется запирающим (обратным). В этом случае ток через контакт двух n - и p -полупроводников практически не проходит.

Внешнее электрическое поле влияет на сопротивление запирающего слоя.

Контакт полупроводников p - и n -типа обладает односторонней проводимостью и пропускает ток в направлении от полупроводника p -типа к полупроводнику n -типа.

При прямом (пропускном) направлении поля ток проходит через границу двух полупроводников p - и n -типа.

При запирающем (обратном) направлении внешнего поля ток через область контакта двух полупроводников практически проходить не будет.

5. Полупроводниковые приборы

1°. **Полупроводниковый диод.** Способность p - n -перехода пропускать ток преимущественно в одном направлении используется в полупроводниковых

приборах, называемых **диодами**. Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ.

Рассмотрим, как практически создают $p-n$ -переход, используя германий, обладающий проводимостью n -типа. с небольшой добавкой донорской примеси. Этот переход не удастся получить путем механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками. Толщина же $p-n$ -перехода должна быть не больше межатомных расстояний. Поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Для создания полупроводникового диода полупроводник с примесью p -типа, содержащий атомы индия, нагревается до высокой температуры. Пары примеси n -типа (например, мышьяка) осаждают на поверхность кристалла. Вследствие диффузии они внедряются в кристалл, и на поверхности кристалла с проводимостью p -типа образуется область с электронным (негативным) типом проводимости, *рис. 150, а*.

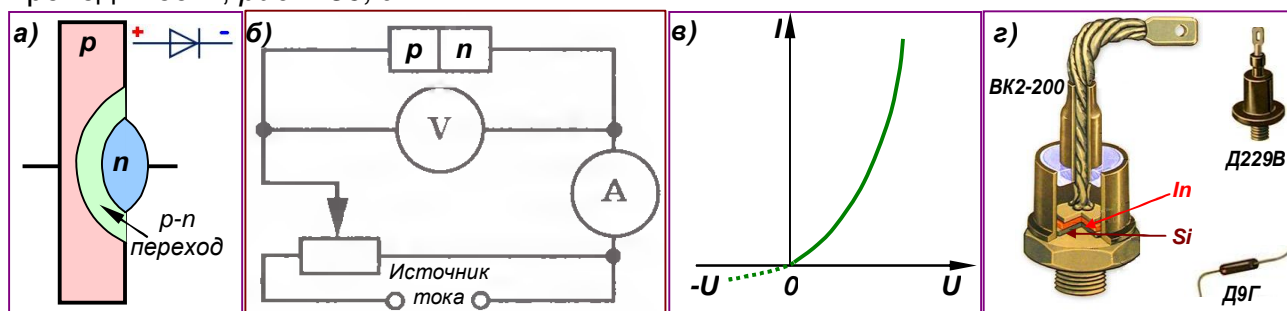


Рис. 150. Полупроводниковый диод. а) Устройство $p-n$ перехода и обозначение на схемах. б) Схема установки для снятия вольт-амперной характеристики диода. в) Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (характеристика прямого перехода изображена сплошной линией). г) Разрез и внешний вид некоторых промышленных полупроводниковых диодов различной мощности.

Для защиты от вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметический металлический корпус. Полупроводниковые диоды являются основными элементами выпрямителей переменного тока. Они обладают рядом преимуществ перед электронными двухэлектродными лампами (экономия энергии для получения носителей тока, миниатюрность, высокая надежность и большой срок службы). Недостатком полупроводниковых диодов является ограниченный интервал рабочих температур (приблизительно от -70 до $+125$ °С).

При одном направлении тока диод обладает очень небольшим прямым сопротивлением $R_{пр}$ (а), при другом направлении тока — очень большим обратным сопротивлением $R_{обр}$ (б). Это легко подтверждается простейшим опытом, для которого нужна батарейка, лампочка (в) и полупроводниковый диод.

2⁰. **Терморезисторы**, *рис. 151*. Электрическое сопротивление полупроводников в значительной степени зависит от температуры. Это свойство используют для измерения температуры по силе тока в цепи с полупроводником. Такие приборы называют терморезисторами.

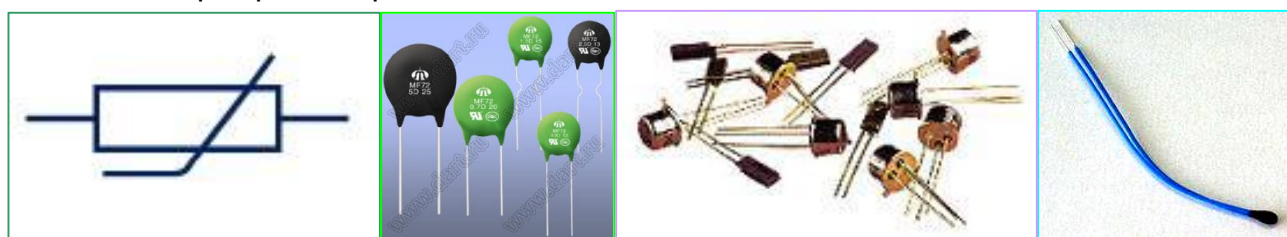


Рис. 151. Полупроводниковые терморезисторы: изображение на схемах, внешний вид, температурный датчик с терморезистором.

Полупроводниковое вещество помещается в металлический защитный чехол, в котором имеются изолированные выводы для включения терморезистора в электрическую цепь.

Изменение сопротивления терморезисторов при нагревании или охлаждении позволяет использовать их в приборах для измерения температуры, для поддержания постоянной температуры в автоматических устройствах — в закрытых камерах-термостатах, для обеспечения противопожарной сигнализации и т.д. Существуют термисторы для измерения как очень высоких ($T \approx 1300 \text{ K}$), так и очень низких ($T \approx 4 - 80 \text{ K}$) температур.

3⁰. **Фоторезистор** — полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего сопротивления при облучении светом, *рис. 152*.



Рис. 152. Полупроводниковые фоторезисторы: изображение на схеме, внешний вид различных фоторезисторов.

Электрическая проводимость полупроводников повышается не только при нагревании, но и при освещении. Электрическая проводимость возрастает вследствие разрыва связей и образования свободных электронов и дырок за счет энергии света, падающего на полупроводник.

Приборы, в которых учитывается зависимость электрической проводимости полупроводников от освещения, называют *фоторезисторами*.

Материалами для изготовления фоторезисторов служат соединения типа CdS, CdSe, PbS и ряд других.

Миниатюрность и высокая чувствительность полупроводниковых фоторезисторов позволяют использовать их для регистрации и измерения слабых световых потоков. С их помощью определяют качество поверхностей, контролируют размеры изделий и т. д.

4⁰. **Светодиоды**, *рис 153*. **Светодиод** или **светоизлучающий диод** — полупроводниковый прибор с p-n-переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.

Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, его спектральные характеристики зависят, в том числе и от химического состава использованных в нём полупроводников.

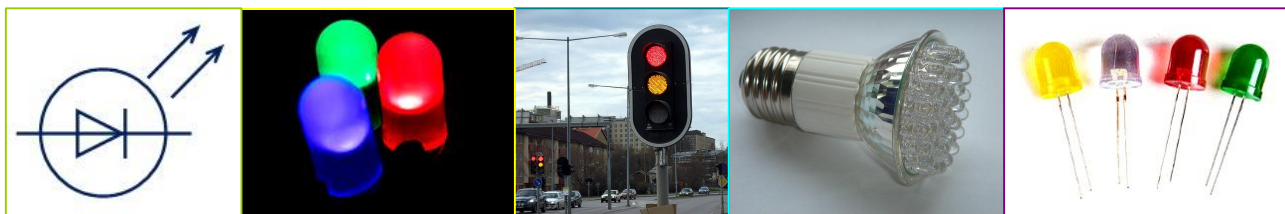


Рис. 153. Полупроводниковые светодиоды: изображение на схеме, светофор с использованием светодиодов, осветительная лампа, мелкие светодиоды для приборов.

Применяются светодиоды: в освещении, в качестве индикаторов (индикатор включения на панели прибора, буквенно-цифровое табло), как источник света в фонарях и светофорах, в качестве источников оптического излучения в подсветке жидкокристаллических экранов (мобильные телефоны, мониторы, телевизоры).

5⁰. **Транзистор** обычно используется как усилитель тока, напряжения или мощности подаваемого на него электрического сигнала, а также как электронный ключ. У транзистора три вывода (транзистор – **триод**): коллектор **К**, эмиттер **Э** и база **Б**. Между ними имеется два взаимосвязанных p-n-перехода: p-n-переход **эмиттер-**

база включается в прямом направлении, а **p-n-переход база-коллектор** – в обратном.

На *рис. 154* показано, как изображается транзистор на схемах.

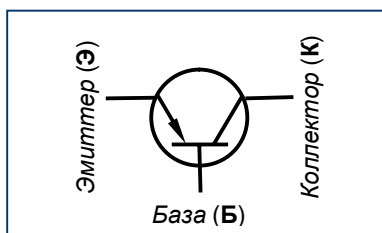


Рис. 154. Изображение транзистора на схемах

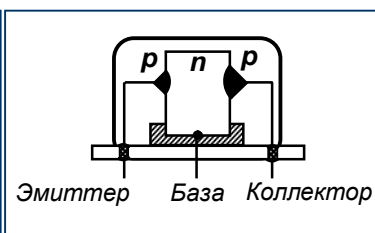


Рис. 155. Схема устройства p-n-p-транзистора

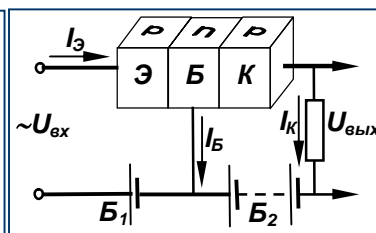


Рис. 156. Включение p-n-p-транзистора-усилителя

Рассмотрим устройство транзистора типа *p-n-p*, показанного на *рис. 155*.

На германиевой пластине, называемой **базой**, с обеих сторон вкраплено небольшое количество индия. Германиевая пластина является полупроводником *n*-типа. В местах вкрапления индия образуются полупроводники *p*-типа. С одной стороны базы концентрацию дырок делают больше, чем с другой. Область *p*-типа с большей концентрацией дырок называют **эмиттером**, а область с меньшей концентрацией **коллектором**. Таким образом, в транзисторе используется два *p-n*-перехода.

Транзистор как бы включает в себя два диода, но, что очень важно, они связаны друг с другом. С помощью тока в первом *p-n*-переходе (эмиттер-база) можно управлять током в другом *p-n*-переходе (база-коллектор).

Существуют разные способы включения транзистора в электрические схемы. Одна из них показана на *рис. 156*. Такие схемы используют, например, для усиления электрических сигналов.

Как видно из *рис. 156*, переход коллектор-база включен в обратном направлении (от полупроводника *n*-типа к полупроводнику *p*-типа), а напряжение на входе $U_{вх}=0$ (и, следовательно, ток $I_э=0$). Поэтому в данном случае нет тока и в цепи коллектора $I_к=0$.

Однако если подать напряжение на вход эмиттера $U_{вх}>0$, то переход эмиттер-база окажется включенным в прямом направлении. В этой цепи возникнет ток $I_э>0$. При этом дырки начнут поступать в переход база-коллектор и под действием существующего там поля, проскакивая узкую базу, будут проникать в коллектор. Теперь в цепи коллектора возникает ток $I_к>0$. И на выходе вольтметр (если его подключить) зарегистрирует падение напряжения $U_{вых}$, которое может во много раз превышать величину входного сигнала $U_{вх}$.

Если каким-либо образом изменять ток в цепи эмиттера $I_э$, то это повлечет за собой изменение тока в цепи коллектора $I_к$. На этом основано усилительное действие транзистора. На *рис. 157*, а показана принципиальная схема усиления на транзисторе и соответствующая ей электрическая цепь (*рис. 158*). Объясним, как работает эта цепь.

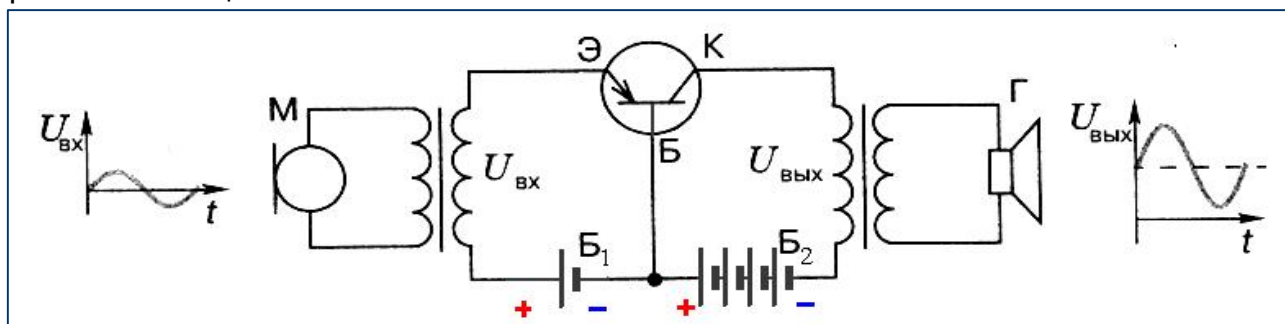


Рис. 157. Принципиальная схема усиления электрического звукового сигнала на транзисторе.

В цепь эмиттера включен микрофон *М*. Под действием звуковой волны в нем возникает переменное напряжение $U_{вх}$. Амплитуда этого сигнала очень мала, порядка нескольких милливольт. В результате напряжение между эмиттером *Э* и базой *Б* становится переменным. Поэтому сила тока в цепи коллектора I_K также меняется. По этой причине напряжение на нагрузке и $U_{вых}$ начинает колебаться, повторяя изменение напряжения на микрофоне *М*, но только со значительно большей амплитудой.

Усиленный с помощью транзистора сигнал, приводит в действие громкоговоритель *Г*. Таким образом, звук оказывается многократно усиленным.

Величина $k_U = U_{вых}/U_{вх}$ может составлять десятки и сотни единиц. Она называется *коэффициентом усиления по напряжению*.

Трансформаторы $Tr_{вх}$ и $Tr_{вых}$ используются для защиты микрофона *М* и громкоговорителя *Г* от прохождения тока излишней силы (точнее – его постоянной составляющей). Батареи B_1 и B_2 являются источниками энергии для работы усилителя.

Кроме рассмотренного транзистора типа *p-n-p*, используются транзисторы типа *n-p-n*. Для них все сказанное абсолютно справедливо, с заменой слова «электроны» на «дырки», и наоборот, а также с заменой всех напряжений на противоположные по знаку.



Рис. 158. Электрическая цепь усиления электрического звукового сигнала на транзисторе ($Tr_{вых}$ находится в ящике громкоговорителя).



Вопросы

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. В чем состоит отличительная особенность строения атомов полупроводников? Какие свойства полупроводников эта особенность определяет?
3. Назовите два типа проводимости полупроводников и объясните, как осуществляется каждый из них. Что происходит при встрече электрона с дыркой?
4. Чем отличается проводимость чистых полупроводников от проводимости полупроводников при наличии в них примесей? Назовите два типа примесей.
5. Какую примесь надо ввести в полупроводник, чтобы он имел проводимость n-типа? p-типа?
6. Что происходит в контакте двух проводников n- и p-типов? Что такое прямой и обратный переходы?
7. Как устроены полупроводниковые диод и транзистор? Какую роль они выполняют в электронных схемах?
8. Что такое терморезисторы, фоторезисторы, светодиоды? Где они применяются?



Одним из первых систематических исследований физических свойств веществ, называемых сегодня полупроводниками, начал выдающийся советский физик Абрам Федорович Иоффе.



ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

1⁰. До открытия уникальных свойств полупроводников в радиотехнике и в других электронных устройствах использовались различные вакуумные электронные приборы – лампы, трубки и т. п. Они сыграли огромную роль в развитии нашей цивилизации, но быстро уходят в прошлое, уступая дорогу микроэлектронике.

Откачивая газ из сосуда (лампы, трубки), можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы газа успевают пролететь от одной стенки сосуда к другой без соударений друг с другом. Такое состояние газа в сосуде называют **вакуумом**. Вакуум является идеальным изолятором, поскольку он практически не содержит носителей зарядов. Но он может очень хорошо проводить электрический ток, если в него ввести заряженные частицы, поскольку ничто не будет оказывать сопротивление их упорядоченному движению. Поэтому проводимость в вакууме обеспечивают, вводя в сосуд источник заряженных частиц.

2⁰. **Термоэлектронная эмиссия** – это явление испускания электронов нагретыми телами. Для изготовления нагреваемых электродов (катодов) применяются металлы, у которых термоэлектронная эмиссия протекает при температуре, при которой не происходит испарения самого вещества.

Свободные электроны внутри металла находятся в непрерывном тепловом хаотическом движении. Однако на электроны, находящиеся вблизи поверхности, со стороны положительных ионов кристаллической решетки действуют электрические силы, направленные внутрь объема металла. Эти силы будут препятствовать вылету электронов наружу. Чтобы преодолеть эти силы, необходимо совершить работу против них, которая называется **работой выхода** электронов ($A_{\text{вых}}$) с поверхности металла. Если кинетическая энергия электрона меньше работы выхода ($0.5 \cdot m_e v^2 < A_{\text{вых}}$), электрон останется внутри металла. При комнатной температуре это имеет место для большинства металлов.

Лишь при нагреве металла до достаточно высокой температуры начнется интенсивное «испарение» электронов с его поверхности, *рис. 159*. Образуется электронное облако, плотность которого с ростом температуры увеличивается. Металл при этом заряжается положительно, так что часть электронов возвращается обратно в металл. Устанавливается динамическое равновесие между покидающими и возвращающимися электронами.

3⁰. При подключении электродов вакуумного прибора к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника тока соединен с холодным электродом (**анодом**), а отрицательный — с нагретым (**катодом**), то вектор напряженности электрического поля E_A направлен к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду (**аноду**), *рис. 160*. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток.

При противоположной полярности включения источника напряженность поля направлена от нагретого электрода к холодному. Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к нагретому электроду (**катоду**). Цепь оказывается разомкнутой.

Таким образом, мы вновь встречаемся с односторонней проводимостью.

5⁰. Односторонняя проводимость широко использовалась раньше в электронных лампах с двумя электродами – **вакуумных диодах** (*рис. 160*), которые служили, как и полупроводниковые диоды, для выпрямления электрического тока (мощные вакуумные диоды для выпрямления переменного тока назывались **кентронами**).

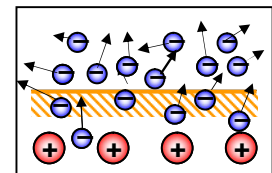


Рис. 159. Эмиссия электронов с нагретого катода.

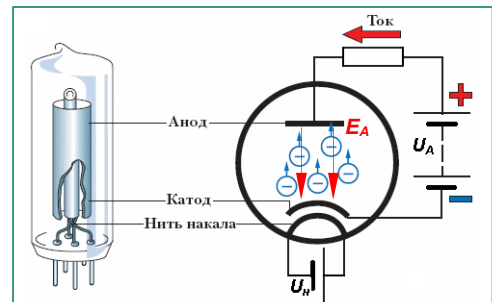
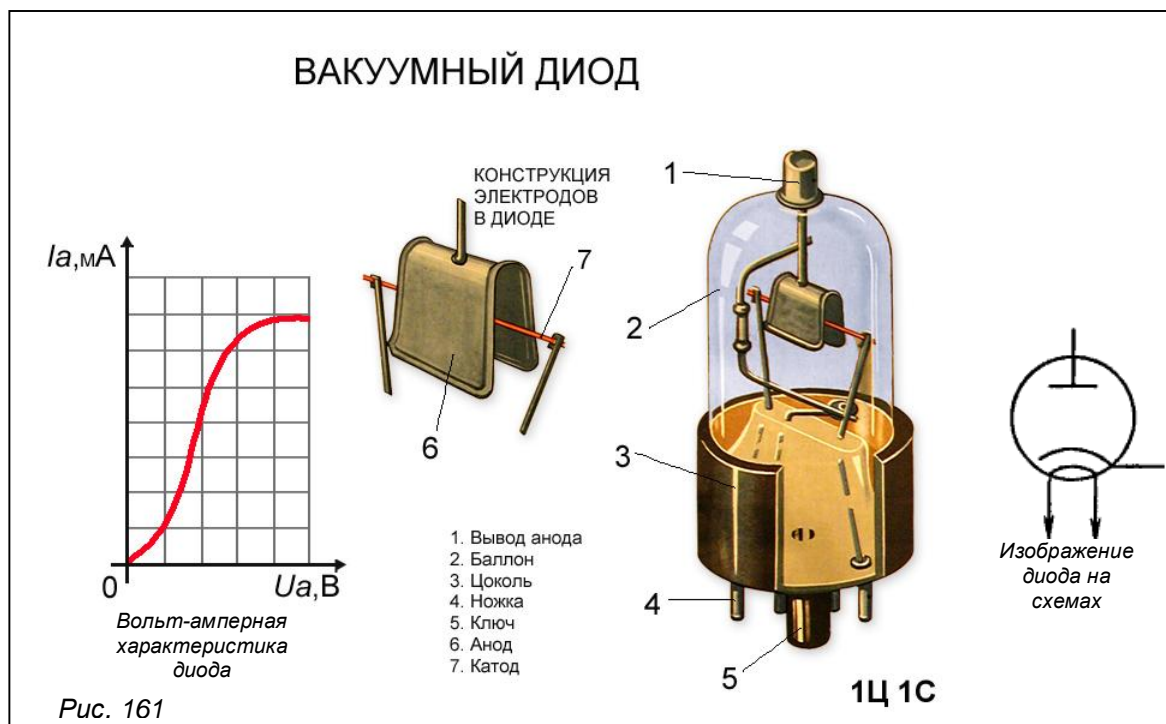


Рис. 160. Двухэлектродная электронная лампа – диод (с подогревом катода)

Однако в настоящее время вакуумные диоды практически не применяются.



Таким образом, для создания тока в вакууме необходим специальный источник заряженных частиц. Действие такого источника обычно основано на термоэлектронной эмиссии.

6⁰. **Вакуумный триод.** Потоком электронов, движущихся в электронной лампе от катода к аноду, можно управлять с помощью электрических и магнитных полей. Простейшим прибором такого типа является **триод**, рис. 162. Баллон, анод и катод вакуумного триода имеют такую же конструкцию, как и у диода, но на пути электронов от катода к аноду в нём располагается третий электрод, называемый **сеткой**. Обычно сетка — это спираль из нескольких витков тонкой проволоки вокруг катода, рис. 162, б.

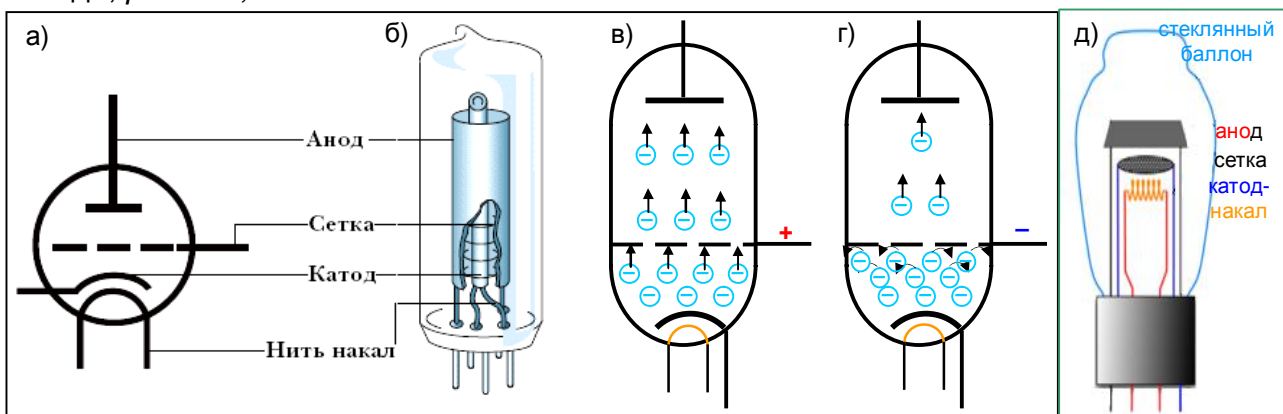


Рис. 162. Трёх электродная вакуумная лампа – триод. а) изображение на схемах. б) внешний вид малогабаритной («пальчиковой») лампы. в) подача на сетку положительного (относительно катода) напряжения увеличивает поток электронов (анодный ток). г) отрицательное напряжение на сетке уменьшает анодный ток. д) более мощный триод с прямым накалом.

Если на сетку подается положительный потенциал относительно катода (рис. 162, в), то значительная часть электронов пролетает от катода к аноду, и в цепи анода существует электрический ток. При подаче на сетку отрицательного потенциала относительно катода электрическое поле между сеткой и катодом препятствует движению электронов от катода к аноду (рис. 162, г), анодный ток

убывает. Таким образом, изменяя напряжение между сеткой и катодом, можно регулировать силу анодного тока.

Вакуумный триод можно (как и транзистор) использовать для усиления электрических сигналов, рис. 163.

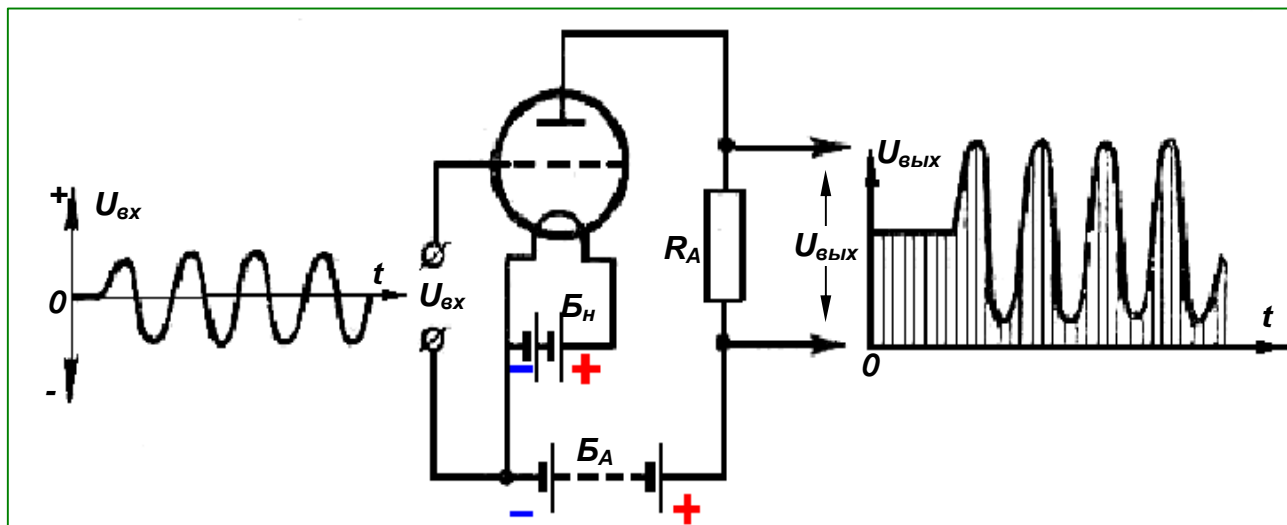


Рис. 163. Принципиальная схема усиления электрического сигнала на ламповом триоде аналогична схеме с транзистором. На данной схеме изображён вакуумный триод с прямым накалом. Такие лампы потребляли несколько меньше электроэнергии и быстрее разогревались.

7⁰. **Электронные пучки, их свойства и применение.** Электроны, испускаемые нагретым катодом, можно с помощью электрических полей разгонять до высоких скоростей и сформировать в узкие пучки. Такие пучки электронов, движущихся с большими скоростями, можно использовать для получения рентгеновских лучей, плавки и резки металлов.

Способность электронных пучков испытывать отклонения под действием электрических и магнитных полей и вызывать свечение кристаллов используются в **электронно-лучевых трубках**, рис. 165.

Электровакuumный прибор, в котором используется узкий пучок электронов для преобразования электрических сигналов в видимое изображение, называется электронно-лучевой трубкой.

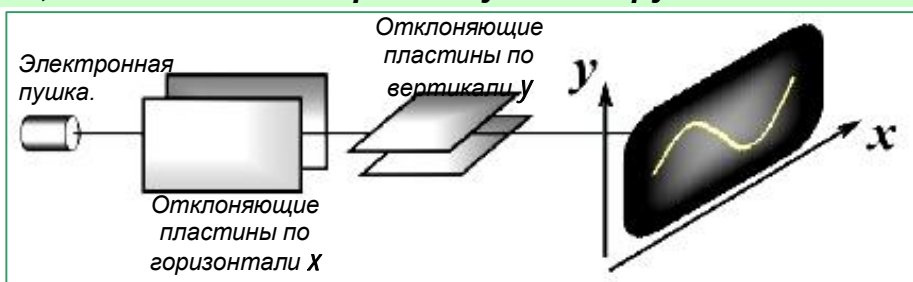


Рис. 165. Электронным лучом, сформированным электронной пушкой, можно управлять, получая изображение на экране (упрощённая схема).

8⁰. Образно говоря, в аноде вакуумного диода можно сделать отверстие. Получится **электронная пушка**: часть электронов, испущенных катодом, приобретёт большую скорость, пролетит сквозь отверстие и образует в пространстве за анодом поток быстрых параллельно летящих электронов — **электронный луч**.

Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки против анода покрыта тонким слоем кристаллов, способных светиться при попадании в них быстрых электронов. Эту часть трубки называют **экраном**.

С помощью электрических и магнитных полей можно управлять движением электронов на пути от анода до экрана и заставить электронный луч «рисовать» любую картину на экране. Эта способность электронного луча используется для

создания изображений на экране телевизора, осциллографа, компьютера. Изменение яркости свечения пятна на экране достигается путем управления интенсивностью пучка электронов с помощью дополнительного электрода, расположенного между катодом и анодом и работающего по принципу управляющей сетки электровакуумного триода, *рис. 166*.

В трубке электронно-лучевой осциллографа между анодом и экраном расположены две пары параллельных металлических пластин. Эти пластины называются отклоняющими пластинами.

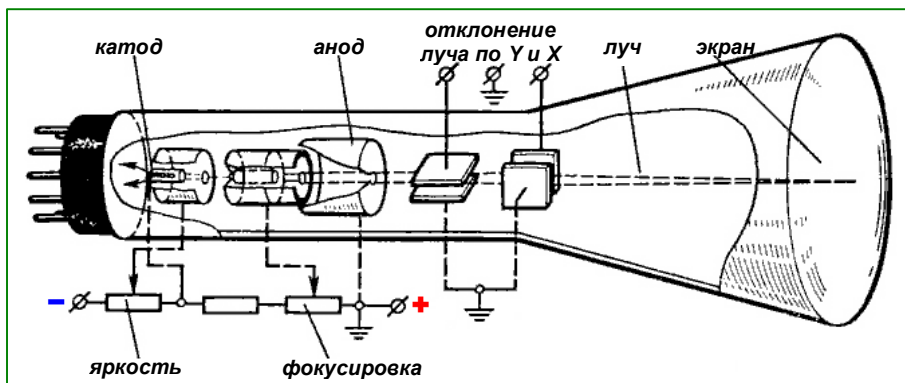


Рис. 166. Схема устройства электронно-лучевой трубки. Основными частями трубки являются: вакуумный баллон; электронная пушка; управляющие пластины; экран, покрытый слоем люминофора.

Подача напряжения на вертикально расположенные пластины вызывает смещение электронного луча в горизонтальном направлении (по оси X), подача напряжения на горизонтальные пластины вызывает вертикальное (по оси Y) отклонение луча. Смещения луча на экране трубки пропорциональны приложенному напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве электроизмерительного прибора.



Рис. 167. Монитор компьютера 90 годов XX в; один из первых ламповых телевизоров середины XX века КВН-49; его кинескоп и внутренняя панель; осциллограф – приборы с электронно-лучевой трубкой.



Рис. 168. Современные: монитор компьютера; телевизор, мобильный телефон; осциллограф – электронные приборы с жидкокристаллическим экраном.



Вопросы

1. Для какой цели в электронных лампах создают вакуум?
2. Наблюдается ли термоэлектронная эмиссия в диэлектриках?
3. Как осуществляется управление электронными пучками?
4. Как устроены ламповые диод, триод и электронно-лучевая трубка? Для чего они применяются?

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

1⁰. С понижением абсолютной температуры T величина удельного сопротивления ρ большинства проводников уменьшается (кривая 1 на рис. 168). При этом величина остаточного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$ (при приближении к абсолютному нулю) в сильной степени зависит от чистоты материала и наличия остаточных механических напряжений в образце. Поэтому после отжига $\rho_{\text{ост}}$ заметно уменьшается. У абсолютно чистого металла с идеальной правильной кристаллической решеткой при абсолютном нуле $\rho = 0$.

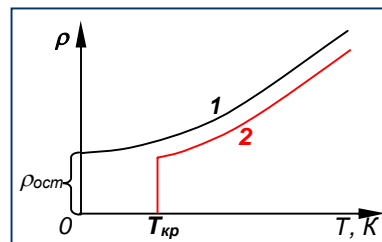


Рис. 168. Зависимость удельного сопротивления от температуры

2⁰. Но у некоторой группы металлов и сплавов при температуре порядка нескольких градусов Кельвина сопротивление скачком обращается в нуль (кривая 2 на рис. 168). Впервые это явление, названное **сверхпроводимостью**, было обнаружено в 1911 году голландским физиком Хейке Камерлинг-Оннесом для ртути. В дальнейшем сверхпроводимость была обнаружена у свинца, олова, цинка, алюминия и других металлов, а также у ряда сплавов.

Для каждого сверхпроводника имеется своя критическая температура T_k , при которой он переходит в сверхпроводящее состояние. При действии на сверхпроводник сильного магнитного поля сверхпроводящее состояние нарушается. Величина критического значения магнитного поля, разрушающего сверхпроводимость, равна нулю при $T = T_k$ и растет с понижением температуры.

Сверхпроводимость — свойство некоторых материалов обладать *строго нулевым* электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура T_k).

3⁰. Сверхпроводимость это удивительное явление, которое с точки зрения классической электродинамики объяснить невозможно. Необходимо основательное знание квантовой физики.

Очень упрощенную модель прохождения тока в сверхпроводнике можно представить следующим образом, рис. 169 (красными кружками обозначены положительные ионы кристаллической решетки).

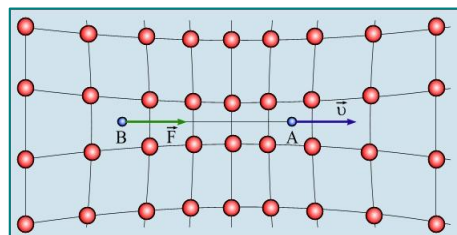


Рис. 169. Упрощенная модель механизма сверхпроводимости.

Когда электрон **A** под действием электрического поля движется в пространстве решетки, он немного искривляет её. В результате концентрация положительных ионов за ним возрастает. Скопление положительных ионов притягивает отрицательный электрон **B** с силой F . В результате энергия, которую потратил электрон **A** на прохождение ионной кристаллической решетки, передается через колебания решетки электрону **B**. Получается, что электроны **A** и **B** связаны между собой через ионную решетку и образуют *пару*. Такие пары электронов, называют часто куперовскими (в честь американского физика Купера).

Особенностью связанных таким образом электронов является то, что они не могут обмениваться энергией с решёткой малыми порциями, меньшими, чем их энергия связи между собой. Это означает, что при движении электронов в кристаллической решётке не изменяется энергия электронов, и вещество ведёт себя как сверхпроводник – с нулевым сопротивлением.

Обратите внимание, что такое движение электронов принципиально отличается от обычного теплового движения, при котором каждый свободный электрон движется хаотично. Казалось бы, в случае сверхпроводимости «нарушается» второе начало термодинамики. Но дело в том, что в данном случае мы имеем дело с *немакроскопическим* явлением!

В Советском Союзе Н. Н. Боголюбов показал, что сверхпроводимость можно рассматривать как сверхтекучесть электронного газа, а Л. Д. Ландау, А. А. Абрикосов

и В. Л. Гинзбург внесли выдающийся вклад в теорию этих явлений, за что были удостоены Нобелевских премий.

4⁰. В 1933 году Мейснер и Оксенфельд показали, что сверхпроводники полностью выталкивают линии магнитного поля из своего объема. Это так называемый эффект Мейснера: постоянный магнит парит над сверхпроводящим диском, *рис. 170*.

5⁰. Главные технические трудности использования сверхпроводников на практике в том, что подбираться к абсолютному нулю температур непросто и недешево. Все работающие сверхпроводящие устройства должны быть тщательно изолированы от внешней среды.

В 1988 г. в Советском Союзе в институте атомной энергии им. И. В. Курчатова была создана исследовательская установка «Токамак-15». Частью её является сверхпроводящая магнитная система, *рис. 171*.

На основе эффекта Мейснера созданы (в 2008 г) поезда на магнитной подушке, *рис. 172*.



Рис. 170. Магнит висит над охлажденным жидким азотом сверхпроводником с током.

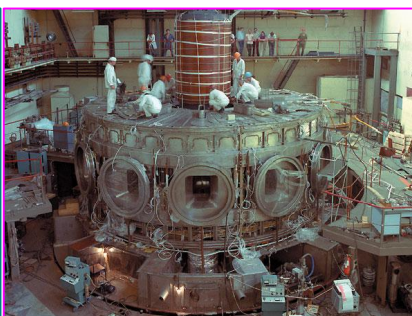


Рис. 171. Сборка (1988 г) сверхпроводящей магнитной системы установки «Токамак-15»



Рис. 172. Первая в мире коммерческая железнодорожная линия на магнитной подушке (2008 г).

Первая коммерческая сверхпроводящая линия электропередачи была запущена в эксплуатацию в Нью-Йорке в конце июня 2008 года.

6⁰. Современная наука уже получила материалы, которые обладают сверхпроводимостью при 165K (минус 107⁰C). Это позволило заменить необходимый для охлаждения дорогой жидкий гелий на более дешёвый жидкий азот.

Физики работают над созданием сверхпроводящих материалов, работающих при температурах, близких к комнатным. Если это удастся, будет решена проблема передачи энергии по проводам без потерь на любые расстояния.

Надо надеяться, что удастся создать сверхпроводники и при комнатной температуре, ибо теория сверхпроводимости принципиально не ограничивает значение температуры, при которой наблюдается явление сверхпроводимости. Это будет новая техническая революция в нашей цивилизации.

Генераторы и электродвигатели станут компактными (уменьшатся в несколько раз) и экономичными. Электроэнергию можно будет передавать на любые расстояния без потерь, и аккумулировать в простых устройствах.



Вопросы

1. Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике?
2. Как убедиться в том, что в кольцевом сверхпроводнике действительно устанавливается неизменный ток?