

# Законы постоянного тока

Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление. Электрические цепи. Последовательное и параллельное соединение проводников. Работа, мощность постоянного тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи.

## Электрический ток. Сила тока

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц. Благодаря электрическому току освещаются квартиры, приводятся в движение станки, нагреваются конфорки на электроплитах, работает радиоприемник и т. д.

Рассмотрим наиболее простой случай направленного движения заряженных частиц — постоянный ток.

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда из одной точки в другую. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как,

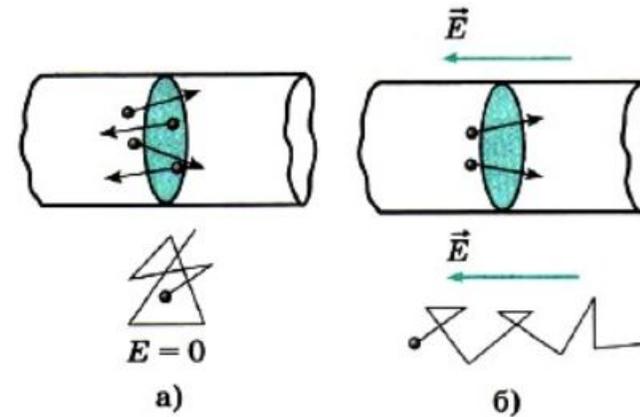


Рис. 15.1

например, свободные электроны в металле, то переноса заряда не происходит (рис. 15.1, а). Поперечное сечение проводника в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд переносится через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении (рис. 15.1, б). В этом случае говорят, что по проводнику идёт *электрический ток*.

### Запомни

**Электрическим током** называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Электрический ток имеет определённое направление.

### Важно

За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

### ИНТЕРЕСНО

Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд, переносимый через любое сечение, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

Направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

**ИНТЕРЕСНО** Выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

**Действие тока.** Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, проводник, по которому идёт ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника: например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

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, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

В лампочке накаливания вследствие прохождения электрического тока излучается видимый свет, а электродвигатель совершает механическую работу.

**Сила тока.** Если в цепи идёт электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

**Запомни**

Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**.

Если через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$  переносится заряд  $\Delta q$ , то среднее значение силы тока равно:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

**(15.1)**

### Важно

Средняя сила тока равна отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к этому промежутку времени.

### Запомни

Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным**.

Сила переменного тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени  $\Delta t$  в таком случае должен быть очень мал.

Сила тока, подобно заряду, — величина скалярная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений обхода контура принять за положительное. Сила тока  $I > 0$ , если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае  $I < 0$ .

**ИНТЕРЕСНО** Термин сила тока нельзя считать удачным, так как понятие сила, применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию сила в механике. Но термин сила тока был введён давно и утвердился в науке.

## Связь силы тока со скоростью

направленного движения частиц. Пусть цилиндрический проводник (рис. 15.2) имеет поперечное сечение площадью  $S$ . За

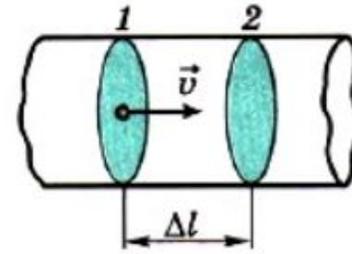


Рис. 15.2

положительное направление тока в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным  $q_0$ . В объёме проводника, ограниченном поперечными сечениями 1 и 2 с расстоянием  $\Delta l$  между ними, содержится  $nS\Delta l$  частиц, где  $n$  — концентрация частиц (носителей тока). Их общий заряд в выбранном объёме  $q = q_0nS\Delta l$ . Если частицы движутся слева направо со средней скоростью  $v$ , то за время  $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$  все частицы, заключенные в рассматриваемом объёме, пройдут через поперечное сечение 2. Поэтому сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0nS\Delta lv}{\Delta l} = q_0nvS. \quad (15.2)$$

**Важно**

В СИ единицей силы тока является ампер (А).

Эта единица установлена на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока *амперметрами*. Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока.



## Условия, необходимые для существования электрического тока.

### Важно

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо наличие **свободных** заряженных частиц.

Однако этого ещё недостаточно для возникновения тока.

### Важно

Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима сила, действующая на них в определённом направлении.

Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за столкновений с ионами кристаллической решётки металлов или нейтральными молекулами электролитов и электроны будут двигаться беспорядочно.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой  $F = qE$ .

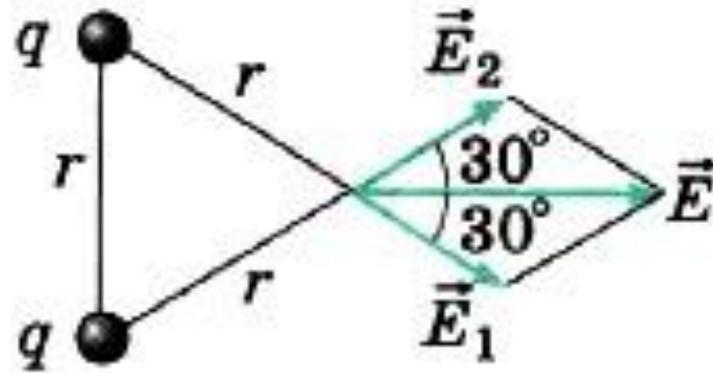


Рис. 14.17

**Важно**

Обычно именно электрическое поле внутри проводника служит причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц. Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника равно нулю.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника в соответствии с формулой (14.21) существует разность потенциалов. Как показал эксперимент, когда разность потенциалов не меняется во времени, в проводнике устанавливается *постоянный электрический ток*. Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального на другом, так как положительный заряд под действием сил поля перемещается в сторону убывания потенциала.

## Закон Ома для участка цепи. Сопротивление

**Вольт-амперная характеристика.** В предыдущем параграфе говорилось, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике и, следовательно, тем большую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно формуле (15.2) это означает увеличение силы тока.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого и газообразного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника.

### Запомни

Зависимость силы тока в проводнике от напряжения, подаваемого на него, называют **вольт-амперной характеристикой** проводника.

Её находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при изучении электрического тока.

**Закон Ома.** Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) её установил немецкий учёный Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название *закона Ома*.

На участке цепи, изображённой на рисунке 15.3, ток направлен от точки 1 к точке 2. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Так как ток направлен слева направо, то напряжённость электрического поля направлена в ту же сторону и  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

Измеряя силу тока амперметром, а напряжение вольтметром, можно убедиться в том, что сила тока прямо пропорциональна напряжению.

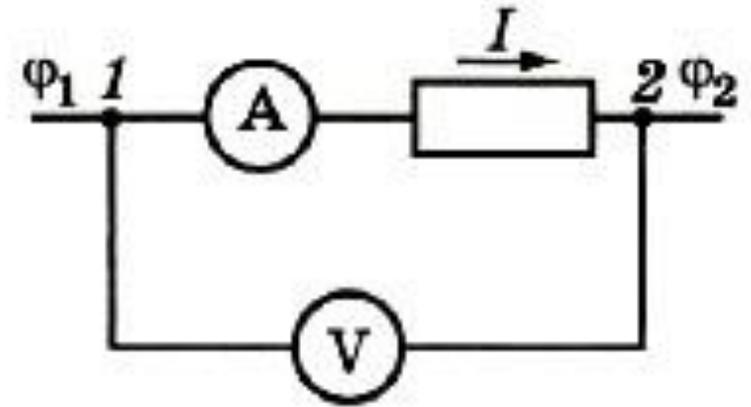


Рис. 15.3

### Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению  $U$  и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (15.3)$$

Применение обычных приборов для измерения напряжения — вольтметров — основано на законе Ома. Принцип устройства вольтметра такой же, как и у амперметра. Угол поворота стрелки прибора пропорционален силе тока.

Сила тока, проходящего по вольтметру, определяется напряжением между точками цепи, к которой он подключён. Поэтому, зная сопротивление вольтметра, можно по силе тока определить напряжение. На практике прибор градуируют так, чтобы он сразу показывал напряжение в вольтах.

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

**Сопротивление.** Основная электрическая характеристика проводника — *сопротивление*. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении.

**Запомни**

Свойство проводника ограничивать силу тока в цепи, т. е. противодействовать электрическому току, называют **электрическим сопротивлением проводника**.

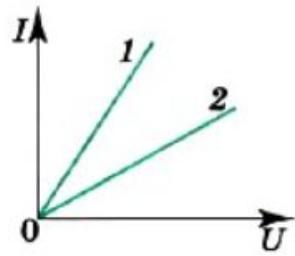


Рис. 15.4

С помощью закона Ома (15.3) можно определить сопротивление проводника:  
$$R = \frac{U}{I}.$$

Для этого нужно измерить напряжение на концах проводника и силу тока в нём.

На рисунке 15.4 приведены графики вольт-амперных характеристик двух проводников. Очевидно, что сопротивление проводника, которому соответствует график 2, больше, чем сопротивление проводника, которому соответствует график 1.

### Важно

Сопротивление проводника не зависит от напряжения и силы тока.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной  $l$  с постоянной площадью поперечного сечения  $S$  равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (15.4)$$

где  $\rho$  — величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь).

Удельное сопротивление материала численно равно сопротивлению проводника из этого материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ .

Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют её омом.

**Важно**

Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока в нём 1 А.

Единицей удельного сопротивления является  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Удельное сопротивление металлов мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. Например, удельное сопротивление серебра  $1,59 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а стекла порядка  $10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . В справочных таблицах приводятся значения удельного сопротивления некоторых веществ.

**Значение закона Ома.** Из закона Ома следует, что при заданном напряжении сила тока на участке цепи тем больше, чем меньше сопротивление этого участка. Если по какой-то причине (нарушение изоляции близко расположенных проводов, неосторожные действия при работе с электропроводкой и пр.) сопротивление между двумя точками, находящимися под напряжением, оказывается очень малым, то сила тока резко возрастает (возникает короткое замыкание), что может привести к выходу из строя электроприборов и даже возникновению пожара.

Именно из-за закона Ома нельзя говорить, что чем выше напряжение, тем оно опаснее для человека. Сопротивление человеческого тела может сильно изменяться в зависимости от условий (влажности, температуры окружающей среды, внутреннего состояния человека), поэтому даже напряжение 10—20 В может оказаться опасным для здоровья и жизни человека. Следовательно, всегда необходимо учитывать не только напряжение, но и силу электрического тока. При работе в физической лаборатории нужно строго соблюдать правила техники безопасности! Закон Ома — основа расчётов электрических цепей в электротехнике.

## Электрические цепи. Последовательное и параллельное соединения проводников

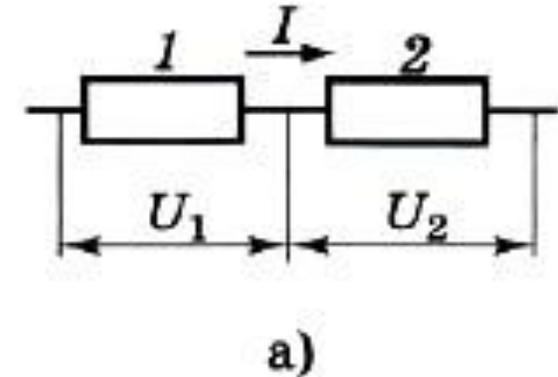
**Последовательное соединение проводников.** При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочерёдно друг за другом. На рисунке (15.5, а) показано последовательное соединение двух проводников 1 и 2, имеющих сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и др.

### Важно

Сила тока в обоих проводниках одинакова, т. е.

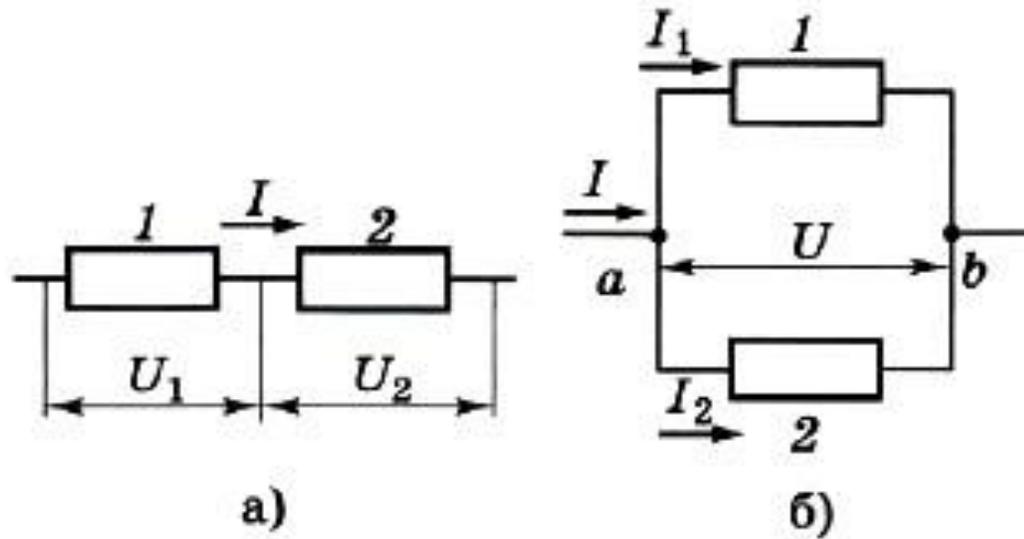
$$I_1 = I_2 = I. \quad (15.5)$$

В проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается, и через любое поперечное сечение проводника за определённое время проходит один и тот же заряд.



Напряжение на концах рассматриваемого участка цепи складывается из напряжений на первом и втором проводниках:

$$U = U_1 + U_2.$$



Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков с сопротивлениями проводников  $R_1$  и  $R_2$ , можно доказать, что полное сопротивление всего участка цепи при последовательном соединении равно:

$$R = R_1 + R_2. \quad (15.6)$$

Это правило можно применить для любого числа последовательно соединённых проводников.

Напряжения на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (15.7)$$

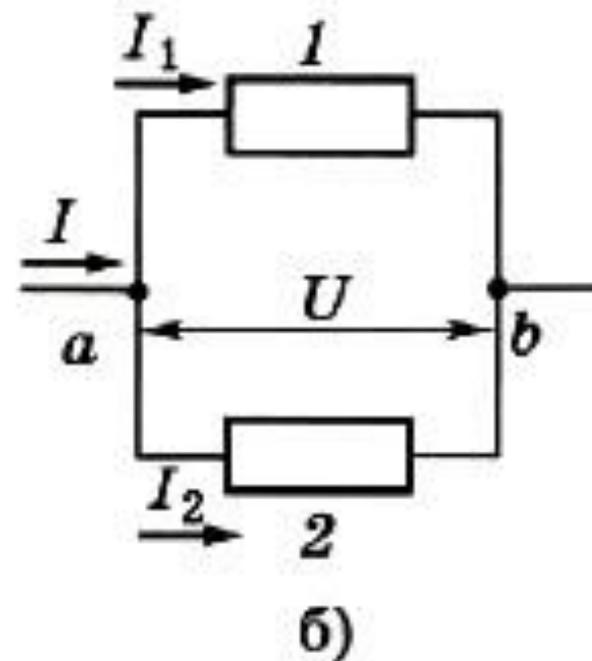
Параллельное соединение проводников. На рисунке (15.5, б) показано параллельное соединение двух проводников 1 и 2 сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . В этом случае электрический ток  $I$  разветвляется на две части. Силу тока в первом и втором проводниках обозначим через  $I_1$  и  $I_2$ .

Так как в точке  $a$  — разветвлении проводников (такую точку называют узлом) — электрический заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за это же время. Следовательно,

$$I = I_1 + I_2. \quad (15.8)$$

**Важно**

Напряжение  $U$  на концах проводников, соединённых параллельно, одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи.



В осветительной сети обычно поддерживается напряжение 220 В. На это напряжение рассчитаны приборы, потребляющие электрическую энергию. Поэтому параллельное соединение — самый распространённый способ соединения различных потребителей. В этом случае выход из строя одного прибора не отражается на работе остальных, тогда как при последовательном соединении выход из строя одного прибора размыкает цепь. Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков проводников сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , можно доказать, что величина, обратная полному сопротивлению участка  $ab$ , равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (15.9)$$

Отсюда следует, что для двух проводников

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (15.10)$$

Напряжения на параллельно соединённых проводниках равны:  $I_1 R_1 = I_2 R_2$ . Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (15.11)$$

**Важно**

Обратим внимание на то, что если в какой-то из участков цепи, по которой идёт постоянный ток, параллельно к одному из резисторов подключить конденсатор, то ток через конденсатор не будет идти, цепь на участке с конденсатором будет разомкнута. Однако между обкладками конденсатора будет напряжение, равное напряжению на резисторе, и на обкладках накопится заряд  $q = CU$ .

Рассмотрим цепочку сопротивлений  $R$  —  $2R$ , называемую матрицей (рис. 15.6).

На последнем (правом) звене матрицы напряжение делится пополам из-за равенства сопротивлений, на предыдущем звене напряжение тоже делится пополам, поскольку оно распределяется между резистором сопротивлением  $R$  и двумя параллельными резисторами сопротивлениями  $2R$  и т. д. Эта идея — деления напряжения — лежит в основе преобразования двоичного кода в постоянное напряжение, что необходимо для работы компьютеров.

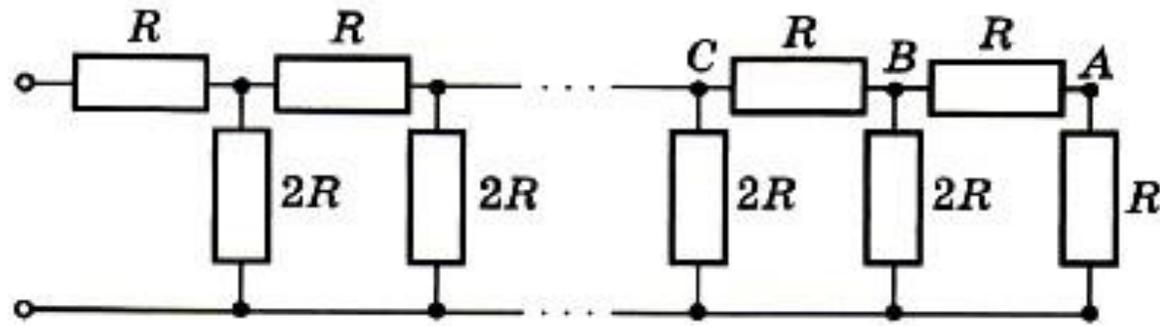


Рис. 15.6

## Работа и мощность постоянного тока

### Важно

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу.

Её принято называть *работой тока*.

Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и др. Пусть за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника проходит заряд  $\Delta q$ . Электрическое поле совершит при этом работу  $A = \Delta q U$  ( $U$  — напряжение между концами участка проводника).

Так как сила тока  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ , то работа тока равна:

$$A = IU\Delta t. \quad (15.12)$$

### Важно

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шёл ток.

Согласно закону сохранения энергии эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому

**Важно**

энергия, выделяемая на данном участке цепи за время  $\Delta t$ , равна работе тока.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника, т. е. увеличивается внутренняя энергия проводника. Нагретый проводник отдаёт тепло окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. В результате столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам свою энергию. Энергия беспорядочного движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Так как температура — мера кинетической энергии тела, то температура проводника повышается, и он начинает передавать тепло окружающим телам. Спустя некоторое время после замыкания цепи процесс устанавливается, и температура проводника перестаёт изменяться со временем. За счёт работы электрического поля в проводнике непрерывно выделяется энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Таким образом, формула (15.12) для работы тока определяет количество теплоты, передаваемой проводником другим телам.

Если в формуле (15.12) выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы

$$A = IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q. \quad (15.13)$$

Формулой  $A = I^2 R\Delta t$  удобно пользоваться при последовательном соединении проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна формула  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$ , так как напряжение на всех проводниках одинаково.

**Закон Джоуля—Ленца.** Закон, определяющий количество теплоты, которую выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским учёным Д. Джоулем (1818—1889) и русским учёным Э. Х. Ленцем (1804—1865).

### Закон Джоуля—Ленца

Количество теплоты, выделяемой в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (15.14)$$

Мы получили этот закон с помощью рассуждений, основанных на законе сохранения энергии. Формула (15.14) позволяет вычислить количество теплоты, выделяемой на любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.

**Мощность тока.** Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие *мощность тока*.

**Важно**

Мощность тока равна отношению работы тока ко времени прохождения тока. Согласно этому определению мощность тока

$$P = \frac{A}{\Delta t} \quad (15.15)$$

Электрическая мощность, так же как и механическая, выражается в *ваттах* (Вт).

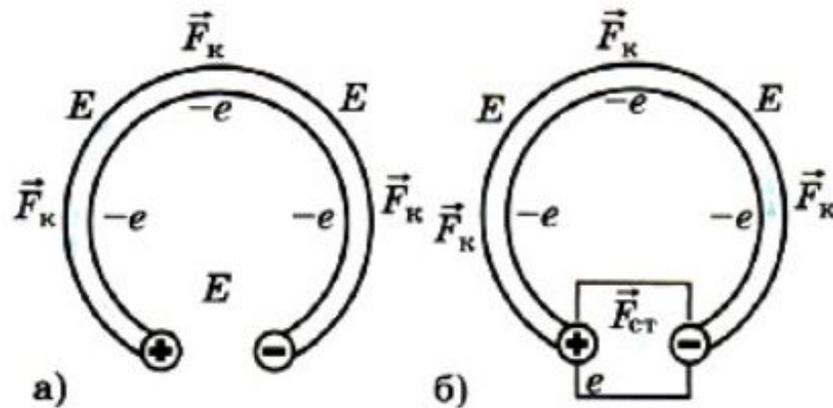
Это выражение для мощности тока можно переписать в нескольких эквивалентных формах, используя закон Ома для участка цепи:

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

На большинстве электроприборов указана потребляемая ими мощность, предельное значение силы тока, а также предельное значение напряжения.

В быту для расчётов потребляемой электроэнергии часто используется единица кВт · ч,  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

## Электродвижущая сила



поле исчезнет (рис. 15.9, а).

Если соединить проводником два разноимённо заряженных шарика, то заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое

**Сторонние силы.** Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. Для этого необходимо устройство (источник тока), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектростатического происхождения (рис. 15.9, б). Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (*кулоновское поле*) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

### **Запомни**

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют **сторонними силами**.

Вывод о необходимости сторонних сил для поддержания постоянного тока в цепи станет ещё очевиднее, если обратиться к закону сохранения энергии.

Вывод о необходимости сторонних сил для поддержания постоянного тока в цепи станет ещё очевиднее, если обратиться к закону сохранения энергии.

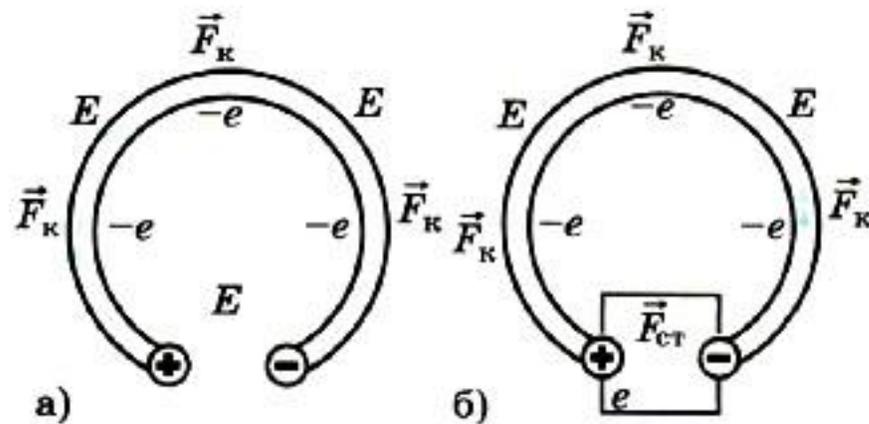
**Важно**

Электростатическое поле потенциально. Работа этого поля при перемещении в нём заряженных частиц по замкнутой электрической цепи равна нулю. Прохождение же тока по проводникам сопровождается выделением энергии — проводник нагревается. Следовательно, в цепи должен быть какой-то источник энергии, поставляющий её в цепь. В нём, помимо кулоновских сил, обязательно должны действовать сторонние, непотенциальные силы. Работа этих сил вдоль замкнутого контура должна быть отлична от нуля.

Именно в процессе совершения работы этими силами заряженные частицы приобретают внутри источника тока энергию и отдают её затем проводникам электрической цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т. д.

При замыкании цепи создаётся электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием *сторонних сил против кулоновских сил* (электроны от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во внешней цепи их приводит в движение электрическое поле (см. рис. 15.9, б).



**Природа сторонних сил.** Природа сторонних сил может быть разнообразной. В генераторах электростанций сторонние силы — это силы, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике.

В гальваническом элементе, например в элементе Вольта, действуют химические силы.

**ИНТЕРЕСНО**

Элемент Вольта состоит из цинкового и медного электродов, помещённых в раствор серной кислоты. Химические силы вызывают растворение цинка в кислоте. В раствор переходят положительно заряженные ионы цинка, а сам цинковый электрод при этом заряжается отрицательно. (Медь очень мало растворяется в серной кислоте.) Между цинковым и медным электродами появляется разность потенциалов, которая и обуславливает ток во внешней электрической цепи.

**Электродвижущая сила.** Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой *электродвижущей силой* (сокращённо ЭДС).

**Запомни**

**Электродвижущая сила** источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к абсолютной величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (15.16)$$

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой цепи равна электродвижущей силе. ЭДС одного элемента батареи обычно 1—2 В.

Можно говорить также об электродвижущей силе и на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всём контуре, а только на данном участке.

**Важно**

Электродвижущая сила гальванического элемента есть величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому.

Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории перемещения зарядов.

## Закон Ома для полной цепи

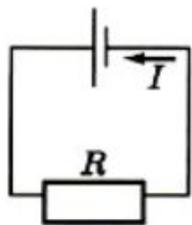


Рис. 15.10

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением  $R$  (рис. 15.10). Источник тока имеет ЭДС  $E$  и сопротивление  $r$ .

В генераторе  $r$  — это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе сопротивление раствора электролита и электродов.

### Запомни

Сопротивление источника называют **внутренним сопротивлением** в отличие от внешнего сопротивления  $R$  цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и *полное сопротивление цепи*  $R + r$ . Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля—Ленца (15.14).

Пусть за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд  $\Delta q$ . Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда  $\Delta q$  можно записать так:  $A_{\text{СТ}} = E\Delta q$ . Согласно определению силы тока (15.1)  $\Delta q = I\Delta t$ . Поэтому

$$A_{\text{СТ}} = EI\Delta t. \quad (15.17)$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых  $r$  и  $R$ , выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля—Ленца оно равно:

$$Q = I^2R\Delta t + I^2r\Delta t. \quad (15.18)$$

По закону сохранения энергии  $A_{\text{СТ}} = Q$ , откуда получаем

$$E = IR + Ir. \quad (15.19)$$

### Запомни

Произведение силы тока и сопротивления участка цепи называют **падением напряжения на этом участке**.

Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

### Закон Ома для замкнутой цепи

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (15.20)$$

Согласно этому закону сила тока в цепи зависит от трёх величин: ЭДС  $E$  сопротивлений  $R$  внешнего и  $r$  внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ( $R \gg r$ ). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС:  $U = IR = E - Ir \approx E$

При коротком замыкании, когда  $R \approx 0$ , сила тока в цепи  $I_{к.з} = \frac{E}{r}$  и определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если  $r$  мало (например, у аккумулятора  $r \approx 0,1$  —  $0,001$  Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.

Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке (15.11) положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.



Рис. 15.11

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС считается положительной:  $E > 0$ . Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу.

Если же при обходе цепи данный источник вызывает ток против направления обхода цепи, то его ЭДС будет отрицательной:  $E < 0$ . Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображённой на рисунке 15.11, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$E_{\Pi} = E_1 + E_2 + E_3 = |E_1| - |E_2| + |E_3|$$

Если  $E_{\Pi} > 0$ , то согласно формуле (15.20) сила тока  $I > 0$ , т. е. направление тока совпадает с выбранным направлением обхода контура. При  $E_{\Pi} < 0$ , наоборот, направление тока противоположно выбранному направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи  $R_{\Pi}$  равно сумме всех сопротивлений (см. рис. 15.11):

$$R_{\Pi} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Для любого замкнутого участка цепи, содержащего несколько источников токов, справедливо следующее правило: алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС на этом участке (второе правило Кирхгофа):

$$I_1R_1 + I_2R_2 + \dots + I_nR_n = E_1 + E_2 + \dots + E_m$$