

## Постоянный электрический ток. Сила тока

**Электрический ток** – это направленное движение заряженных частиц. При обычных условиях свободные заряды в проводниках испытывают тепловое (хаотичное) движение. Для существования электрического поля необходимо выполнение условий:

1. наличие свободных заряженных частиц;
2. наличие электрического поля, заставляющего двигаться заряженные частицы.

Электрический ток обнаруживается по его действиям:

1. тепловому – при прохождении тока
2. магнитному – вокруг проводника с током существует магнитное поле;
3. химическому – под действие электрического тока могут происходить химические реакции.

За направление тока принимают направление «от плюса к минусу», т.е. направление движения положительно заряженной частицы.

**Сила тока** – физическая величина, равная отношению заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени, за которое этот заряд переносится.  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$

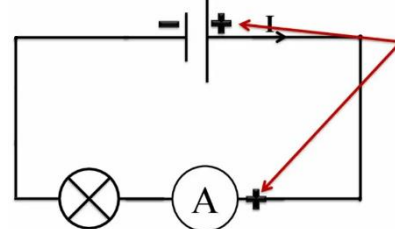
Обозначение –  $I$ , единица измерения в СИ – ампер (А).

*Физический смысл:* сила тока характеризует скорость прохождения электрического заряда через проводник. Если за одинаковые промежутки времени через поперечное сечение проводников проходят одинаковые заряды, то сила тока в них одинакова. Если сила тока не изменяется со временем, то ток называется *постоянным*, если изменяется, то *переменным*.

**Важно!** При переменном электрическом токе, сила тока постоянно меняется. Мгновенное значение силы тока можно найти как производную от заряда по времени  $i = q'(t)$ .

В цепях постоянного тока напряженность электрического поля должна быть постоянной. Для прохождения электрического тока цепь постоянного тока должна быть замкнутой.

Прибор для измерения силы тока – амперметр. Условное обозначение на схемах: 

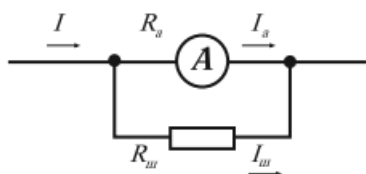


Амперметр включают в цепь последовательно с тем прибором, силу тока в котором измеряют, с соблюдением полярности. Клемму амперметра со знаком «+» соединяют с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

**Идеальный амперметр** – амперметр с нулевым сопротивлением, включение такого амперметра в цепь, не влияет на электрический ток в цепи.

### Шунтирование амперметра

Любой электрический прибор рассчитан на измерение некоторого предельного значения измеряемой величины. Для расширения пределов измерения амперметра используется **шунт** – проводник заданного сопротивления, подключаемый параллельно амперметру. Часть тока идет через шунт, часть – через амперметр. Сопротивление шунта



подбирается так, что сила тока, проходящего через амперметр, не превышает его максимально допустимое значение.  $R_{ш} = \frac{R_a \cdot I_a}{I - I_a} = \frac{R_a}{n - 1}$

При включении шунта цена деления прибора увеличивается в  $n$  раз, а точность измерений во столько же раз уменьшается.

## Постоянный электрический ток. Напряжение

В проводнике, по которому протекает ток, заряды движутся под действием сил электростатического поля. Работу электростатических сил характеризуют разностью потенциалов или напряжением.

**Электрическое напряжение** – физическая величина, равная отношению работы по перемещению электрического заряда между двумя точками цепи к величине этого заряда.  $U = \frac{A}{q}$   
Обозначение –  $U$ , единица измерения в СИ – вольт (В).

Напряжение равно разности потенциалов только в том случае, если рассматриваемый участок цепи не содержит источник тока ( $\mathcal{E} = 0$ ).

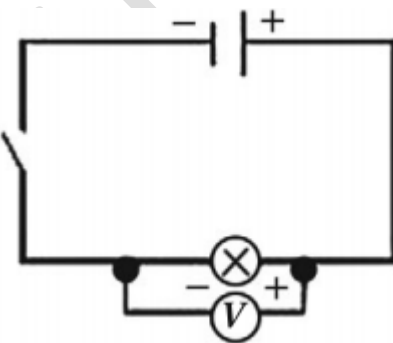
Измеряют напряжение *вольтметром*.

Изображение вольтметра на схеме:



Вольтметр подключают в цепь параллельно с тем проводником, напряжение на котором нужно измерить, с соблюдением полярности. Клемму вольтметра со знаком «+» нужно обязательно соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

**Идеальный вольтметр** – вольтметр с бесконечно большим сопротивлением. Через идеальный вольтметр ток не идет, поэтому он не влияет на ток в цепи.



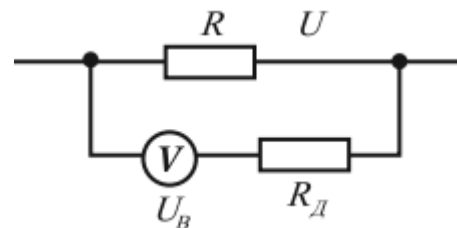
### Добавочное сопротивление

Любой вольтметр имеет предел измерения. Для расширения предела измерения вольтметра, используют **добавочное сопротивление** – резистор, включаемый последовательно с вольтметром. Величина добавочного сопротивления подбирается таким образом, чтобы на вольтметр падало напряжение не превышающее предел измерения.

Величина добавочного сопротивления рассчитывается по формуле:

$$R_d = \frac{U - U_B}{U_B} R_B = (n - 1) R_B$$

При этом цена деления прибора увеличивается в  $n$  раз, а точность измерений во столько же раз уменьшается.

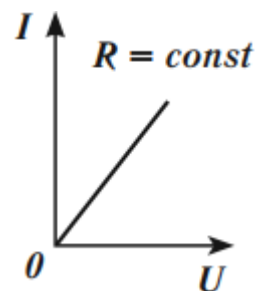


### Закон Ома для участка цепи

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

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

Из закона Ома для участка цепи следует, что при постоянном сопротивлении сила тока прямо пропорциональна напряжению. График зависимости силы тока от напряжения (*вольт-амперная характеристика*) представляет собой линейную зависимость (для металлического проводника). Чем больше угол наклона графика, тем больше сопротивление проводника.



### Электрическое сопротивление. Удельное сопротивление вещества

**Электрическое сопротивление** – характеризует способность проводника препятствовать прохождению по нему электрического тока. Обозначение –  $R$ , единица измерения в СИ – Ом.

Объяснить наличие сопротивления можно на основе строения металлических проводников. Свободные электроны при движении по проводнику встречают на своем пути ионы кристаллической решетки и

другие электроны и, взаимодействуя с ними, неизбежно теряют часть своей энергии. Различные металлические проводники, имеющие различное атомное строение, оказывают различное сопротивление электрическому току. Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток.

Сопротивление проводника определяется его материалом, из которого он изготовлен, его длиной ( $l$ ) и площадью поперечного сечения ( $s$ ). Каждый материал, из которого изготавливается проводник, обладает своим удельным сопротивлением ( $\rho$ ).

$$R = \frac{\rho l}{s}$$

**Удельное сопротивление** показывает, какое сопротивление имеет проводник длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.

**Важно!** В системе СИ единица измерения удельного сопротивления - Ом·м (Ом-метр). На практике, при решении задач, пользуются другой единицей измерения -  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  (Ом-миллиметр квадратный на метр).

Сопротивление проводника увеличивается с ростом температуры. Удельное сопротивление зависит от температуры:

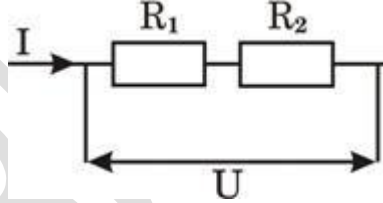
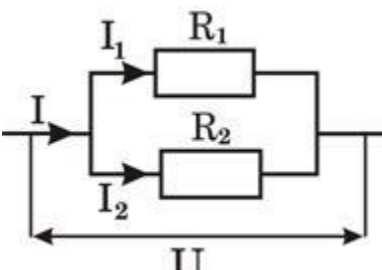
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при температуре 273 К (0°C),  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. Единица измерения температурного коэффициента сопротивления – К<sup>-1</sup>.

При нагревании увеличивается интенсивность движения частиц вещества. Это создает трудности для направленного движения электронов. Увеличивается число столкновений свободных электронов с ионами кристаллической решетки, это приводит к увеличению сопротивления.

При низких температурах может наблюдаться явление сверхпроводимости – в этом состоянии сопротивление проводника равно нулю.

### Последовательное и параллельное соединение проводников

|               | Последовательное                                                                      | Параллельное                                                                                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Схема         |    |                                           |
| Сила тока     | $I = I_1 = I_2$<br>Сила тока одинакова на всех участках цепи                          | $I = I_1 + I_2$<br>Сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил тока в отдельных параллельно соединённых проводниках |
| Напряжение    | $U = U_1 + U_2$<br>Общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных участках цепи | $U = U_1 = U_2$<br>Напряжение одинаково на всех участках цепи                                                                  |
| Сопротивление | $R = R_1 + R_2$<br>Общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных участков   | Общая проводимость складывается из проводимостей каждого резистора по закону<br>$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  |

## Электродвижущая сила. Внутреннее сопротивление источника тока

В источниках электрического тока происходит перераспределение зарядов, в результате которого на полюсах источника возникает избыток зарядов разных знаков.

Перераспределение зарядов внутри источника тока не может происходить под действием кулоновских сил. Силы, действующие на заряженные частицы внутри источника тока, имеющие неэлектрическую природу, называются сторонними.

Когда проводник соединяют с полюсами источника, то на внешнем участке цепи заряженные частицы движутся под действием электростатической силы. А внутри источника на заряды действуют сторонние и электростатические силы.

При перемещении зарядов сторонние силы совершают работу. Работу сторонних сил характеризует электродвижущая сила. **Электродвижущей силой (ЭДС)** называется отношение работы сторонних сил по перемещению положительного заряда к величине этого заряда

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Единица измерения ЭДС в СИ – вольт (В).

Проводники, подключаемые к источнику тока обладают сопротивлением, оно называется внешним. Обозначение -  $R$ . Сам источник тока также обладает сопротивлением, оно называется внутренним. Обозначение –  $r$ .

В электрической цепи, содержащей несколько источников, суммарная ЭДС будет равная сумме ЭДС источников. Сложение ЭДС производится с учетом знаков. Для определения знака ЭДС, вначале выбирают положительное направление обхода.

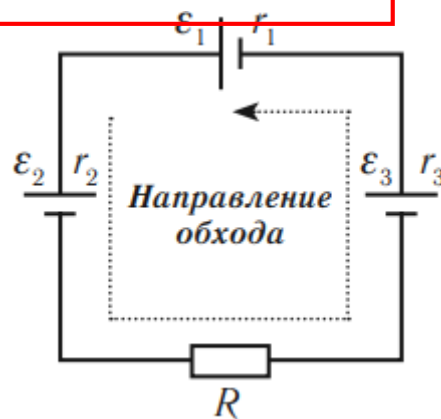
**Важно!** Положительное направление обхода выбирается произвольно – либо по часовой стрелке, либо против часовой стрелки.

ЭДС считается положительной, если направление обхода цепи совпадает с направлением тока, который стремится вызвать этот источник.

ЭДС считается отрицательной, если направление обхода цепи противоположно направлению тока, который стремится вызвать этот источник.

На рисунке:  $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 < 0, \varepsilon_3 > 0$ .

Суммарная ЭДС:  $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ .



## Закон Ома для полной электрической цепи

Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС, действующей в цепи, и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

**Полное сопротивление** – это сумма внутреннего сопротивления источника и сопротивления внешней цепи. Во внешней цепи ток идет по направлению электрического поля, внутри источника тока – против поля.

Напряжение на внешней цепи (падение напряжения):  $U = \varepsilon - Ir$ .

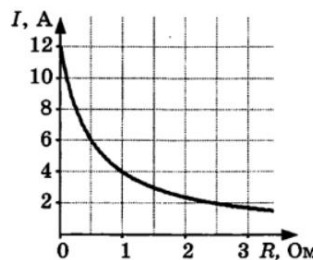
Величина  $Ir$  называется падением напряжения на источнике.

Если цепь разомкнута, то ток внутри источника не проходит и  $\varepsilon = U$ .

**Идеальный источник тока** – источник с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением ( $r = 0$ ). Напряжение на зажимах идеального источника тока равно ЭДС источника:  $\varepsilon = U$ .

Сопротивление внешней цепи больше внутреннего сопротивления источника. Если внешнее сопротивление очень мало ( $R \approx 0$ ), то говорят, что возникло **короткое замыкание**. При коротком замыкании резко увеличивается сила тока, при этом приводит к выделению большого количества теплоты. Сила тока короткого замыкания (ток короткого замыкания)

$$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$$



На рисунке: ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}} = 12$  А.

Короткое замыкание может стать причиной пожара. Для его предотвращения в электрическую цепь последовательно включают предохранители, которые размыкают цепь, если сила тока, идущая через них превышает предельную для данного предохранителя.

### Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля–Ленца

**Работа тока** – работа сил электрического поля, создающего электрический ток. Формулы для вычисления работы электрического тока

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

При протекании постоянного тока по проводнику происходит выделение некоторого количества теплоты, вычислить которое можно по **закону Джоуля–Ленца**:  $Q = I^2Rt$ .

**Полезная работа** – работа, которую совершает источник при перемещении заряда во внешней цепи. Для вычисления полезной работы можно пользоваться всеми формулами, указанными выше.

**Полная работа** – работа, которую совершает источник при перемещении заряда во всей цепи. Полная работа вычисляется по формулам

$$A_{\text{полн}} = \varepsilon It = I^2(R + r)t.$$

**Мощность электрического тока** равна отношению работы тока ко времени, в течение которого она совершается. Обозначение –  $P$ , единица измерения в СИ – ватт (Вт).

Формулы для вычисления мощности

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

Эти формулы определяют **полезную мощность**, мощность, выделяющуюся во внешней цепи

**Полная мощность** источника тока

$$P_{\text{полн}} = \varepsilon I = I^2(R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$$

Коэффициент полезного действия источника тока

$$\eta = \frac{A_{\text{полн}}}{A_{\text{полн}}} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{полн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100\%$$

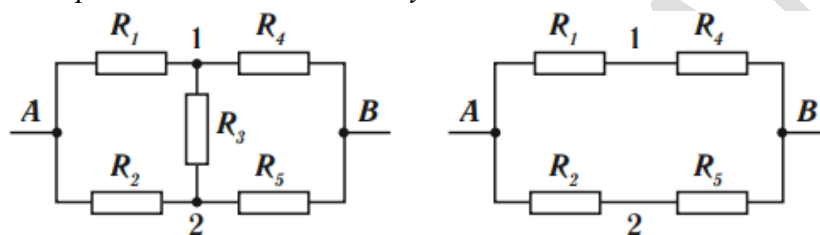
**Важно!** Номинальная мощность – мощность электрических приборов при заданных параметрах электрической сети. Например, в паспорте пылесоса указано, что его мощность равна 1500 Вт. Это означает, что при работе пылесоса в сети стандартного напряжения 220 В, его мощность будет равна 1500 Вт. Однако, следует понимать, что если указанный пылесос подключить в сеть с меньшим (или большим) напряжением, то его мощность уменьшится (или увеличится).

## Приемы, применяемые при расчете электрических цепей

**I.** Чтобы *рассчитать общее сопротивление* участка цепи, представляющего собой смешанное соединение (комбинацию последовательно и параллельно соединенных проводников) или найти силу тока и напряжение при таком соединении, нужно:

1. разбить его на простые (элементарные) участки с последовательно или параллельно соединенными проводниками;
2. составить эквивалентную схему. Как правило получается цепь из последовательно соединенных элементарных участков;
3. рассчитать сопротивление каждого элементарного участка;
4. рассчитать сопротивление всей цепи.

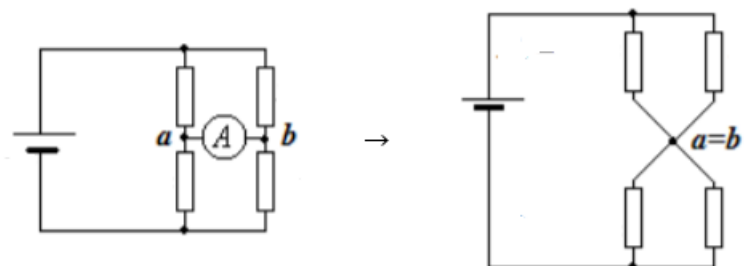
**II.** В некоторых схемах не всегда получается выделить участки с последовательным или параллельным соединением проводников. В таком случае, можно попробовать найти точки равного потенциала. Такие точки можно соединять и разъединять, ток между такими точками не идет.



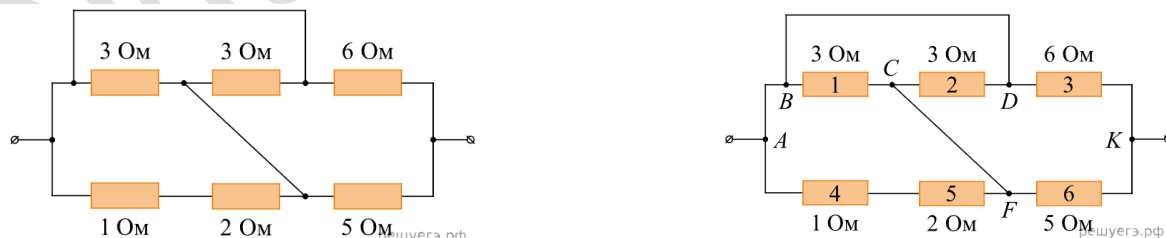
Например, на рисунке, если  $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ , то потенциалы точек 1 и 2 равны. Резистор  $R_3$  можно исключить из эквивалентной схемы – ток по нему не идет.

**III.** Перемычкой или коротким замыканием называют участок цепи, сопротивление которого стремится к нулю  $R \rightarrow 0$ . В общем случае через перемычку может течь ток. Концы участка цепи, содержащего перемычку, являются точками равных потенциалов. Точки равных потенциалов можно сомкнуть, тем самым преобразовав исходную цепь.

Например, в электрическую цепь включен идеальный амперметр. Его сопротивление равно нулю. Точки  $a$  и  $b$  являются точками равного потенциала, их можно соединить.



*Пример с решу ЕГЭ.* Найдите сопротивление участка электрической цепи



Точки  $A, B$  и  $D$ , а также точки  $C$  и  $F$  имеют соответственно равные потенциалы. Следовательно, эти точки можно соединить между собой.

