

Постоянный электрический ток

**Понятие об электрическом
токе**

Электрический ток

- **Электрический ток** – упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.
- *Ток проводимости (ток в проводниках) – движение микрочарядов в макротеле.*
- *Конвекционный ток – движение макроскопических заряженных тел в пространстве.*
- *Ток в вакууме – движение микрочарядов в вакууме.*

Электрический ток

В проводнике под действием приложенного электрического поля свободные электрические заряды перемещаются: положительные – по полю, отрицательные – против поля.

Носители зарядов совершают сложное движение:

- 1) хаотическое со средней скоростью $v \sim \sqrt{kT}$
($10^3 \div 10^4$ м/с),
- 2) направленное со средней скоростью $v \sim E$
(доли мм/с).

Таким образом, средняя скорость направленного движения электронов много меньше средней скорости их хаотического движения. Незначительная средняя скорость направленного движения объясняется их частыми столкновениями с ионами кристаллической решетки.

В то же время всякое изменение электрического поля передается вдоль проводов со скоростью, равной скорости распространения электромагнитной волны – ($3 \cdot 10^8$ м/с). Поэтому движение электронов под действием внешнего поля возникает на всем протяжении провода практически одновременно с подачей сигнала.

При движении зарядов нарушается их равновесное распределение. Следовательно, поверхность проводника уже не является эквипотенциальной и вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} не направлен перпендикулярно поверхности, так как для движения зарядов необходимо, чтобы на поверхности $E_{\tau} \neq 0$.

По этой причине внутри проводника существует электрическое поле, которое равно нулю только в случае равновесного распределения зарядов на поверхности проводника.

Условия появления и существования тока проводимости:

1. Наличие в среде свободных носителей заряда, т.е. заряженных частиц, способных перемещаться. В металле это электроны проводимости; в электролитах – положительные и отрицательные ионы; в газах – положительные, отрицательные ионы и электроны.

Условия появления и существования тока проводимости:

2. Наличие в среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов. Для того чтобы ток был длительным, энергия электрического поля должна все время пополняться, т.е. нужен источник электрической энергии – устройство, в котором происходит преобразование какой-либо энергии в энергию электрического поля.

Электрический ток

За **направление тока** условно принято направление движения положительных зарядов.

Сила тока

Сила тока – количественная мера (характеристика) электрического тока.

$I = \frac{dq}{dt}$ сила тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени.

В СИ: [1А = 1Кл / 1с].

Движение носителей заряда одного знака эквивалентно движению носителей противоположного знака в противоположном направлении.

Если ток создается двумя видами носителей:

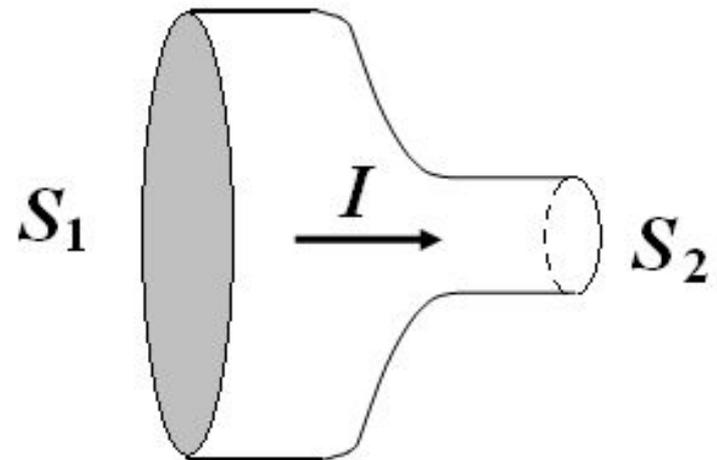
$$I = \frac{dq_+}{dt} + \frac{dq_-}{dt}$$

Сила тока

Для постоянного тока: $I = \frac{q}{t}$.

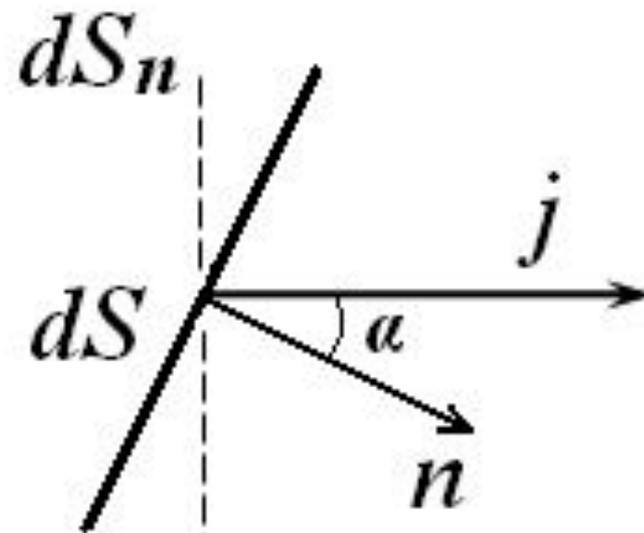
Вектор плотности тока \mathbf{j} вводится для характеристики распределения заряда по сечению проводника.

В СИ: [А / м²].



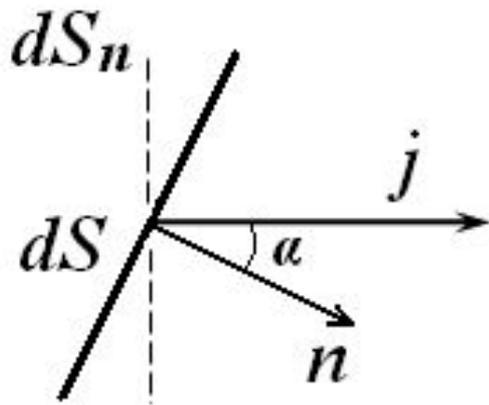
$$j = \frac{dq}{dS_n dt} = \frac{dI}{dS_n}$$

плотность тока численно равна заряду, проходящему через единичную площадку dS_n , расположенную перпендикулярно направлению тока, за единицу времени.



$$dI = \vec{j} d\vec{S} = j dS \cos(\angle \vec{j}, d\vec{S}) =$$

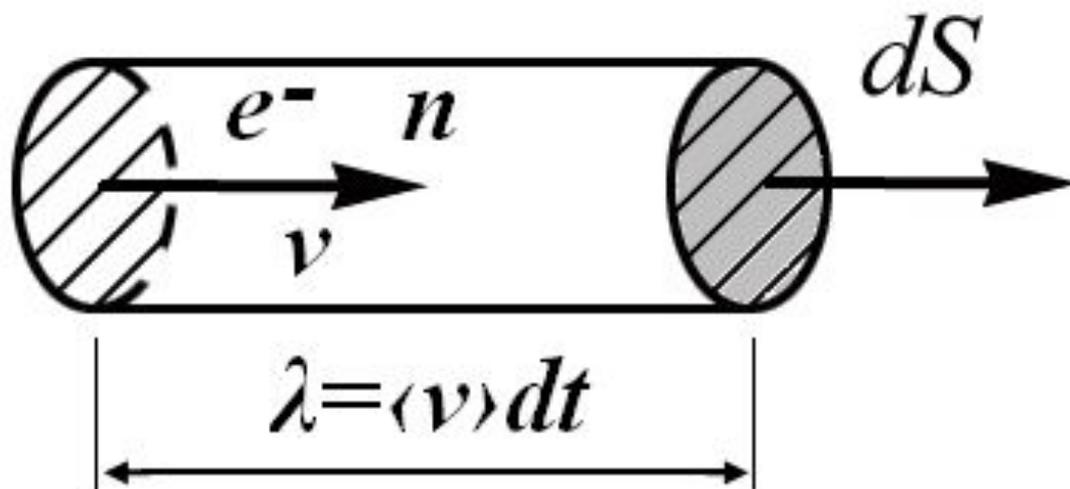
$$= j dS \cos \alpha = j dS_n.$$



$$d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}.$$

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}.$$

Рассмотрим проводник сечением dS .

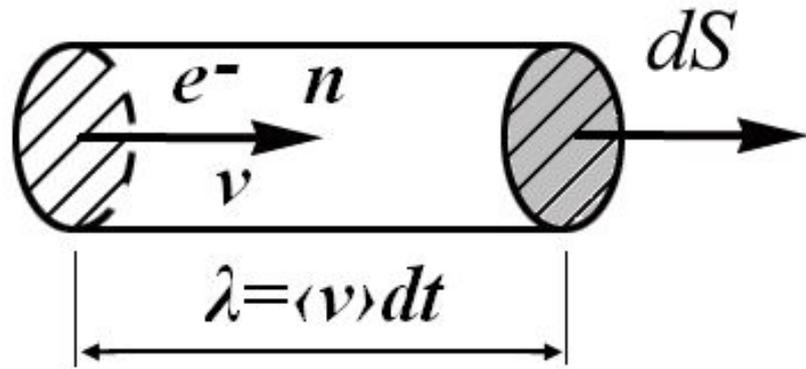


e – элементарный заряд.

n – концентрация зарядов в объеме проводника

$\langle v \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения

зарядов.



$$\begin{aligned}
 I &= \frac{dq}{dt} = \frac{nedV}{dt} = \frac{ne\langle\lambda\rangle dS}{dt} = \\
 &= \frac{ne\langle v \rangle dt dS}{dt} = ne\langle v \rangle dS.
 \end{aligned}$$

$$j = \frac{I}{dS} = ne\langle v \rangle.$$

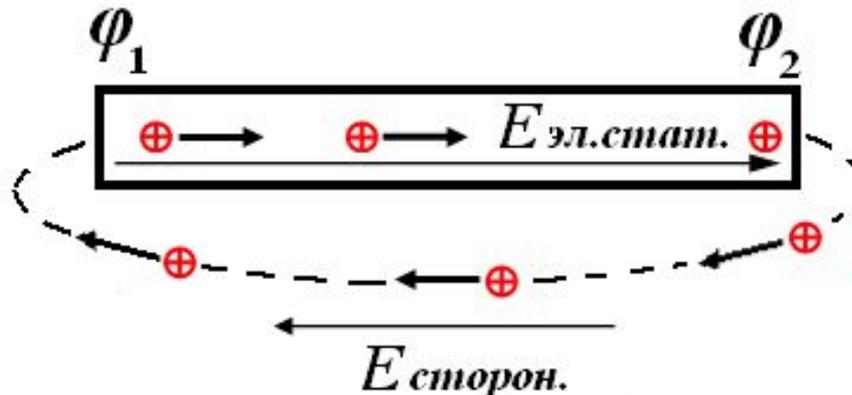
Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение

Если в цепи на носители тока действует только сила электростатического поля, то происходит перемещение носителей, которое приводит к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля.

Следовательно, для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, которое создает и поддерживает разность потенциалов φ за счет работы сил неэлектрического происхождения. Такие устройства называются **источниками тока** (генераторы – преобразуется механическая энергия; аккумуляторы – энергия химической реакции между электродами и электролитом).

Сторонние силы. Электродвижущая сила.

Сторонние силы силы неэлектрического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока.



За счет поля сторонних сил электрические заряды движутся

внутри источника тока против сил электростатического поля.

Следовательно, на концах внешней цепи поддерживается

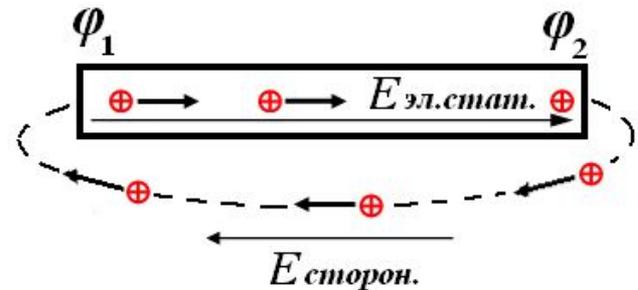
разность потенциалов и в цепи течет постоянный ток.

Сторонние силы. Электродвижущая сила.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов.

Электродвижущая сила (э.д.с. – \mathcal{E}) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_{0+}}.$$



Сторонние силы. Электродвижущая сила.

Э.д.с. в замкнутой цепи может быть определена как циркуляция вектора напряженности сторонних сил

$$E = \oint \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

Таким образом, на заряды на участке цепи, в котором есть источник тока, действуют кулоновские и сторонние силы.

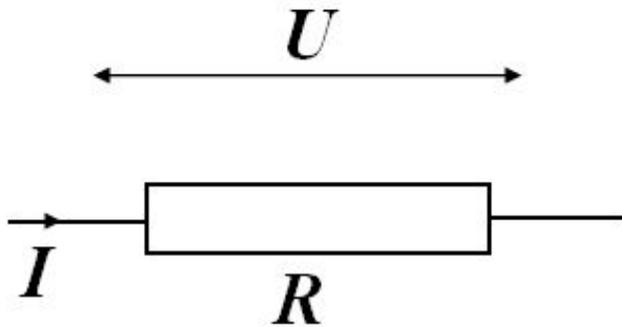
Напряжение на участке цепи-

величина, численно равная работе, совершаемой полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на этом участке цепи

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + E.$$

Закон Ома для однородного участка цепи

Однородным называется участок цепи не содержащий источника э.д.с.



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

Закон Ома в интегральной форме: сила тока прямо пропорциональна падению напряжения на однородном участке цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

Закон Ома не является универсальной связью между током и напряжением.

а) Ток в газах и полупроводниках подчиняется закону Ома только при небольших U .

б) Ток в вакууме не подчиняется закону Ома.

Закон Богуславского-Лэнгмюра (закон $3/2$):

$$I \sim U^{3/2}.$$

в) в дуговом разряде – при увеличении тока напряжение падает.

- Неподчинение закону Ома обусловлено зависимостью сопротивления от тока.

Закон Ома

В СИ сопротивление R измеряется в омах
[1 Ом = 1 В / 1 А].

Величина R зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он сделан. Для цилиндрического проводника :

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

где ρ – удельное электрическое сопротивление [Ом·м], для металлов его величина порядка 10^{-8} Ом·м.

- Сопротивление проводника зависит от его температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t),$$

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot t),$$

α – температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов (при не очень низких температурах $\alpha \approx 1 / 273 \text{ K}^{-1}$,

ρ_0, R_0 – соответственно удельное сопротивление и сопротивление проводника при $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такая зависимость $\rho(t)$ объясняется тем, что с ростом температуры интенсивность хаотического движения положительных ионов кристаллической решетки увеличивается, направленное движение электронов тормозится .

Закон Ома

- Последовательное соединение.

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

- Параллельное соединение.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Закон Ома в дифференциальной форме

Связывает, как и любое дифференциальное уравнение, величины, относящиеся к одной точке, в отличие от интегральных уравнений, связывающих величины, относящиеся к разным точкам.

Закон Ома в дифференциальной форме

$$d\varphi = Edl;$$

$$dI = \frac{d\varphi}{dR}, \quad jdS = \frac{Edl}{\rho dl} \cdot dS, \Rightarrow j = \frac{E}{\rho}.$$

$\sigma = 1/\rho$ – удельная электрическая проводимость, [сименс на метр, См/м].

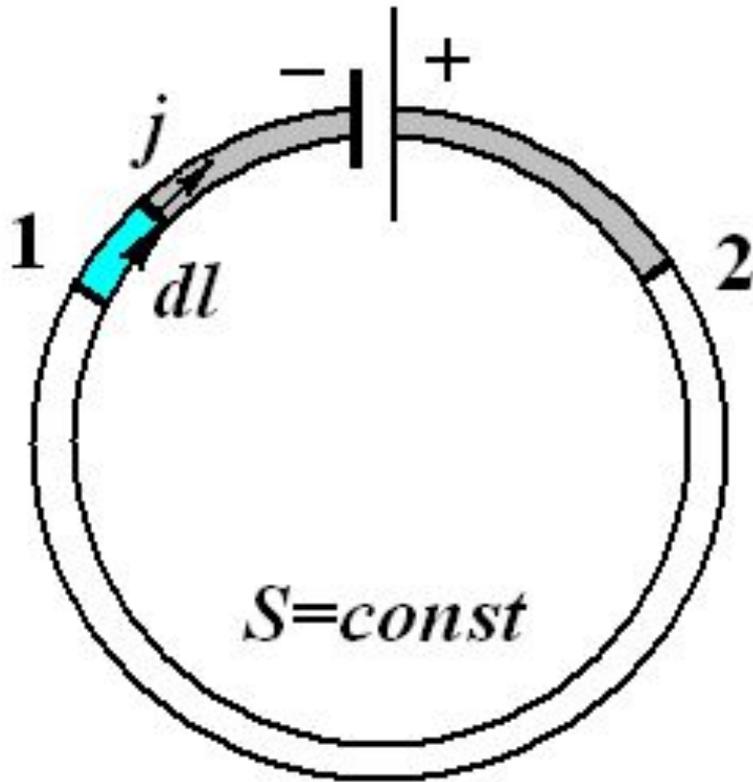
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Закон Ома в дифференциальной форме

В изотропной среде носители тока (положительные) в каждой точке движутся в направлении вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} .

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- **Неоднородный** – участок цепи, содержащий источник э.д.с.

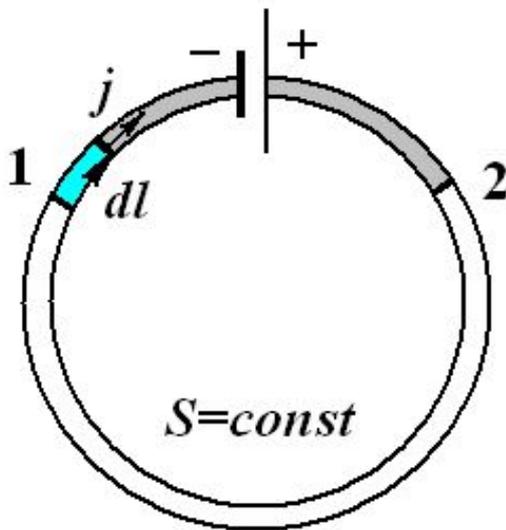


Замкнутая цепь содержит источник э.д.с., который в направлении 1–2 способствует движению положительных зарядов.

$$\vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \vec{E}_{cm} \right),$$

\vec{E} – напряженность поля кулоновских сил,
 \vec{E}_{cm} – напряженность поля сторонних сил.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

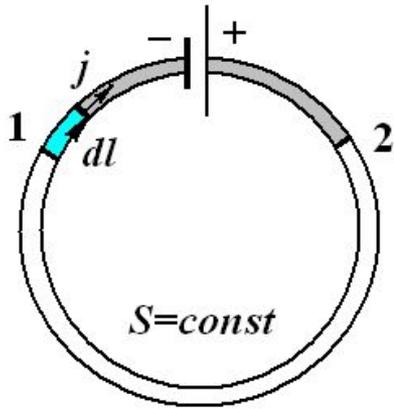


$$\vec{dl} \cdot \vec{j} = \sigma E dl + \sigma E_{cm} dl.$$

Вектор $d\mathbf{l}$ выбрали совпадающим по направлению с вектором плотности тока \mathbf{j} .

$$\vec{dl} \uparrow \uparrow \vec{j} \uparrow \uparrow \vec{E} \uparrow \uparrow \vec{E}_{cm};$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; \quad j = \frac{I}{S}.$$



Интегрируем по длине проводника от сечения 1 до некоторого сечения 2:

$$\int_1^2 \frac{\rho I}{S} dl = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl,$$

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

$$\frac{I\rho}{S} l_{21} = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl.$$

$$\int_1^2 E dl = \varphi_1 - \varphi_2$$

работа, совершаемая кулоновскими силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

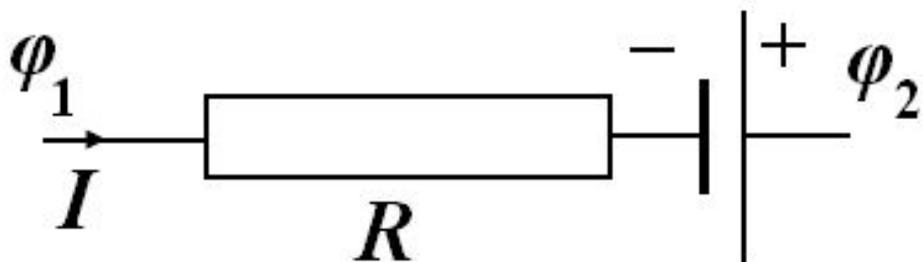
$$\int_1^2 E_{cm} dl = \mathcal{E}$$

работа, совершаемая сторонними силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- Работа, совершаемая кулоновскими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда q_{0+} – **падение напряжения (напряжение)**.

Так как точки 1, 2 были выбраны произвольно, то полученные соотношения справедливы для любых двух точек электрической цепи:

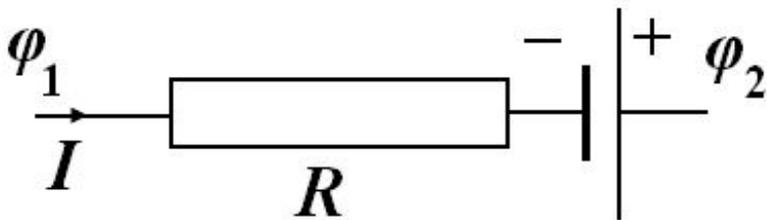


The diagram shows a circuit segment between two points with potentials φ_1 and φ_2 . A resistor R and a voltage source E are connected in series. The current I flows from φ_1 to φ_2 . The voltage source E is represented by two vertical lines of unequal length, with the longer line on the right, indicating the positive terminal is at φ_2 .

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm E}{R}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- Если источник э.д.с. включен таким образом, что в направлении протекания тока он повышает потенциал электрической цепи, то он берется с плюсом + E.

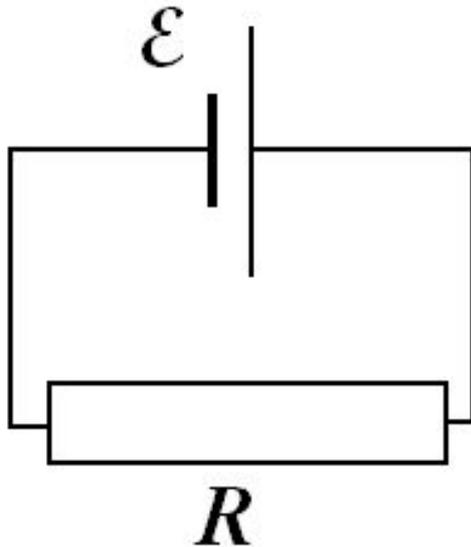


$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E}{R}$$

Закон Ома для замкнутой цепи

- Если цепь **замкнутая**, то $\varphi_1 = \varphi_2$.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{полн}}}; \quad R_{\text{полн}} = r_{\text{внутр.ист.т.}} + R_{\text{внеш.цепи}}.$$



Работа и мощность электрического тока

Закон Джоуля-Ленца

При соударении свободных электронов с ионами кристаллической решетки они передают ионам избыток кинетической энергии, которую приобретают за время ускоренного движения в электрическом поле. В результате этих соударений амплитуда колебаний ионов около узлов кристаллической решетки увеличивается (тепловое движение ионов становится более интенсивным). Следовательно, проводник нагревается: температура – мера интенсивности хаотического движения атомов и молекул. Выделившееся тепло Q равно работе тока A .

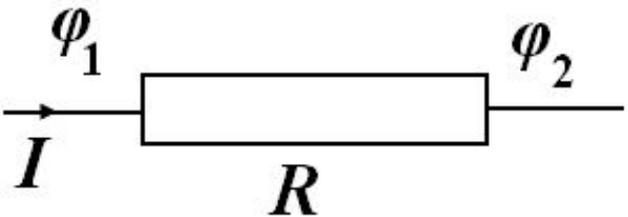
Работа и мощность электрического тока

Закон Джоуля-Ленца

Мощность электрического тока:

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

Закон Джоуля-Ленца

- Однородный участок цепи 

$$\begin{aligned} A = Q &= q(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)I \cdot t = \\ &= IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \end{aligned}$$

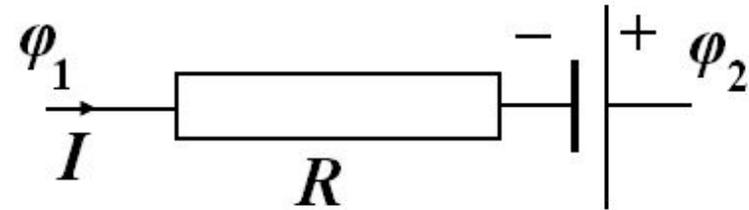
$$P = IU$$

Закон Джоуля-Ленца

- Неоднородный участок цепи

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathbf{E}) =$$
$$= (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathbf{E})I \cdot t.$$

$$P = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathbf{E})I.$$

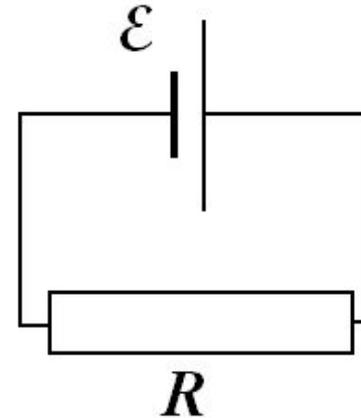


Закон Джоуля-Ленца

- Замкнутая цепь.

$$A = EI \cdot t.$$

$$P = EI.$$

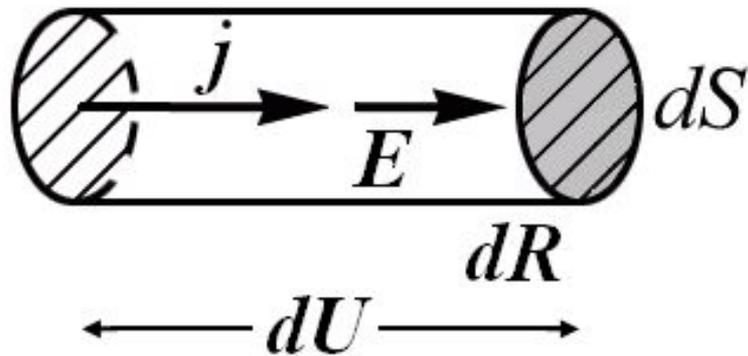


- К.п.д. источника тока:

$$\eta = \frac{I^2 R}{IE} = \frac{U}{E}.$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

- **Удельная тепловая мощность тока** – количество тепла, выделившееся в единичном объеме за единицу времени.



$$q = \frac{dQ}{dV dt}$$

$$dQ = (dI)^2 dR dt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \frac{dS dl}{dV} \cdot dt$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$dQ = (dI)^2 dR dt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \frac{dS dl}{dV} \cdot dt,$$

$$j = \sigma E.$$

$$dQ = \sigma^2 E^2 \rho dV \cdot dt,$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

$$q = \frac{dQ}{dV dt} = \sigma E^2.$$

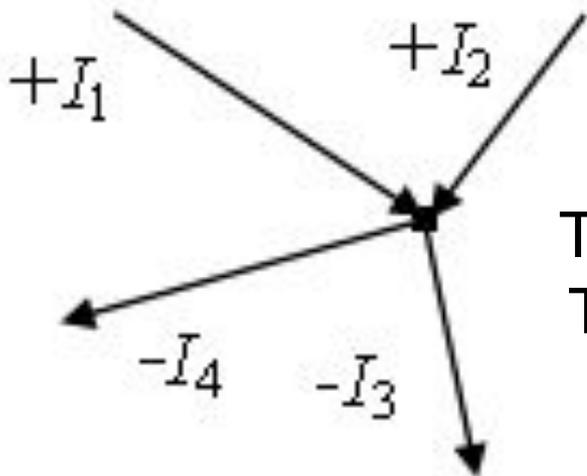
Законы Кирхгофа

Используются для расчета разветвленных цепей постоянного тока.

- **Неразветвленная электрическая цепь** – цепь, в которой все элементы цепи соединены последовательно.
- **Элемент электрической цепи** – любое устройство, включенное в электрическую цепь.
- **Узел электрической цепи** – точка разветвленной цепи, в которой сходится более двух проводников.
- **Ветвь разветвленной электрической цепи** – участок цепи между двумя узлами.

- **Первый закон Кирхгофа** (следствие закона сохранения заряда): алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$



Ток, подходящий к узлу – положительный.
Ток, отходящий от узла – отрицательный.

Пример: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

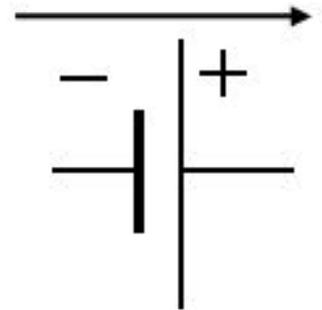
• Второй закон Кирхгофа

(обобщенный закон Ома): в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление соответствующих участков R_i этого контура равна алгебраической сумме э.д.с. в контуре.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i.$$

Второй закон Кирхгофа

- Ток считается положительным, если его направление совпадает с условно выбранным направлением обхода контура.
- Э.д.с. считается положительной, если направление обхода происходит от $-$ к $+$ источника тока, т.е. э.д.с. создает ток, совпадающий с направлением обхода.



Порядок расчета разветвленной цепи:

1. Произвольно выбрать и обозначить на чертеже направление тока во всех участках цепи.
2. Подсчитать число узлов в цепи (m). Записать первый закон Кирхгофа для каждого из ($m-1$) узлов.
3. Выделить произвольно замкнутые контуры в цепи, произвольно выбрать направления обхода контуров.
4. Записать для контуров второй закон Кирхгофа. Если цепь состоит из p -ветвей и m -узлов, то число независимых уравнений 2-го закона Кирхгофа равно ($p-m+1$).