

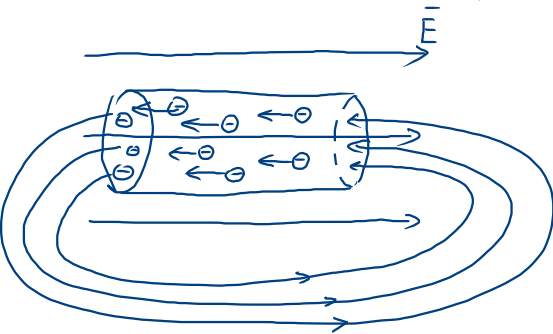
Электрический ток

Законы постоянного тока

Электрический ток - упорядоченное движение эл. зарядов

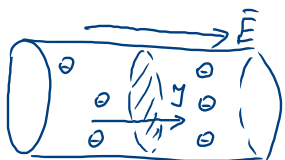
Условия: наличие свободных зарядов

Наличие электрического поля



Цепоток тока разделяет электрич. заряды, совершает работу по перемещению зарядов против эл. поля.

Природа - магнитная, механическая, химическая и др.



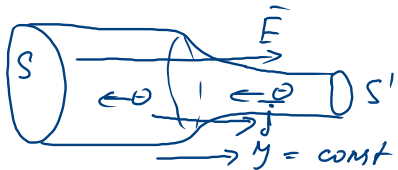
$$j = \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ Величина электрического тока (Сила тока)}$$

S за Δt проходит заряд Δq $[j] = 1 \text{ A}; [\Delta q] = 1 \text{ Кл} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ с}$

$$j = f(t)$$

$j = \text{const}$ - постоянный ток

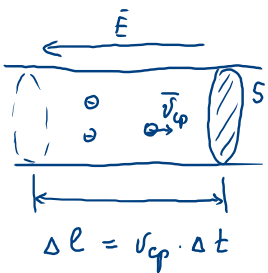
Ток имеет направление - это направление движения \oplus зарядов или противоположного движения \ominus зарядов



$$j < j'$$

$\frac{j}{S} - j$ - плотность тока

\vec{j} - вектор, совпадает с направлением тока



v_{cp} - средняя скорость движения зарядов (в металлах электроны)

n - концентрация свободных зарядов $n = \frac{N}{V}$

e - элементарный заряд

Δt - промежуток времени

$$\Delta q = eN = env_{cp} \cdot \Delta t \cdot S$$

$$\bar{I} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = ensv_{cp} ; j = \frac{\bar{I}}{S} = env_{cp}$$

$$\vec{v}_{cp} \quad \bar{j} = en\vec{v}_{cp}$$

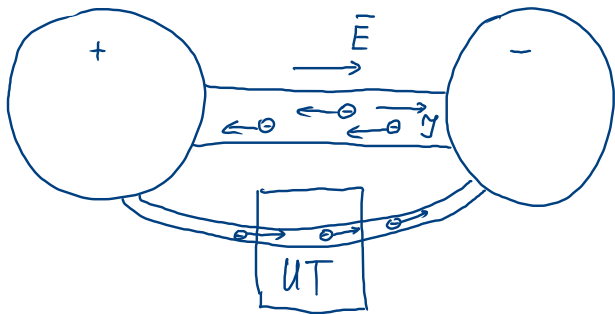
$$\bar{I} = \int_S (\bar{j} d\bar{S})$$

$$d\bar{S} = dS \cdot \bar{k}$$

\bar{k} - вектор нормали к элементарной

площадки сечения проводника (S)

Сторонние силы ЭДС и напряжения



В проводнике возникает кратковременный электрический ток. Необходимо разделять электр. заряды, совершать работу по разделению зарядов.

ИТ - источник тока, разделяет эл. заряды.

Силы, разделяющие заряды в ИТ, называются сторонние силы.

Природа сторонних сил - химическая, механическая, магнитная. Сторонние силы совершают работу по перемещению зарядов.

Электростатическая сила - ЭДС (ЭДС)
источника тока

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

$$\mathcal{E} \equiv A_{\text{ст}} \text{ при } q = 1 (1 \text{ Кл})$$

$$[\mathcal{E}] = \text{В (вольт)}$$

$$\vec{F}_{\text{см}} = \vec{E}_{\text{см}} q \Rightarrow A_{\text{см}} = \oint (\vec{F}_{\text{см}} \cdot d\vec{\ell}) = q \oint (\vec{E}_{\text{см}} \cdot d\vec{\ell}) = q \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E}_{\text{см}} \cdot d\vec{\ell})$$

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{см}} + \vec{F}_{\text{эл}} = q (\vec{E}_{\text{см}} + \vec{E}_{\text{эл}})$$

На участке цепи

$$A_{12} = q \int_1^2 (\vec{E}_{\text{см}} \cdot d\vec{\ell}) + q \int_1^2 (\vec{E}_{\text{эл}} \cdot d\vec{\ell}) = q \mathcal{E}_{12} + q (\varphi_1 - \varphi_2)$$

т. 1 и т. 2 совпадают, $\varphi_1 = \varphi_2$ $A = qE$

$$\oint (\vec{E}_{\text{эп}} \cdot d\vec{e}) = 0$$

$$\frac{A_{12}}{q} = U_{12} - \text{напряжение} \quad U_{12} = E_{12} + (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Напряжение - равна работе, совершаемой эл. полем и сторонними по перемещению единичного положительного заряда

$$\text{Нет источников тока} \quad E_{12} = 0 \quad U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Закон Ома. Сопротивление проводников

Немецкий физик Г. Ом (1787 - 1854)

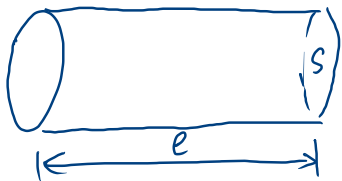
Установлено из эксперимента

$$I \sim U$$

$$I = \frac{1}{R} U \quad ; \quad R - \text{электрическое сопротивление}$$

$$R = \frac{U}{I} \quad ; \quad 1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$$

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad \text{электрическая проводимость}$$



$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \rho = \text{удельное сопротивление}$$

$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$$

$$I = \frac{U}{R}; \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{U \cdot S}{\rho l}; \quad \frac{I}{S} = \frac{U}{\rho l}$$

$$j = \frac{I}{S} E$$

$$\frac{U}{l} = E$$

$$\bar{j} = \frac{\bar{E}}{\rho}$$

\Rightarrow

$$\bar{j} = \gamma \bar{E}$$

Закон Ома
в дифференциальной
форме

$\gamma = \frac{1}{\rho}$ — удельная электрическая проводимость (б)(Г)

$$\gamma = \frac{1}{\rho_{\text{м}}} = \rho_{\text{м}} \quad (\text{сименс})$$

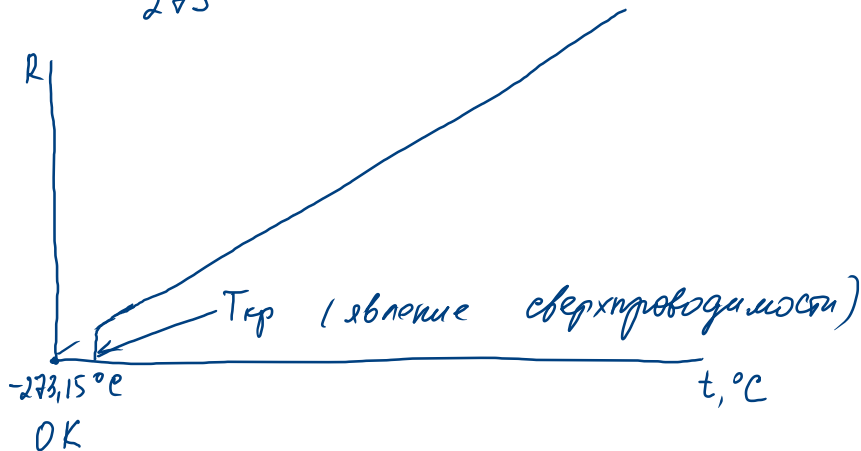
Для металлов
и сплавов

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) ; R = R_0 (1 + \alpha t)$$

α - температурный коэффициент сопротивления

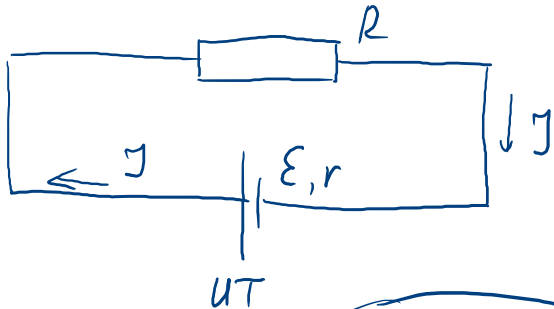
t - температура по шкале Цельсия

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$$



Закон Ома для полной цепи

Полная электрическая цепь содержит источник тока



R - сопротивление
внешнего участка цепи
 E - ЭДС источника тока
 r - сопротивление ИТ
(внутреннее сопротивление)

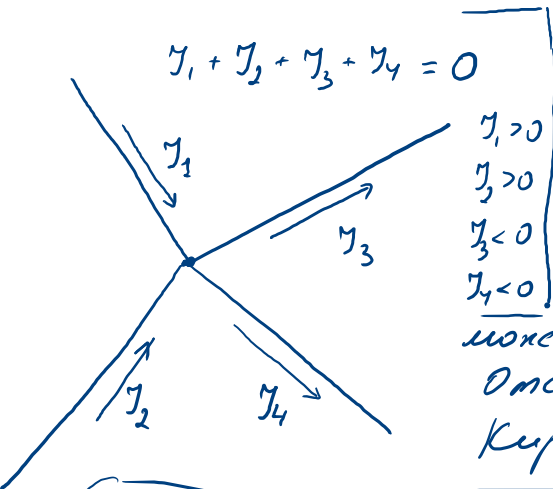
$$J = \frac{E}{R + r}$$

Законы Кирхгофа для электрических цепей

Для расчета электрических цепей используют правила (законы) Кирхгофа, которые являются обобщением закона Ома на случай разветвленных электрических цепей. Их два!

1. Первое правило Кирхгофа

В разветвленных электрических цепях можно выделить узловые точки (узлы), в которых сходится не менее трех проводников



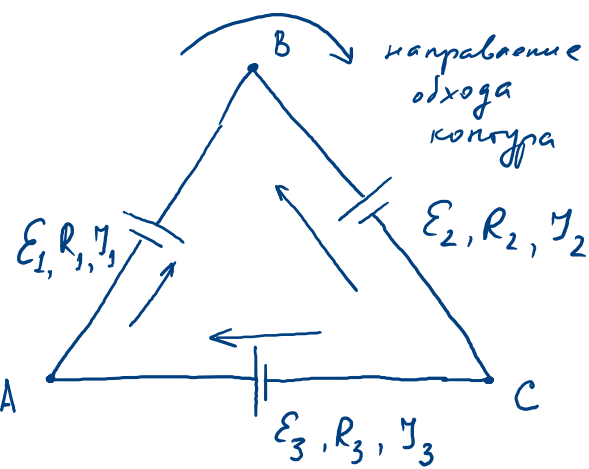
Токи, втекающие в узел, считают положительными, а вытекающие токи — отрицательными. В узлах цепи постоянного тока не может происходить накопление заряда. Отсюда следует первое правило Кирхгофа.

Алгебраическая сумма величин токов для каждого узла равна нулю: $I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0$ или $\sum_i I_i = 0$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

2. Второе правило Кирхгофа

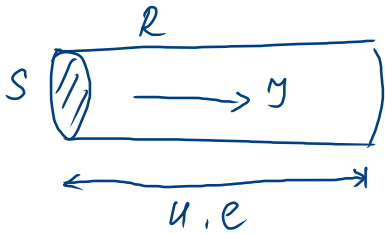
В разветвленной электрической цепи можно выделить некоторое количество замкнутых участков или контуров. На разных участках контура могут протекать различные токи и могут содержаться элементы цепи, как источники тока и электрические сопротивления.



$$\sum \gamma_i R_i = \sum \epsilon_k$$

В любом замкнутом контуре, произвольно выделенный в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма напряжений (подъемов напряжений) на участках контура равна сумме ЭДС, включенных в контур.

Работа и мощность тока. Закон Джоуля - Ленца



$$dq = J dt$$

$$dA = u dq = J u dt = J^2 R dt$$

$$\text{Мощность } P = \frac{dA}{dt} = J u = J^2 R = \frac{u^2}{R}$$

$$dQ = dA = J^2 R dt$$

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

$$\omega = J E^2$$

Классическая теория электропроводности металлов. Закон Ома и Друоля-Лекча

1. Закон Ома



Свободные электроны в металле находятся в хаотичном тепловом движении, $v_{ср}$ - средняя скорость теплового движения электронов, $v_{ср} = 10^5 \frac{м}{с}$. $v_{ср}$ можно найти

из классической формулы

$$v_{ср} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

T - температура, $T = 293 \text{ K}$
 m_0 - масса электрона
 k - постоянная Больцмана

$$u_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 293}{3,14 \times 9,11 \times 10^{-31}}} = 9,4 \cdot 10^4 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Когда проводник находится в электрическом поле, на электроны действует сила электрического поля, и они движутся в одном направлении по действию электрического поля со средней скоростью $v_{\text{ср}}$, причем $v_{\text{ср}} \approx 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$, т.е. $v_{\text{ср}} \ll u_{\text{ср}}$

В проводнике эл. поле $\bar{E} = \text{const}$
Сила, действующая на электрон $\bar{F} = e\bar{E}$ или $F = eE$

$$a = \frac{F}{m_0} = \frac{eE}{m_0}; \text{ скорость } v \text{ увеличивается от } 0 \text{ до } v_{\max}; \Delta t - \text{ время между}$$

двумя ударами с атомами кристаллической решетки. К концу пробега эл-н будет иметь скорость $v_{\max} = v_0 + a\Delta t_{cp}$ при $v_0 = 0$

$$v_{\max} = \frac{Ee\Delta t_{cp}}{m_0} \quad \text{и} \quad v_{cp} = \frac{v_{\max}}{2}$$

Прикинем, что эл-н при ударе отдает всю свою кинетическую энергию.

$$\Delta t_{cp} = \frac{l_{cp}}{v_{cp} + u_{cp}}, \quad l_{cp} - \text{среднее расстояние, которое проходит эл-н до следующего удара с атомом}$$

Т.к. $v_{cp} \ll u_{cp}$, то $\Delta t_{cp} = \frac{l_{cp}}{u_{cp}}$

$$v_{cp} = \frac{v_{max}}{2} = \frac{a \Delta t_{cp}}{2} = \frac{e E \Delta t_{cp}}{2 m_0} = \frac{e E l_{cp}}{2 m_0 u_{cp}}$$

Плотность тока $j = n e v_{cp} = \frac{n e^2 l_{cp}}{2 m_0 u_{cp}} E = \gamma E$

$$\gamma = \frac{n e^2 l_{cp}}{2 m_0 u_{cp}}$$

и $j = \gamma E$ - закон Ома

$u_{cp} \approx 10^5 \frac{m}{c}$
Согласуется с экспериментом

2. Закон Дресса - Лекса

К концу свободного пробега э-на перед следующим ударом его кинетическая энергия будет после подстановки

$$W_k = \frac{m_0 v_{\max}^2}{2} = \frac{e^2 v_{\varphi}}{2 m_0 u_{\varphi}^2} E^2$$

При соударении с атомом энергия электрона полностью передается атому, т.е. кристаллической решетке, внутренняя энергия растет, т.е. проводник (металл) нагревается. Число столкновений электрона за единицу времени

$$Z = \frac{U_{\varphi} \cdot 1(c)}{v_{\varphi}}$$

$$\omega = n z W_k = \frac{n e^2 l_{cp}}{2 m_0 \mu_{cp}} E^2 = \gamma E^2$$

$$\omega = \gamma E^2$$

- энергия, выделяемая за единицу времени в единице объема неапатического проводника. Закон Джоуля-Ленца

$$\gamma = \frac{n e^2 l_{cp}}{2 m_0 \mu_{cp}}$$

$$\mu_{cp} \approx 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$