РГПУ им.А.И.Герцена

Лекция 13

Электрический ток

2016 г.

План

1. Электрический ток и его характеристики. Основные определения
   1.1. Сила тока
   1.2. Плотность тока
   1.3. Электродвижущая сила
   1. 4. Напряжение
2. Закон Ома
3. Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей
4. Закон Джоуля-Ленца (в интегральной и локальной форме)
5. Процессы заряда и разряда конденсатора
6. Основы классической электронной теории проводимости металлов; её недостатки
7. Термоэлектронная эмиссия

Электрический ток

Электрический ток – **направленное** движение электрических зарядов

Сила тока

Определение: $I = \frac{dq}{dt}$

Сила тока численно равна заряду, проходящему через сечение проводника за единицу времени

$$[I] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{Кл}{c} = A$$

Сила тока – скаляр (не вектор)

$I = \frac{q}{\Delta t}$ **- только для постоянного тока**

Плотность тока

Определение: $$j = \frac{dI}{dS}$$

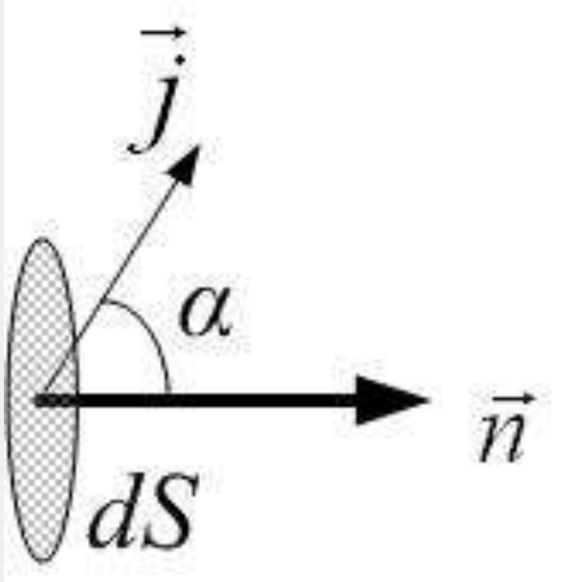
Плотность тока – это сила тока, приходящаяся на единицу сечения проводника

$$[j] = \frac{[I]}{[S]} = \frac{A}{м^2}$$

Плотность тока – вектор; направлен параллельно скорости движения зарядов

$$j = \frac{dI}{dS}$$

$dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}$ – ток, проходящий через элемент сечения проводника ***dS***



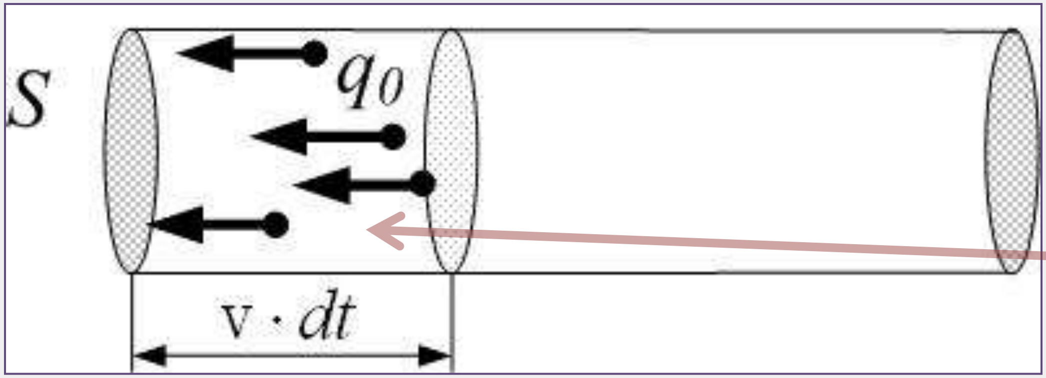
Полный ток через поверхность ***S*:**

$$I = \int_S dI = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j \cdot \cos\alpha \cdot dS$$

v - средняя скорость направленного движения зарядов

q_0 **–** заряд частицы

n – концентрация заряженных частиц



$$dN = n \cdot dV$$

$$dV = S\text{v}dt$$

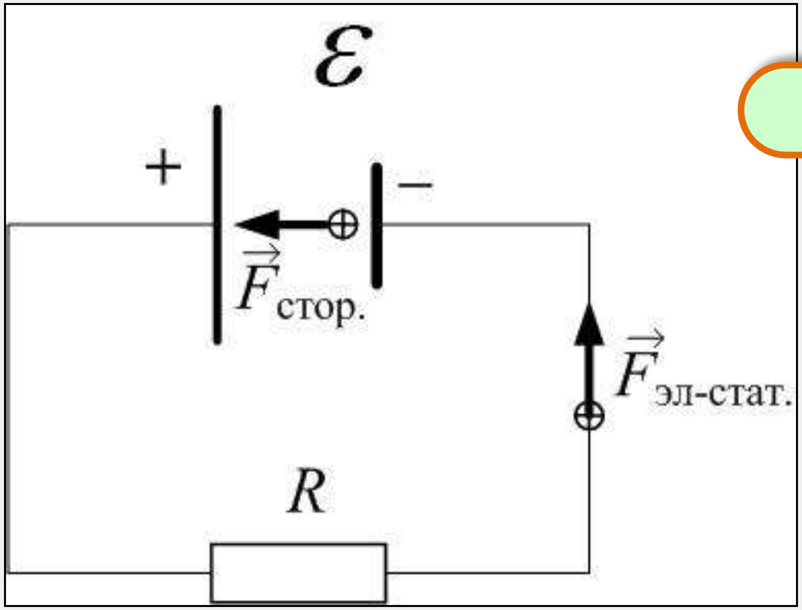
$dq = q_0 \cdot dN$ – заряд, перенесённый через сечение ***S*** за ***dt***

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{q_0 \cdot n \cdot S \cdot \text{v} \cdot dt}{dt} = q_0 \cdot n \cdot S \cdot \text{v}$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q_0 \cdot n \cdot \cancel{S} \cdot \text{v}}{\cancel{S}} = q_0 \cdot n \cdot \text{v} \longrightarrow \boxed{\vec{j} = q_0 \cdot n \cdot \vec{\text{v}}}$$

Электродвижущая сила (ЭДС)

Для того, чтобы <u>ток</u> в проводнике <u>поддерживался</u>, нужны сторонние силы (неэлектростатические)



Определение:

ЭДС источника – это работа сторонних сил по переносу единичного заряда в цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{стор.}}{q}$$

$$[\mathcal{E}] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{Дж}{Кл} = В \quad (\text{Вольт})$$

$$\vec{E}_{\text{стор.}} = \frac{\vec{F}_{\text{стор.}}}{q}$$

- напряжённость поля сторонних сил

Сила, действующая на заряд: $\vec{F}_{\text{стор.}} = q \cdot \vec{E}_{\text{стор.}}$

Работа сторонних сил при переносе заряда ***q*** на произвольном участке цепи от точки 1 до точки 2:

$$A_{\text{стор.}12} = \int_1^2 dA_{\text{стор.}} = \int_1^2 \vec{F}_{\text{стор.}} d\vec{l} = \int_1^2 q \cdot \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l} = q \cdot \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор.}}}{q} \rightarrow \mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

Для замкнутого контура:

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

Напряжённость суммарного поля кулоновских (электростатических) и сторонних сил равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{кул.}} + \vec{E}_{\text{стор.}}$$

Суммарная (полная) сила:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} = q \cdot \left(\vec{E}_{\text{кул.}} + \vec{E}_{\text{стор.}}\right)$$

Работа суммарной силы при переносе заряда на участке цепи при переносе заряда *q* на произвольномучастке цепи от точки 1 до точки 2:

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \cdot \int_1^2 \left(\vec{E}_{\text{кул.}} + \vec{E}_{\text{стор.}}\right) \cdot d\vec{l} = q \cdot \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул.}} d\vec{l} + q \cdot \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул.}} d\vec{l}$$

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} d\vec{l}$$

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot \mathcal{E}_{12}$$

Напряжение

Определение:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q}$$

Напряжение численно равно суммарной работе кулоновских и сторонних сил по переносу единичного заряда на данном участке цепи

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot \mathcal{E}_{12}$$

$$U_{12} = \frac{q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot \mathcal{E}_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}$$

$$\boxed{U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}$$

Напряжение

$$\boxed{U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}$$

Понятие напряжения обобщает понятия разность потенциалов и ЭДС

Частные случаи:

Контур замкнут (1=2)

$\varphi_1 = \varphi_2 \rightarrow \boxed{U = \mathcal{E}}$

Однородный участок цепи (не содержит ЭДС)

$\boxed{U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)}$

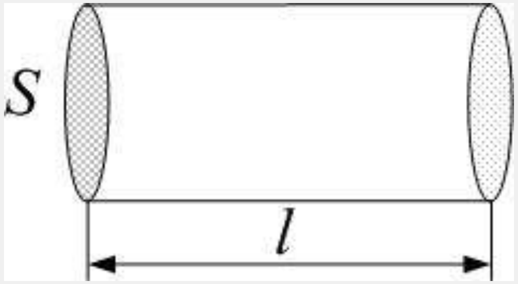
Закон Ома (для участка цепи)

Установлен экспериментально

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

Сопротивление проводника:

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



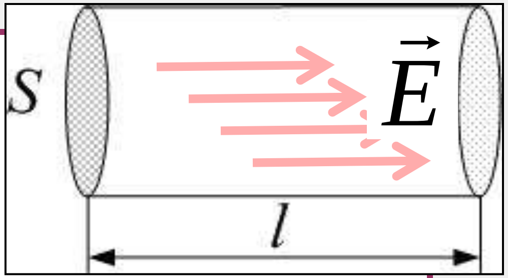
Зависит от температуры:

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

При 0^{0}C

При температуре t^{0}C

Закон Ома в дифференциальной (локальной) форме



$$\begin{cases} j = \dfrac{I}{S} \\ I = \dfrac{U}{R} \\ R = \rho\dfrac{l}{S} \\ U = E \cdot l \end{cases} \Rightarrow \quad j = \frac{I}{S} = \frac{U}{SR} = \frac{U}{S\rho\frac{l}{S}} = \frac{U}{\rho \cdot l} = \frac{E \cdot l}{\rho \cdot l} = \frac{E}{\rho}$$

Определение: $\gamma = \dfrac{1}{\rho}$

Удельная электропроводимость – это величина, обратная удельному сопротивлению

$$\boxed{\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E}}$$

Закон Ома

$$\boxed{\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E}}$$

$$\vec{j} = \gamma \cdot \left(\vec{E}_{\text{кул.}} + \vec{E}_{\text{стор.}}\right)$$

Закон Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} \equiv \frac{U_{12}}{R} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}}{R}$$

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}$$

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей

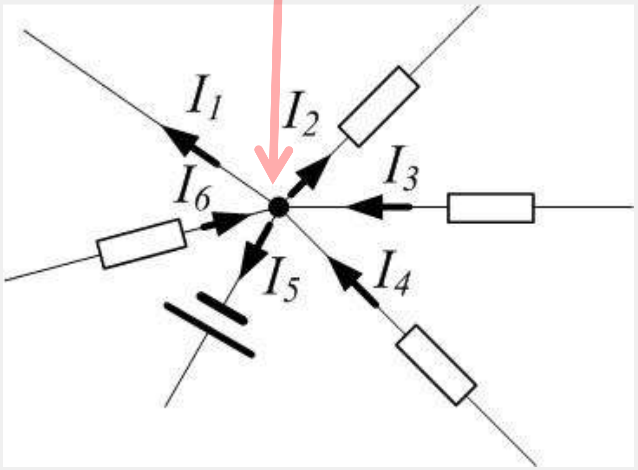
Первое правило (для узла)

$$\sum_i I_i = 0$$

I правило:

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

Узел



Пример:

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей

Второе правило (для произвольного контура)

Для каждого участка любого замкнутого контура:

$$(IR)_i = (\varphi_1 - \varphi_2)_i + \mathcal{E}_i$$

Просуммируем по всему замкнутому контуру с учётом, что поле кулоновских сил потенциально:

$$\sum_i (\varphi_1 - \varphi_2)_i = \oint_L \vec{E}_{\text{кул.}} d\vec{l} = 0$$

$$\sum_i (IR)_i = \sum_i \mathcal{E}_i$$

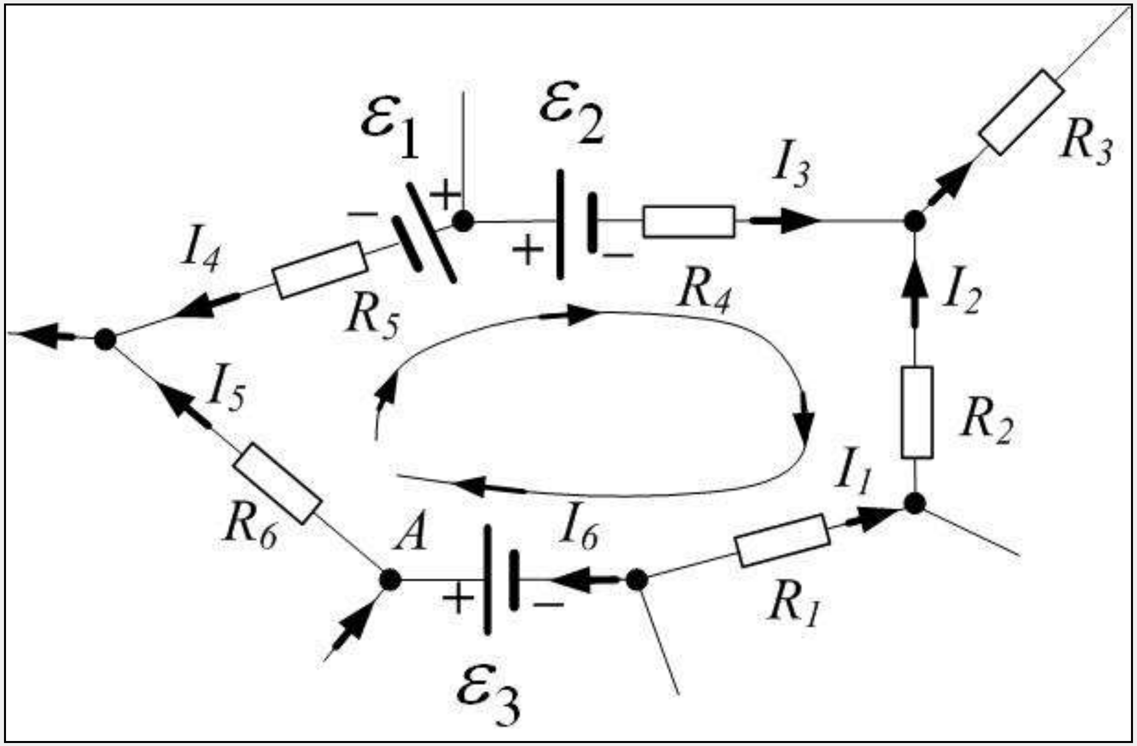
II правило:

Алгебраическая сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, включенных в данный контур

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей

Второе правило (для произвольного контура)

Пример:

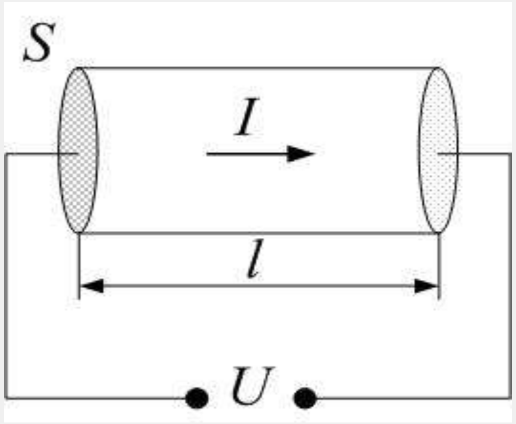


$$\sum_i (IR)_i = \sum_i \mathcal{E}_i$$

$$I_5R_6 - I_4R_5 + I_3R_4 - I_2R_2 - I_1R_1 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца

Работа тока за малый промежуток времени ***dt*** по переносу заряда ***dq=Idt*** по проводнику сопротивлением ***R***, на который подано напряжение ***U*** равна:



$$dA = dq \cdot U$$

$$dA = dq \cdot U = I \cdot U \cdot dt$$

Мощность тока:

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{I \cdot U \cdot dt}{dt} = I \cdot U$$

$$P = I \cdot U = I \cdot (I \cdot R) = I^2 R$$

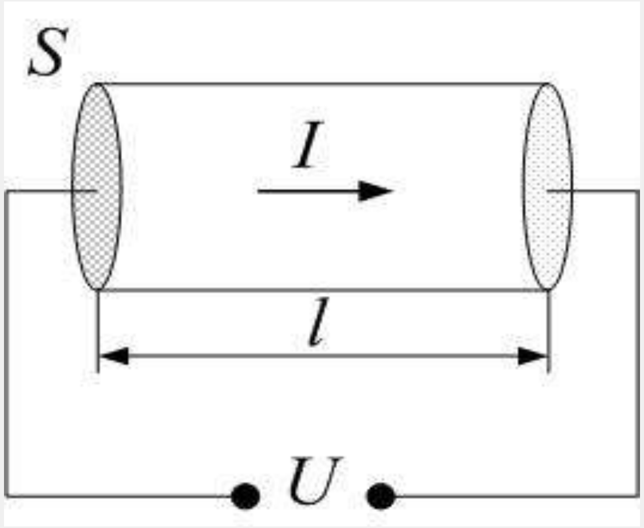
$$P = I \cdot U = \frac{U}{R} \cdot U = \frac{U^2}{R}$$

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

Закон Джоуля-Ленца в интегральной форме

Если работа сводится к выделению теплоты на резисторе, то:

$$dA = dQ = IUdt$$



Теплота, выделившаяся за конечный промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} dQ = \int_{t_1}^{t_2} IUdt$$

$$Q = R \cdot \int_{t_1}^{t_2} I^2 dt$$