

ЛЕКЦИЯ № 5

Гл. 2. Электрический ток и его основные законы

1. Электрический ток и его основные характеристики

Электрический ток – упорядоченное движение заряженных частиц. За направление тока принимается направление движения положительных зарядов.

Условия существования электрического тока:

- 1) наличие свободных зарядов;
- 2) наличие электрического поля.

Основной характеристикой тока является сила тока.

Сила тока – скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , проходящего через поперечное сечение проводящей среды за время dt , к этому промежутку времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (5-1)$$

В СИ сила тока измеряется в амперах (А).

Если сила тока не изменяется ($i = I = \text{const}$), то ток называют постоянным, тогда

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (5-1a)$$

Еще одной характеристикой электрического тока является плотность электрического тока – это физическая величина, равная заряду, проходящему за единицу времени через поперечное сечение проводящей среды единичной площади

$$j = \frac{dq/dt}{dS_{\perp}} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (5-2)$$

В СИ плотность электрического тока измеряется в А/м².

\vec{j} – псевдовектор, $\vec{j} \parallel \vec{E}$ (\vec{j} направлен в сторону протекания электрического тока).

$$j = \frac{dq/dt}{dS_{\perp}} = \frac{q_0 dN}{dt \cdot dS_{\perp}} \cdot \frac{d\ell}{d\ell} = q_0 \frac{dN}{dS_{\perp} d\ell} \cdot \frac{d\ell}{dt} = q_0 n \langle v \rangle$$
$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{v} \rangle \quad (5-3)$$

где q_0 – заряд частицы;

n – концентрация заряженных частиц;

$\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость направленного движения частиц.

2. Закон Ома для однородного участка электрической цепи

Однородным называется участок электрической цепи, на котором действуют только электрические (консервативные) силы.

Если проводящая среда оказывает препятствие движению зарядов, то она имеет электрическое сопротивление R .

В СИ электрическое сопротивление измеряется в омах (Ом).

Сопротивление металлической проволоки постоянного сечения рассчитывается по формуле:

$$R = \rho_e \frac{\ell}{S}, \quad (5-4)$$

где ρ_e – удельное электрическое сопротивление материала проволоки, Ом·м;

ℓ – длина проводника, м;

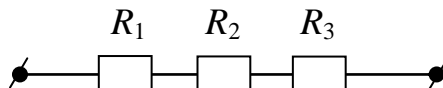
S – площадь поперечного сечения проводника, м².

закон Ома для однородного участка цепи утверждает: сила тока на участке электрической цепи прямо пропорциональна падению напряжения на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5-5)$$

На участке электрической цепи могут находиться несколько сопротивлений, включенных последовательно или параллельно.

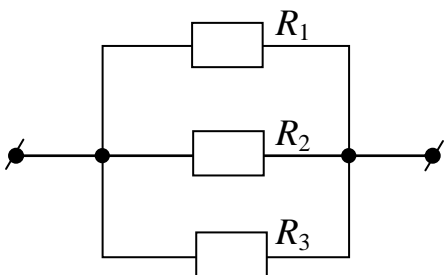
При последовательном соединении n проводников (рис.)



$$\begin{cases} I_{\text{об}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n; \\ U_{\text{об}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n; \\ R_{\text{об}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \end{cases} \quad (5-6)$$

(при $R_1 = R_2 = \dots = R$; $R_{\text{об}} = nR$);

при параллельном (рис) –



$$\begin{cases} I_{\text{об}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n; \\ U_{\text{об}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n; \\ \frac{1}{R_{\text{об}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \end{cases} \quad (5-7)$$

(при $R_1 = R_2 = \dots = R$; $R_{\text{об}} = \frac{R}{n}$).

3. Тепловое действие тока. Закон Джоуля-Ленца. Мощность электрического тока

Электрический ток, протекая по проводнику, нагревает его. Количество тепла, выделяемое в проводнике при протекании по нему электрического тока, вычисляется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = \int_0^t i^2 R dt. \quad (5-8)$$

Для постоянного тока формула (5-8) примет вид:

$$Q = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = IU \Delta t, \quad (5-8a)$$

где Δt – время протекания тока.

Тепловое действие тока носит и вредный характер (потеря энергии в проводах), и полезный (в различных электронагревательных приборах). Любой электронагревательный прибор характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД):

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{зат}}} \cdot 100 \%, \quad (5-9)$$

где $Q_{\text{зат}}$ – энергия электрического тока (вычисляется по формулам (5-8), (5-8a));

$Q_{\text{пол}}$ – полезная энергия нагревательного прибора.

Так, например, для нагрева какого-либо вещества (жидкости, твердого тела)

$$Q_{\text{пол}} = mc_m \Delta T = mc_m (T_2 - T_1), \quad (5-10)$$

где m – масса вещества, кг;

c_m – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К);

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность значений конечной и начальной температуры нагреваемого вещества. (Формула (5-10) справедлива для $c_m = \text{const}$ в интервале значений температуры ΔT .)

Скалярная физическая величина энергии, выделяемая в проводнике в единицу времени, называется мощностью электрического тока.

$$P = \frac{\delta Q}{\delta t} = i^2 R = iU = \frac{U^2}{R} \quad (5-11)$$

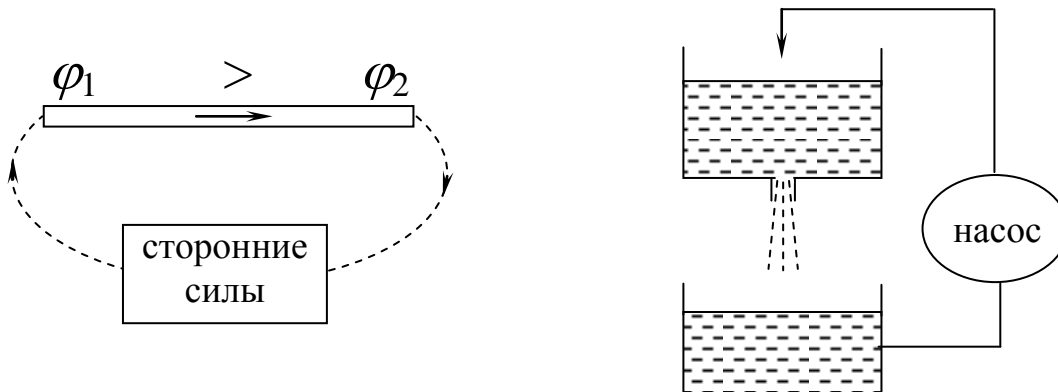
Мощность в СИ измеряется в ваттах (Вт).

Для постоянного тока $i = I = \text{const}$

$$P = I^2 R = IU = \frac{U^2}{R} \quad (5-11a)$$

4. Сторонние силы. Электродвижущая сила, напряжение. Закон Ома для неоднородного участка и для полной цепи

Для непрерывного протекания тока в электрической цепи нужен источник тока (батарея, аккумулятор, генератор и т. п.). Если в проводниках заряды двигаются электрическими силами от большего потенциала к меньшему, то в источнике тока должны работать какие-то сторонние силы неэлектрического происхождения, которые будут перемещать заряды от меньшего потенциала к большему.



В замкнутой электрической цепи работают электрические силы в проводниках и сторонние силы внутри источника. Тогда

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_e d\vec{\ell} + \int_1^2 \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{\ell} = q \int_1^2 \vec{E}_e d\vec{\ell} + q \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{\ell}.$$

Работа электрических сил по перемещению единичного электрического заряда между двумя точками электрического поля называется разностью потенциалов между этими точками (см. формулу (2-15)).

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{e12}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_e d\vec{\ell} \quad (5-12)$$

Основной характеристикой любого источника является электродвижущая сила (ЭДС).

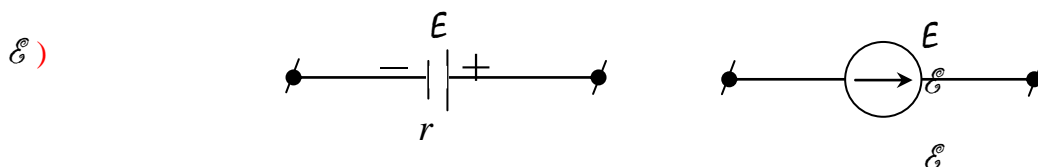
ЭДС (\mathcal{E}) источника – скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил $A_{\text{ст}}$, перемещающих электрический заряд q внутри источника против электрических сил, к величине этого заряда:

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{\ell}. \quad (5-13)$$

В СИ ЭДС измеряется в вольтах (В).

Электрическое сопротивление источника называют внутренним сопротивлением r .

ЭДС на схемах изображают в виде:



Суммарная работа электрических и сторонних сил по перемещению единичного электрического заряда называется напряжением (падением напряжения) на данном участке.

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12} \quad (5-14)$$

В СИ напряжение измеряется в вольтах (В).

Участок электрической цепи, на котором действуют кроме электрических еще и сторонние силы, называется неоднородным.

Закон Ома для неоднородного участка цепи утверждает: сила тока на таком участке прямо пропорциональна падению напряжения на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U_{12}}{R_{\text{об}}} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R + r}. \quad (5-15)$$

Закон Ома для замкнутой (полной) электрической цепи (рис.) утверждает: си-

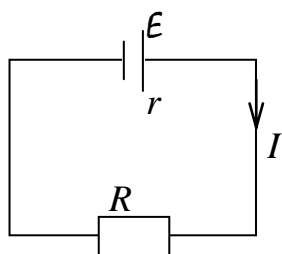


Схема замкнутой (полной) электрической цепи

ла тока в замкнутой цепи I прямо пропорциональна ЭДС в этой цепи и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи $R_{\text{полн}}$:

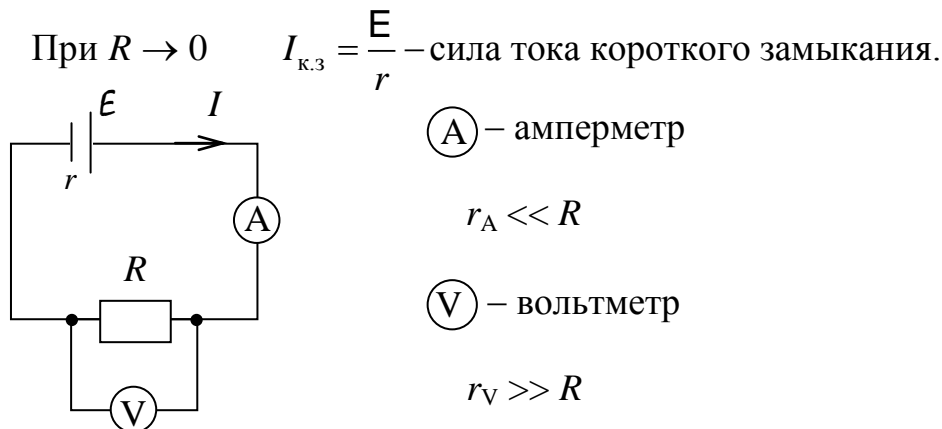
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{полн}}} = \frac{\mathcal{E}}{r + R}, \quad (5-16)$$

где R – общее сопротивление внешней цепи.

Если в замкнутой цепи находится несколько ЭДС, то нужно вычислить алгебраическую сумму отдельных ЭДС:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n.$$

($\mathcal{E} > 0$, если сторонние силы действуют в направлении тока в цепи, и $\mathcal{E} < 0$, если сторонние силы действуют в противоположном направлении тока в цепи).



5. Разветвленная электрическая цепь. Правила Кирхгофа

Для расчета разветвленных электрических цепей применяют правила Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0 \quad (5-17)$$

(токи, подходящие к узлу, берутся со знаком «плюс», отходящие – со знаком «минус»).

Второе правило Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках замкнутого контура (алгебраическая сумма произведений силы токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура) равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{j=1}^M E_j, \quad (5-18)$$

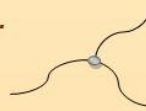
где N – число отдельных участков, на которые разбивается контур цепи;

M – число ЭДС в замкнутом контуре.

Для применения второго правила Кирхгофа выбирается (произвольно) определенное направление обхода контура (по ходу часовой стрелки или против хода). Положительными считаются токи, направления которых совпадают с направлением обхода контура. ЭДС источников электрической энергии считаются положительными, если они создают токи, направление которых совпадает с направлением обхода контура.

Правила Кирхгофа (1).

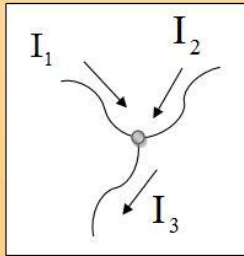
Узлом называется точка, в которой сходятся 3 и более проводников.



1 Правило:

- Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна 0. Втекающие берутся со знаком « + », вытекающие со знаком « - »

$$\sum I_i = 0$$



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Направление токов выбирают произвольно. Для любой цепи можно записать $i-1$ независимых уравнения, где i – число узлов.

12

Правила Кирхгофа (2).

2 Правило:

Сумма падения напряжений на участках цепи произвольного контура равна сумме ЭДС, действующих в этом контуре.

$$\sum_i I_i \underbrace{R_i}_{U_i} = \sum_j \mathcal{E}_j$$

Если выбранный ток в участках цепи совпадает с произвольно выбранным обходом контура, падение напряжения входит со знаком « + », не совпадает с « - ».

ЭДС входит с « + », если направление обхода контура совпадает с направлением от « + » к « - » во внешней цепи (или от « - » к « + » внутри ЭДС) и наоборот.

Независимыми будут только те уравнения, которые нельзя получить наложением других контуров друг на друга. Их будет $N-1$, где N – число контуров.

13

Правила Кирхгофа (3).

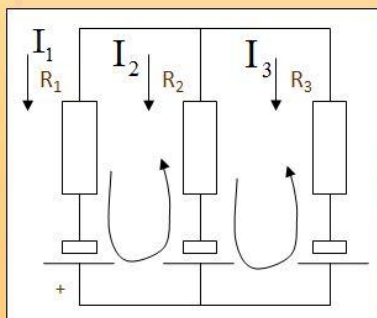
Пример 1. Закон Ома для полной цепи

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

$$\varepsilon = I_R + I_r$$

- 2 правило Кирхгофа

Пример 2. Правила Кирхгофа



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

для нижнего узла

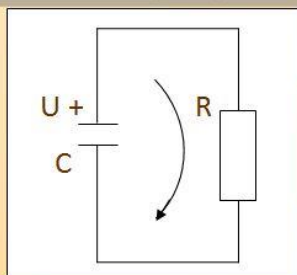
$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

$$I_2 R_2 - I_2 R_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3$$

14

Правила Кирхгофа (4).

Пример 3: Разрядка конденсатора



$I(t) - ?$

Запишем для контура
2-ое правило Кирхгофа:

$$U_C + U_R = 0$$

$$\frac{q}{C} + IR = 0$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{RC} q$$

$$\frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt, \quad \text{где } RC = \tau$$

$$\int \frac{dq}{q} = -\frac{1}{\tau} \int dt + \ln C$$

$$\ln q = -\frac{t}{\tau} + \ln C, \quad C = \text{const}$$

$$\ln \frac{q}{C} = -\frac{t}{\tau}$$

$$\frac{q}{C} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$q = C \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = 0 \Rightarrow C = q_0$$

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$



15