

---

ОБЩАЯ ФИЗИКА.

Электричество.

Лекции №№ 8 – 9.

---

**ПОСТОЯННЫЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**

- 
- **Понятие об электрическом токе**
  - **Условия возникновения и существования тока проводимости**
  - **Сила тока. Вектор плотности тока**
  - **Уравнение непрерывности**
  - **Закон Ома для однородного участка цепи**
  - **Закон Ома для неоднородного участка цепи. Закон Ома для замкнутой цепи**
  - **Закон Ома в дифференциальной форме**
  - **Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной форме**
  - **Законы Кирхгофа**
  - **Классическая теория электропроводности металлов**
-

---

## *Понятие об электрическом токе*

**Электрический ток** – упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. Различают:

**Ток проводимости (ток в проводниках)** – движение микрочарядов в макротеле.

**Конвекционный ток** – движение макроскопических заряженных тел в пространстве.

**Ток в вакууме** – движение микрочарядов в вакууме.

Носители зарядов (электроны в металле) совершают сложное движение:

1) хаотическое со средней скоростью  $v \sim (10^3 - 10^4 \text{ м/с})$

2) направленное со средней скоростью  $v \sim E$  ( доли мм/с)

Проводник при протекании электрического тока электронейтрален:

$$\rho_+ = \rho_-.$$

---

---

# *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.
  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 какого-либо вида энергии в энергию электрического поля.
-

## Сила тока

**Сила тока** – количественная мера (характеристика) электрического тока.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

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

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

$$dI = \vec{j} d\vec{S} = jdS \cos(\angle \vec{j}, d\vec{S}) = jdS \cos \alpha = jdS_n. \quad d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}.$$

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad dq = env dS dt; \quad j = \frac{dq}{dS dt} = env. \quad \vec{j} = en\vec{v}.$$

# Уравнение непрерывности

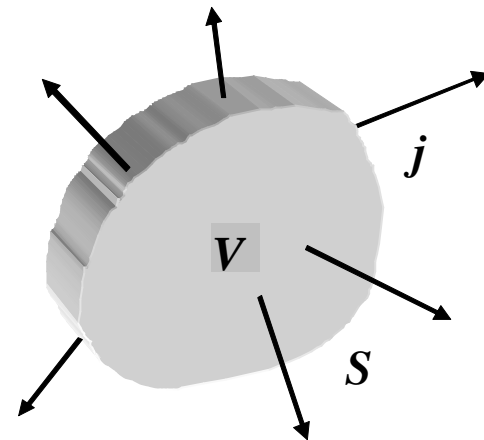
Пусть в некоторой среде выделим воображаемый объем ограниченный замкнутой поверхностью. Тогда величина заряда, вытекающего за 1 с из объема

$$I = -\frac{dq}{dt} = \oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV.$$

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV.$$

$$I = \oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV. \quad \Rightarrow \quad \operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

**уравнение непрерывности** (закон сохранения заряда)



---

# *Закон Ома для однородного участка цепи*

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

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

- а) Ток в газах и полупроводниках подчиняется закону Ома только при небольших  $U$ .
  - б) Ток в вакууме не подчиняется закону Ома даже при малых  $U$ , а подчиняется закону Богуславского - Лэнгмюра (закон 3/2):  $I \sim U^{3/2}$ .
  - в) в дуговом разряде – при увеличении тока напряжение падает.
-

---

## *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.

$$d\varphi = Edl;$$

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





# Сторонние силы. Электродвижущая сила

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, которое создает и поддерживает разность потенциалов  $\Delta\varphi$

**Электродвижущая сила** (э.д.с.) –

физическая величина,

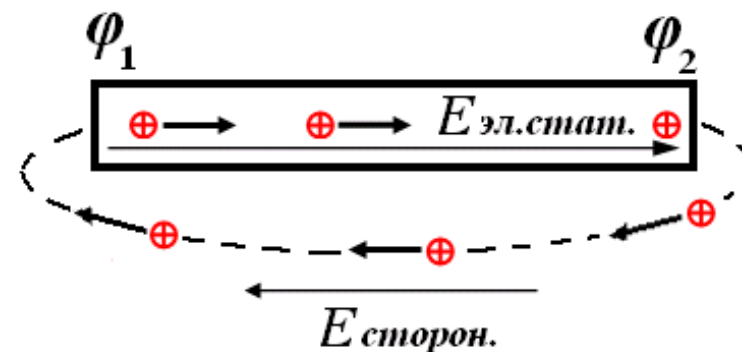
определяемая

работой, совершаемой

сторонними

силами при перемещении единичного

положительного заряда

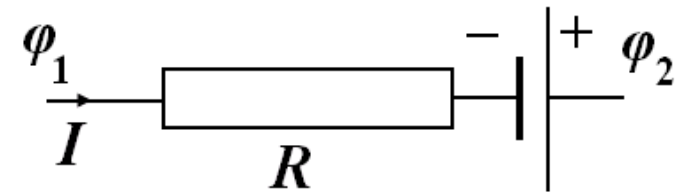


## Закон Ома для неоднородного участка цепи. Закон Ома для замкнутой цепи

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

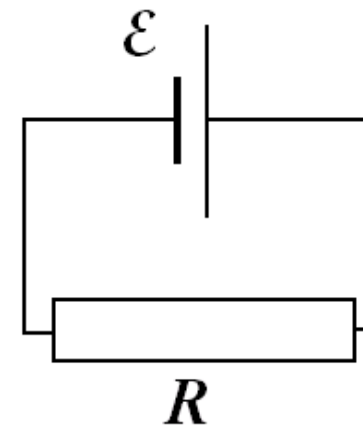
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon}{R}$$

– закон Ома для  
неоднородного участка  
цепи



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

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



## *Работа и мощность электрического тока. Закон*

### *Джоуля-Ленца в интегральной форме*

Мощность электрического тока:  $P = \frac{A}{t}$ .

Однородный участок цепи

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)I \cdot t = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad P = IU$$

Неоднородный участок цепи

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon) = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon)I \cdot t.$$

$$P = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon)I.$$

Замкнутая цепь  $A = \varepsilon I \cdot t. \quad P = \varepsilon I.$

К.п.д. источника тока:  $\eta = \frac{I^2 R}{I \varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}.$

# Закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме

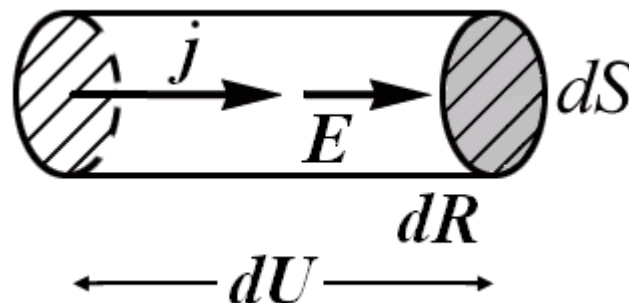
**Удельная тепловая мощность тока** – количество тепла, выделившееся в единичном объеме за единицу времени

$$q = \frac{dQ}{dVdt}$$

$$dQ = (dI)^2 dRdt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dSdl}_{dV} \cdot dt, j = \sigma E.$$

$$dQ = \sigma^2 E^2 \rho dV \cdot dt, \sigma = \frac{1}{\rho}.$$

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



---

# *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 и проводящее электрический ток.

***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

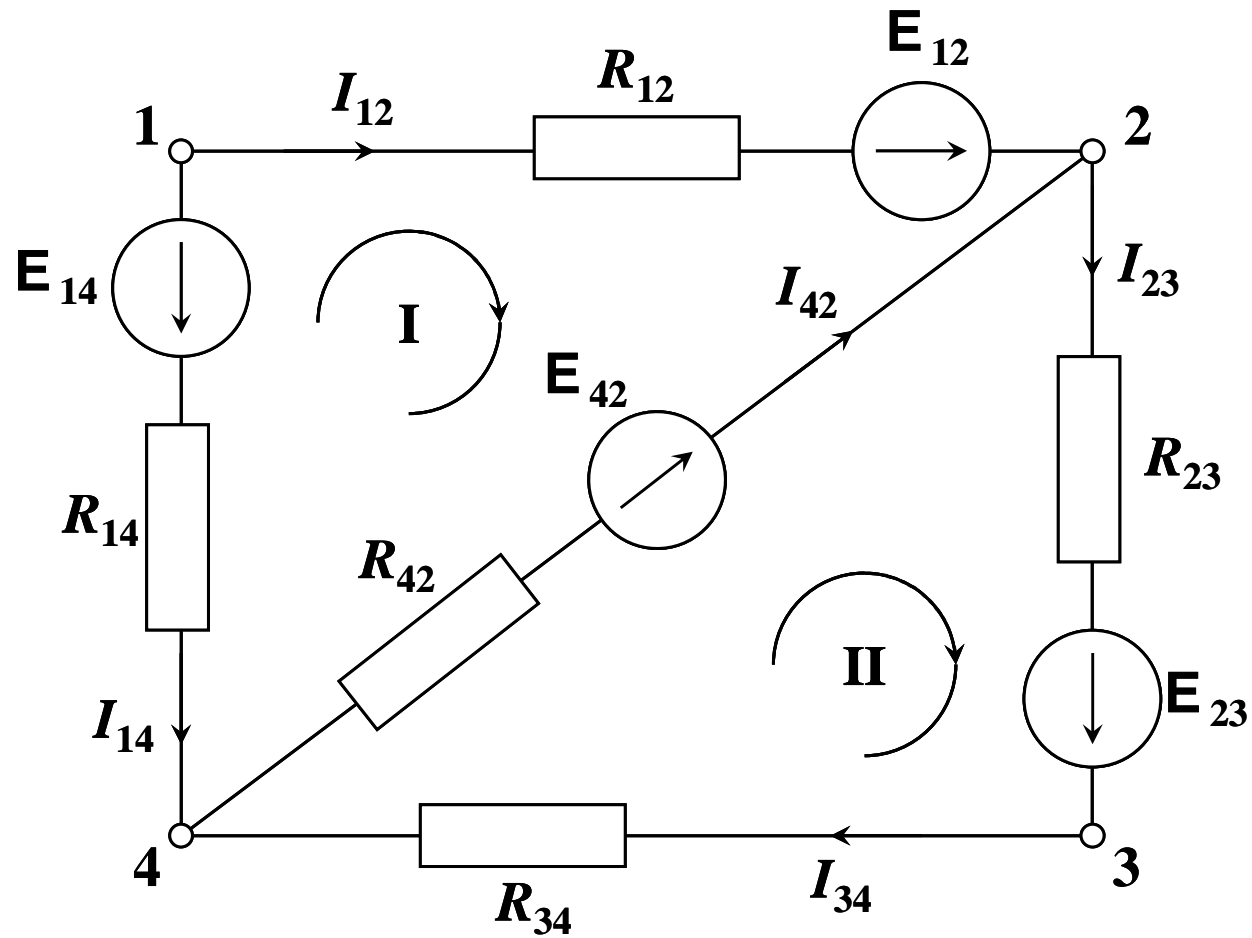
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

**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

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

---

# Электрическая цепь



# Для I контура

- Запишем закон Ома для неоднородного участка цепи

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \mathbf{E}_{12} = I_{12} R_{12}$$

$$\varphi_2 - \varphi_4 - \mathbf{E}_{42} = -I_{42} R_{42}$$

$$\varphi_4 - \varphi_1 - \mathbf{E}_{14} = -I_{14} R_{14}$$

$$I_{12} R_{12} - I_{42} R_{42} - I_{14} R_{14} = \mathbf{E}_{12} - \mathbf{E}_{42} - \mathbf{E}_{14} \quad (1)$$

Получим второй закон Кирхгофа

$$\sum_i I_i R_i = \sum_i \mathbf{E}_i$$



## Для II контура:

- Приведенные уравнения (1), (2), (4) позволяют найти все токи

$$I_{42} R_{42} + I_{23} R_{23} + I_{34} R_{34} = \mathbf{E}_{42} + \mathbf{E}_{23} \quad (3)$$

$$I_{12} + I_{14} = 0,$$

$$-I_{12} - I_{42} + I_{23} = 0, \quad (4)$$

$$-I_{23} + I_{34} = 0,$$

$$-I_{34} - I_{14} + I_{42} = 0.$$

---

# Классическая электронная теория проводимости металлов

- Закон Ома в классической теории

$$\bar{v} = \frac{0 + v_{\text{макс}}}{2} = \frac{eE\tau}{2m} \quad \tau = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{u}} \quad \bar{v} = \frac{eE\bar{\lambda}}{2m\bar{u}}$$
$$j = env = \frac{e^2 n E \bar{\lambda}}{2m\bar{u}} = \sigma E. \quad \sigma = \frac{e^2 n \bar{\lambda}}{2m\bar{u}}.$$



# Закон Джоуля – Ленца

- Кинетическая энергия, которую приобретает электрон,

$$E_{\text{кин}} = \frac{m v_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{e^2 \bar{\lambda}^2}{2 m \bar{u}^2} E^2$$

*За единицу времени электрон испытывает  $\bar{z}$  столкновений с ионами.*

$$\bar{z} = \frac{\bar{u}}{\lambda}$$

*Тогда*

$$\bar{\omega} = n \bar{z} E_{\text{кин}}$$

$$\bar{\omega} = \frac{e^2 n \bar{\lambda}^2}{2 m \bar{u}^2} E^2 = \sigma E^2$$

# Недостатки классической теории

- 1. Зависимость сопротивления металлов от температуры
- Из теории  $\rho \sim \sqrt{T}$ . Из опыта  $\rho \sim T$ .

## 2. Теплоемкость металлов

$$C = 3R \text{ (Из опыта).}$$

$$C = 9/2 R \text{ (Из теории).}$$

**3. Длина свободного пробега электронов для совпадения эксперимента с теорией должна быть в сотни раз больше, чем период кристаллической решетки.**

**4. Коэффициент в законе Видемана –Франца.**

---