

**Классическая теория
электропроводности.**

Законы постоянного тока

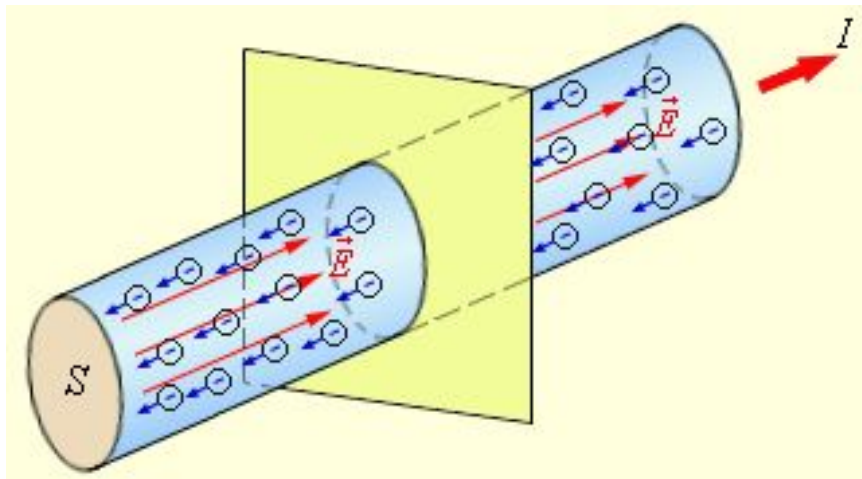
А. А. Детлаф, Б. М. Яворский,

18.1 – 18.3; 19.1 – 19.3

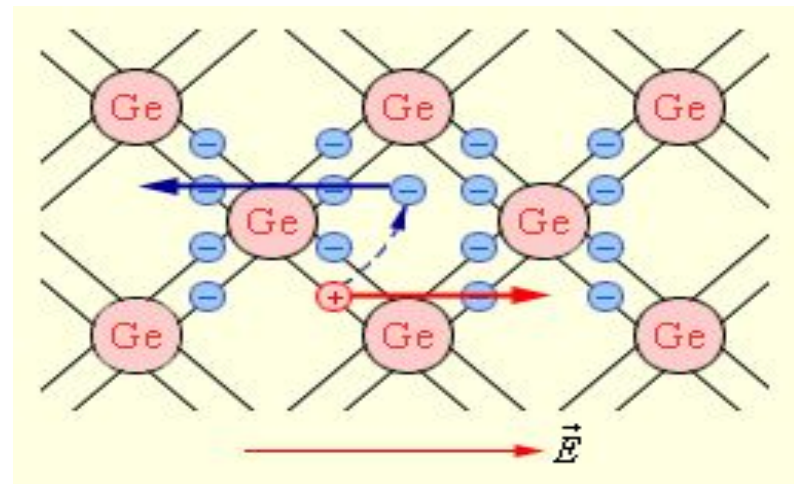
Н.П.Калашников, Н.М. Кожевников.

**Интернет-тестирование базовых
знаний, 3 ДЕ, задания 11, 13, 15.**

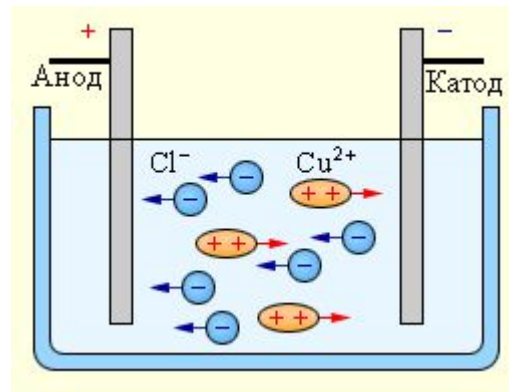
Носители тока:



свободные электроны в металлах,



электроны и дырки в полупроводниках,



ионы в электролитах.

Ток проводимости

-упорядоченное движение
заряженных частиц:

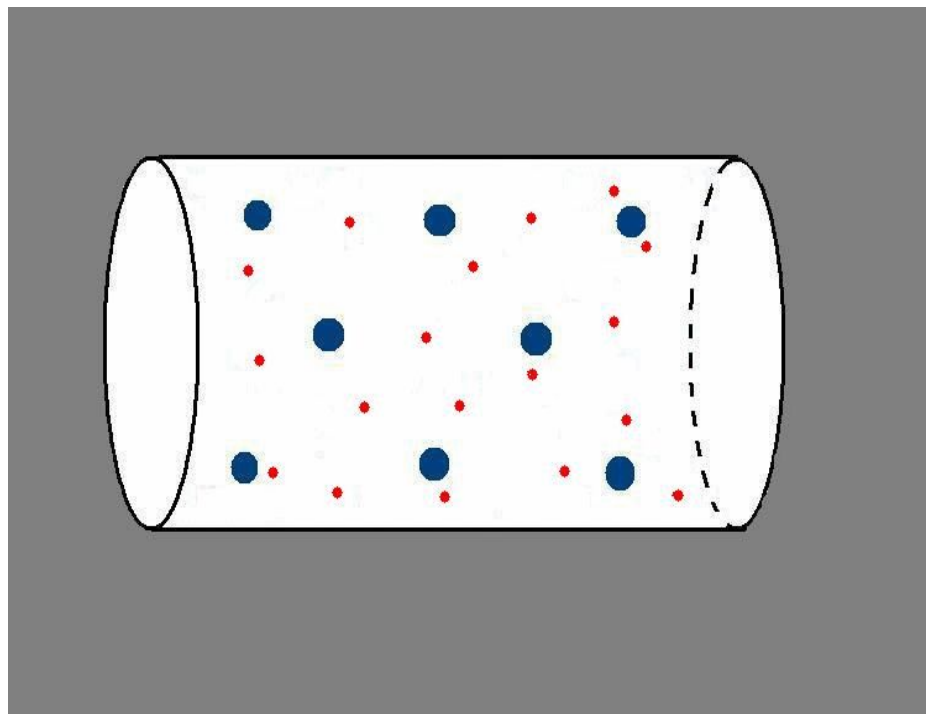
электронов, ионов (вакуум, ионизованные газы, плазма); электронов проводимости (металлы); электронов проводимости и дырок (полупроводники), ионов (электролиты).

Конвекционный электрический ток обусловлен движением заряженных макротел.

Ток проводимости возникает под действием электрического поля.

Направление электрического тока – направление движения положительных зарядов.

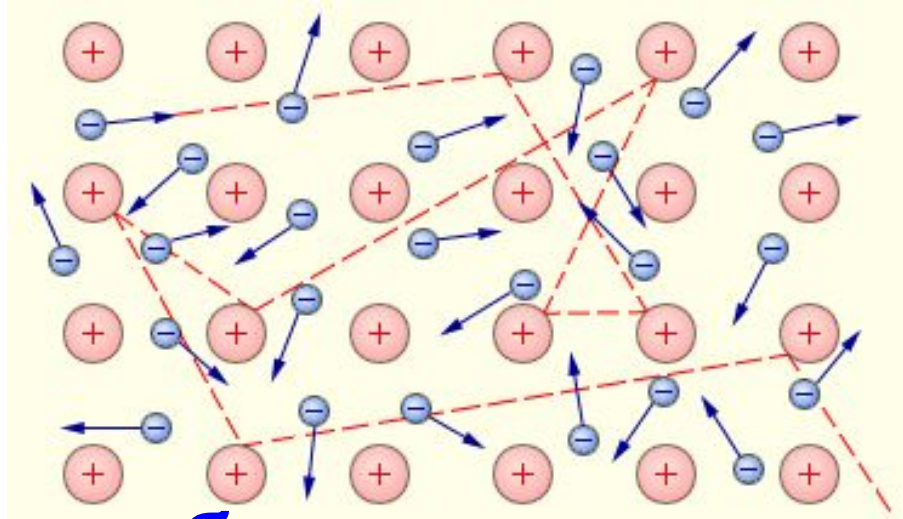
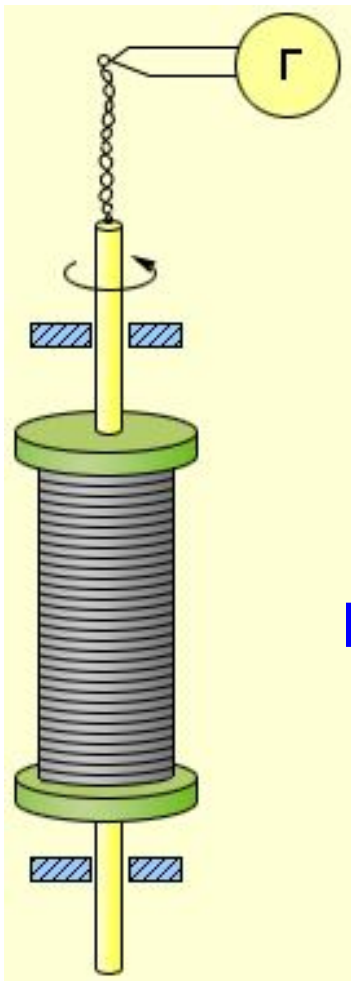
Носители тока в проводнике –
ЭЛЕКТРОНЫ проводимости.



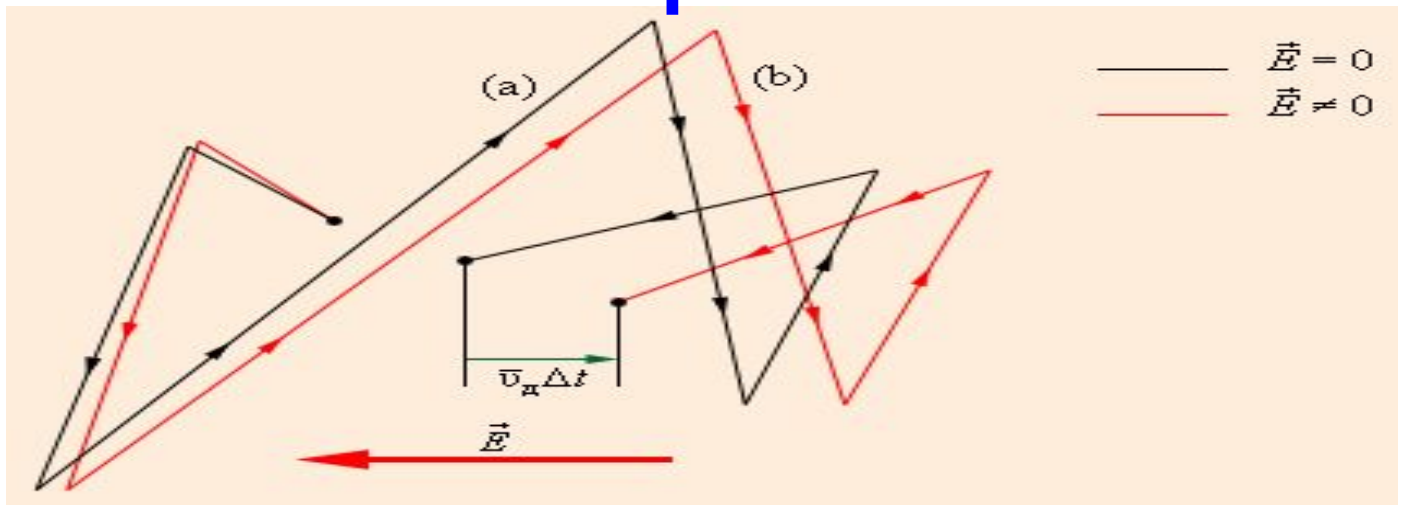
**Скорость
теплового
движения
электронов
при**

$T=273K$

$\langle u \rangle \sim 100 \text{ км/с}$



Газ свободных электронов в кристаллической решетке металла



**Р.Толмен,
Б.Стюарт,
1916г.**

Масштабы дрейфа сильно преувеличены

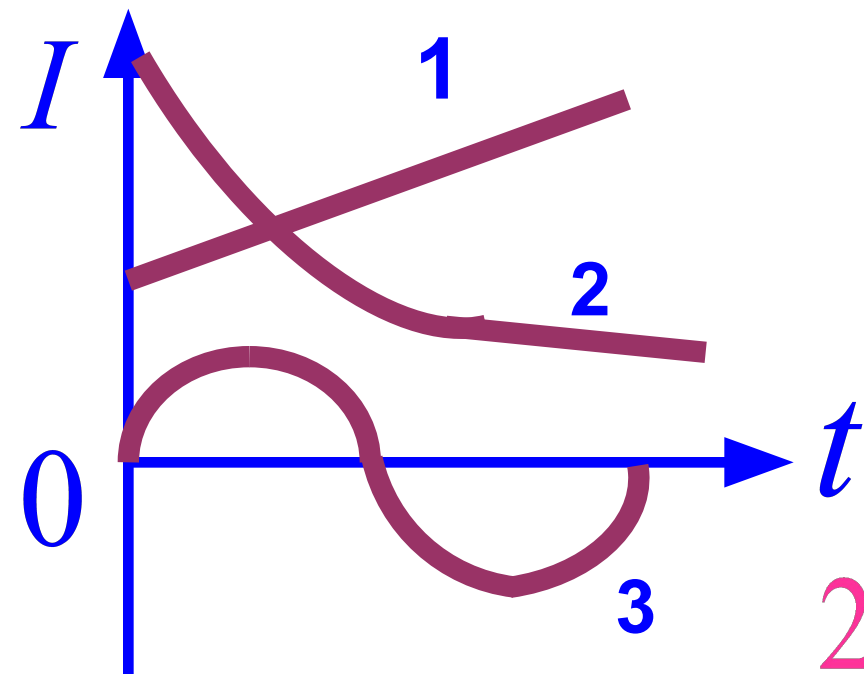
Характеристики электрического тока

1. Сила тока $I = \frac{dQ}{dt}$, $[I] = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$,
 dQ - заряд, переносимый через
поверхность **S**, ортогональную
направлению тока, за время dt .

2. **Постоянный ток** не изменяется
по величине и направлению

$$I = \text{const.}$$

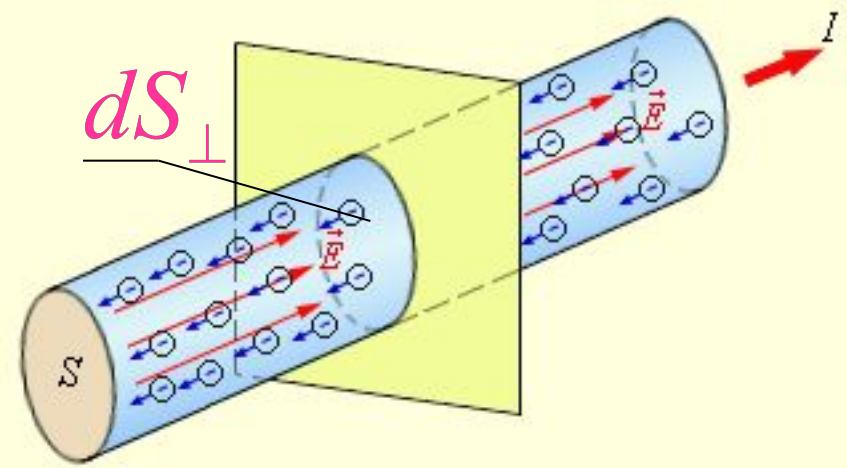
3. Переменный ток зависит от времени $I \neq const$:



1) $I = I_0 + kt;$

2) $I = I_0 \exp(-Rt/L);$

3) $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0).$



4. Плотность тока

j — вектор, совпадающий с направлением электрического тока в данной точке, численно равен

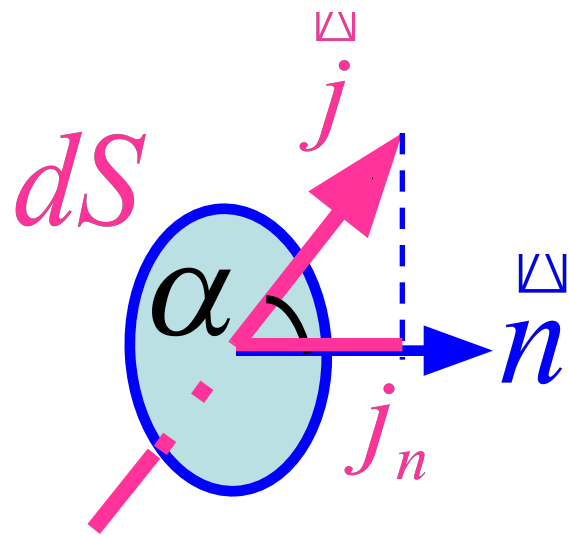
$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad [j] = \frac{A}{m^2},$$

dS_{\perp} — площадь малого элемента поверхности, ортогональной направлению тока.

Сила тока dI сквозь участок
поверхности dS

$$dI = j dS_{\perp} = j dS \cos \alpha = j d\vec{S},$$

где $d\vec{S} = \vec{n} dS$.



Сила тока I через
поверхность S

$$I = \int_S j d\vec{S} = \int_S j_n dS,$$

$j_n = j \cos \alpha$ - проекция вектора
плотности тока на \vec{n} .

Вектор плотности тока в металле

$$\vec{j} = -en_0 \langle \vec{v} \rangle,$$

где $-e$ - заряд электрона; n_0 - концентрация электронов проводимости; $\langle \vec{v} \rangle$ - средняя скорость их дрейфа (направленного движения).

При максимально допустимых токах

$$\langle v \rangle \approx 10^{-3} \text{ м/с.}$$

КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

П. Друде, Г. Лоренц; электроны

Гендрик Антон Лоренц (1853–1928г.)

проводимости образуют элект-
ронный газ (одноатомный иде-
альный):

1) концентрация электронов

$$n_0 \approx 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^3;$$

2) длина свободного пробега

$$\langle \lambda \rangle \approx 10^{-10} \text{ м};$$

3) скорость теплового движения

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle \approx 10^5 \text{ м/с (при } T = 273\text{К)};$$

4) уравнение движения электрона в электрическом поле

$$m \frac{dv}{dt} = eE, \quad \int_0^{\langle v_m \rangle} dv = \frac{eE}{m} \int_0^{\langle \tau \rangle} dt,$$

$$\langle v \rangle = \frac{\langle v_m \rangle}{2}, \quad \langle v \rangle = \frac{eE \langle \tau \rangle}{2m}, \quad \langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle},$$

$$\langle v \rangle = \frac{eE \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle}, j = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E = \gamma E = \frac{1}{\rho} E$$

где γ - удельная проводимость;

$\rho = \frac{1}{\gamma}$ - удельное сопротивление.

Так как j и E одного направления, то

$$j = \gamma E = \frac{E}{\rho} \text{ - закон Ома для...}$$

Закон Джоуля - Ленца

При столкновении с ионами кристаллической решетки электрон теряет кинетическую энергию, полученную под действием электрического поля

$$\langle \Delta W \rangle = \frac{1}{2} m \langle v_{\max} \rangle^2.$$

Эта энергия передается иону кристаллической решетки.

Во внутреннюю энергию в единице объема за 1 с преобразуется энергия электрического тока

$$w = \frac{n_0 \langle u \rangle m \langle v_m \rangle^2}{2 \langle \lambda \rangle},$$

w - объемная плотность тепловой мощности тока,

n_0 - число электронов в единице объема,

$\langle u \rangle / \langle \lambda \rangle$ - число столкновений за 1с.

Учитывая, что

$$\langle v_m \rangle = \frac{eE\langle \tau \rangle}{m} ; \quad \langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle}, \quad \text{получим}$$

$$w = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E^2, \quad \gamma \text{ - удельная проводимость.}$$

γ

$$w = \gamma E^2 = \overline{jE} = \frac{1}{2} \gamma j^2 = \rho j^2$$

- закон Джоуля – Ленца в...

Закон Видемана-Франца (1853г.)

Для всех металлов при $T = \text{const}$
отношение теплопроводности к
удельной электропроводности
одинаково:

$$\frac{K}{\gamma} = \text{const.}$$

Уточен Л. Лоренцом (1882г.)

$$\frac{K}{\gamma} = CT.$$

Идея: теплопроводность металлов осуществляется электронным газом (одноатомный идеальный)

$$K = \frac{1}{3} \rho c_V \langle \lambda \rangle \langle u \rangle = \frac{1}{2} n_0 k \langle \lambda \rangle \langle u \rangle$$

$\frac{3}{2} n_0 k$ $\sqrt{\frac{3kT}{m}}$

$$\frac{K}{\gamma} = \frac{3k^2}{e^2} T = CT \quad C = 2,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Джс}^2}{\text{Кл} \cdot \text{К}}$$

Разногласия выводов классической теории электропроводности металлов и эксперимента:

теория

эксперимент

$$\rho \sim \sqrt{T}$$

$$\rho \sim T$$

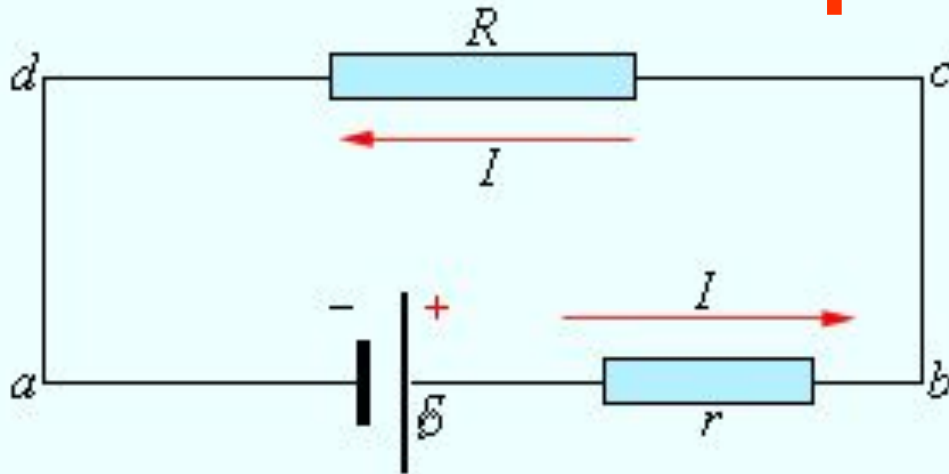
Молярная теплоемкость

$$4,5R$$

$$\sim 3R$$

Классическая теория заменена **квантовой** теорией .

Участки электрической цепи:



ab - неоднородный,
 cd – однородный

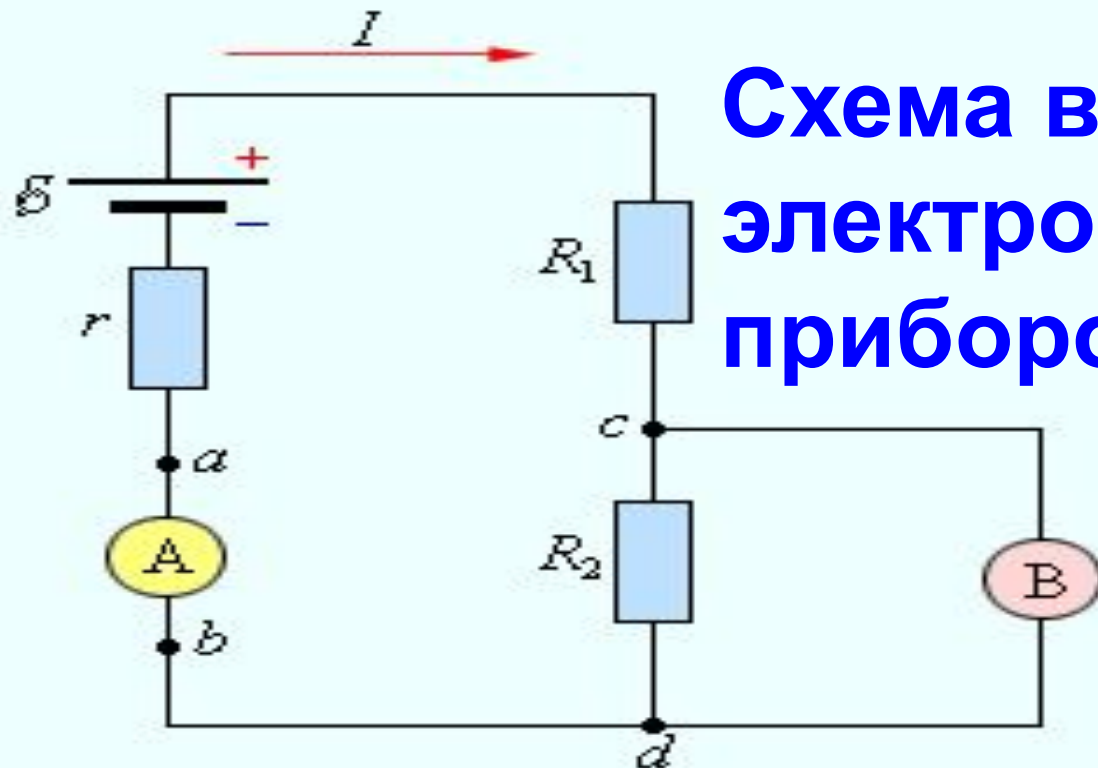


Схема включения
электроизмерительных
приборов

Закон Ома для участка цепи

Ток в цепи создают источники тока за счет работы сторонних сил (силы химической природы).

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q} \left[\frac{Дж}{Кл} = V \right]$$

- электродвижущая сила (ЭДС), равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.

Закон Ома для участка с ЭДС

(неоднородный)

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} (\vec{E}_{кул} + \vec{E}_{ст})$$

Умножим скалярно на $d\vec{l}$

$$\rho \vec{j} d\vec{l} = \vec{E}_{кул} d\vec{l} + \vec{E}_{ст} d\vec{l},$$

$$U_{12} = \int_1^2 \rho \frac{d\vec{l}}{S} = \int_1^2 \vec{E}_{кул} d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{ст} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

Напряжение на участке 1-2

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

- численно равно работе кулоновских и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда по участку цепи 1-2;

$\varphi_1 - \varphi_2$ - падение потенциала на участке 1-2;

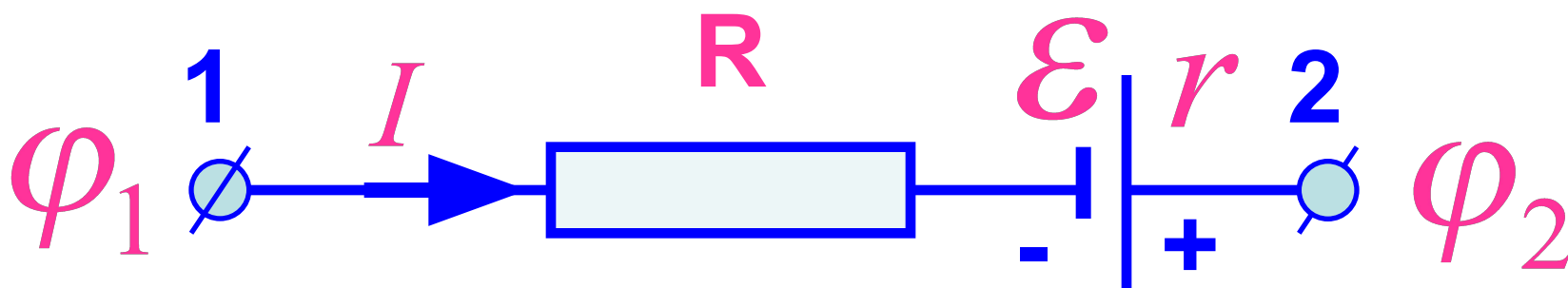
\mathcal{E}_{12} - электродвижущая сила на 1-2.

Сопротивление участка цепи 1-2

$$R_{12} = \frac{\rho \boxtimes_{12}}{S}$$

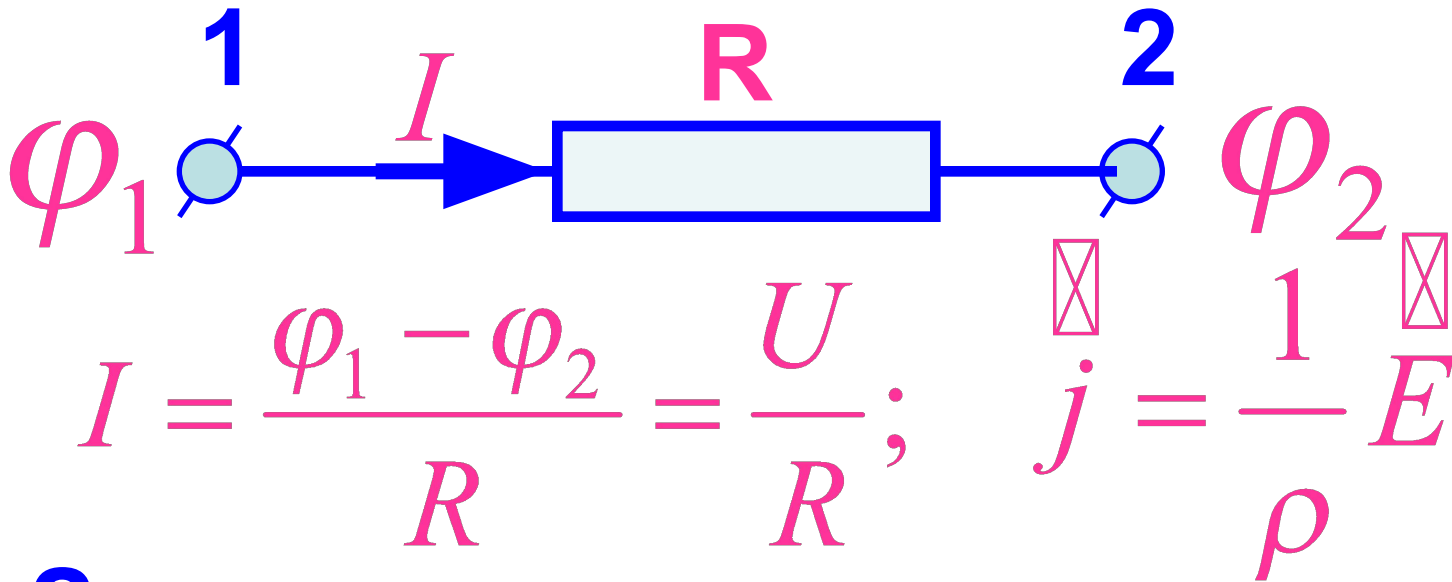
Закон Ома для участка цепи с ЭДС

$$I_{12}R = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}_{12}$$



Неоднородный (активный) участок

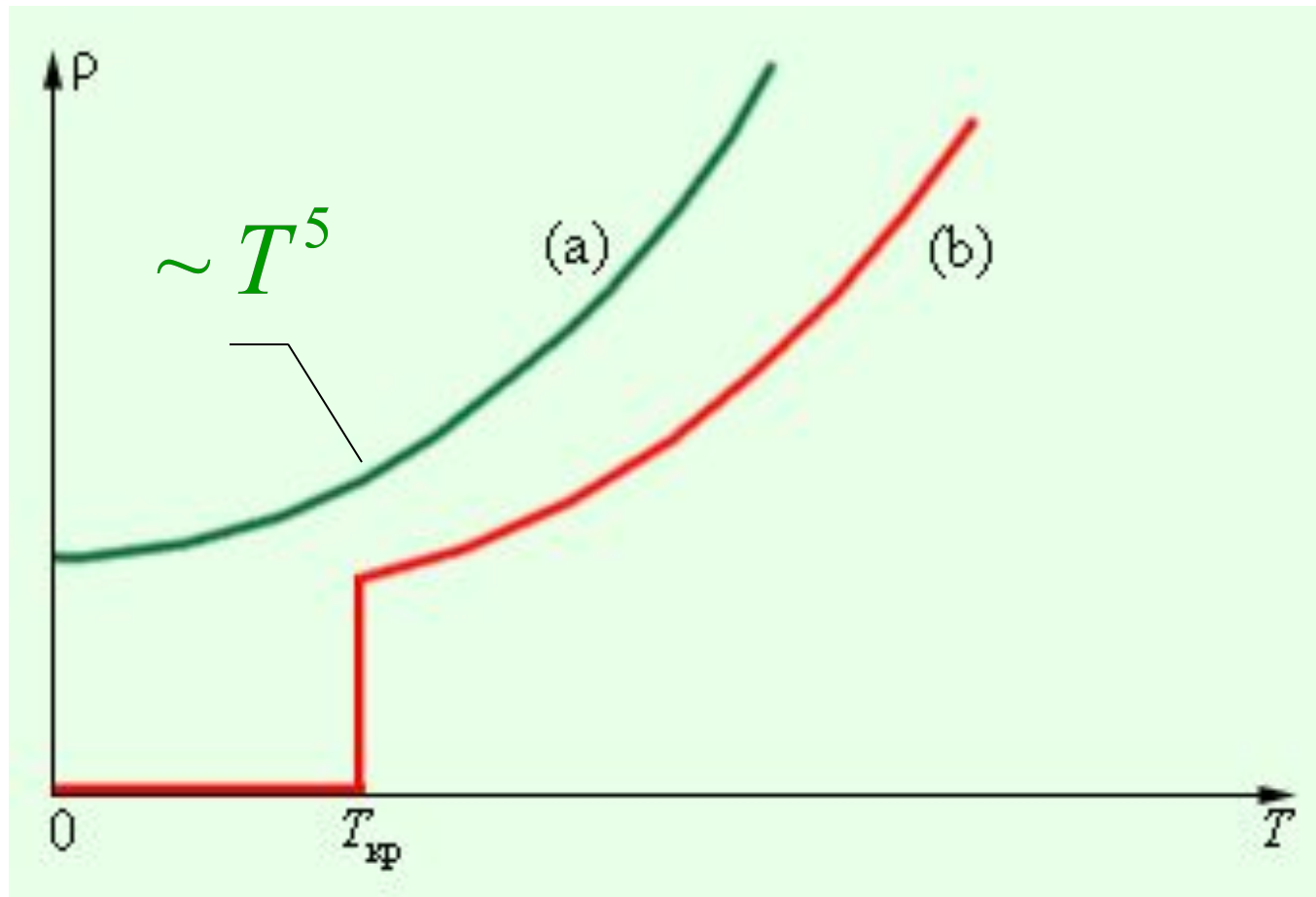
Однородный (пассивный) участок электрической цепи



Зависимость сопротивления от температуры:

$$R = R_0 (1 + \alpha t^0); \quad \rho = \rho_0 \alpha T.$$

**Зависимость $\rho(T)$ при низких температурах:
(a) – металл; (b) – сверхпроводник**



$T_{кр}$ - критическая температура (0,14 – 20)К.
(1911г. Г.Камерлинг – Оннес , Нг)

$$w = \rho j^2$$

Закон Джоуля-Ленца

(однородный участок)

Работа тока расходуется на нагревание проводника:

$$\delta A = \delta Q = w dV dt = w S d\ell dt;$$

$$\delta Q = \rho j^2 S d\ell dt = I^2 \rho \frac{d\ell}{S} dt;$$

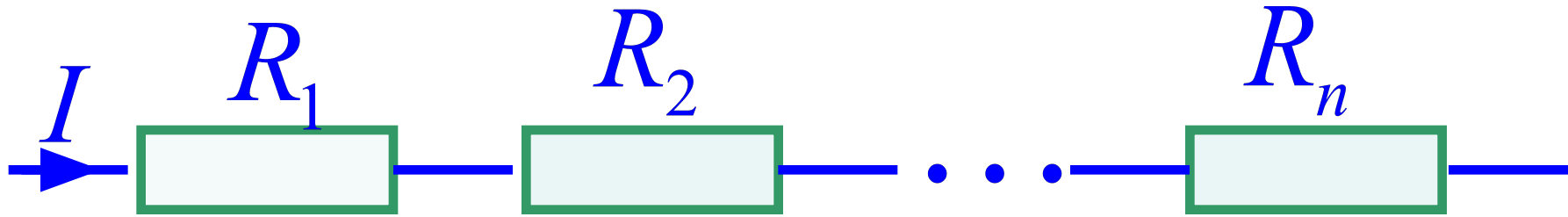
$$R = \frac{\rho}{S} \int_1^2 d\ell; \quad Q = I^2 R \int_0^t dt;$$

$$Q = I^2 R t$$

-закон Джоуля - Ленца.

Сопротивления соединяют:

1) последовательно



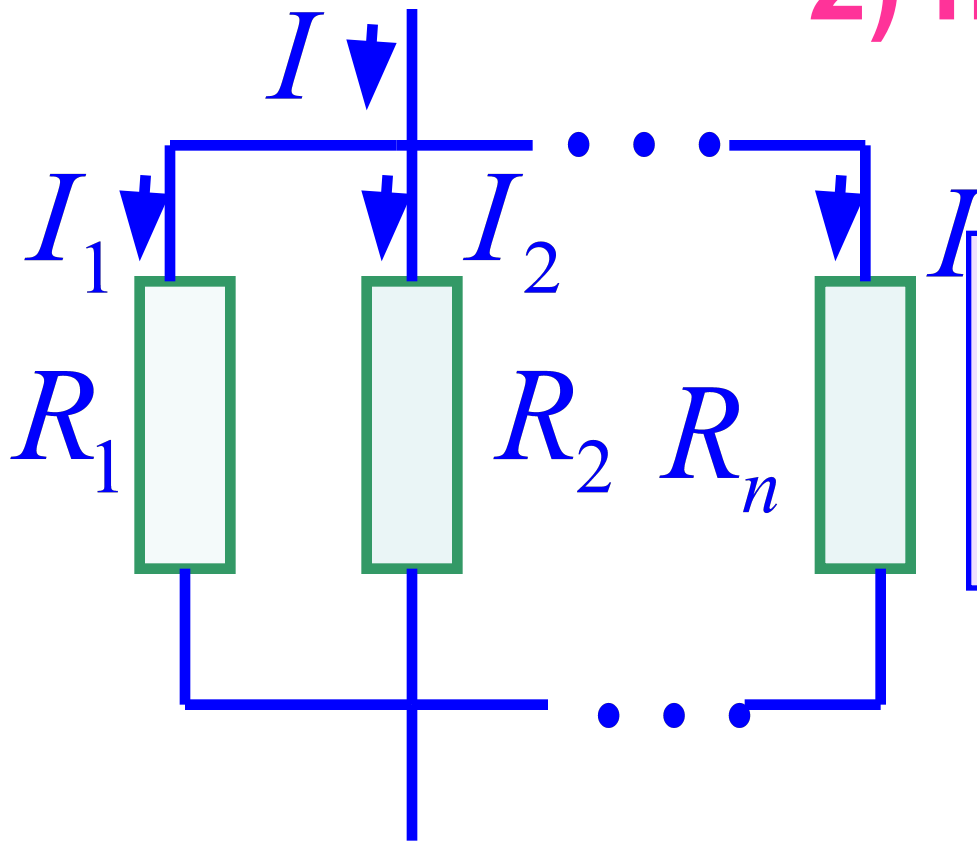
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n,$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n,$$

$$R = \sum_i R_i.$$

(1)

2) параллельно



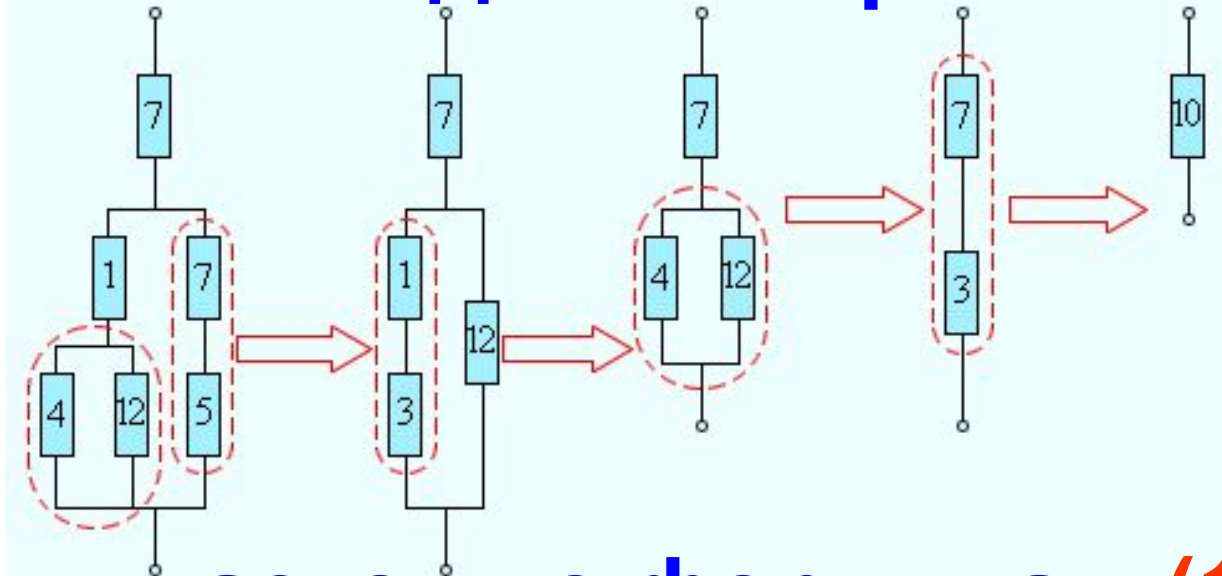
$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}, \quad (2)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

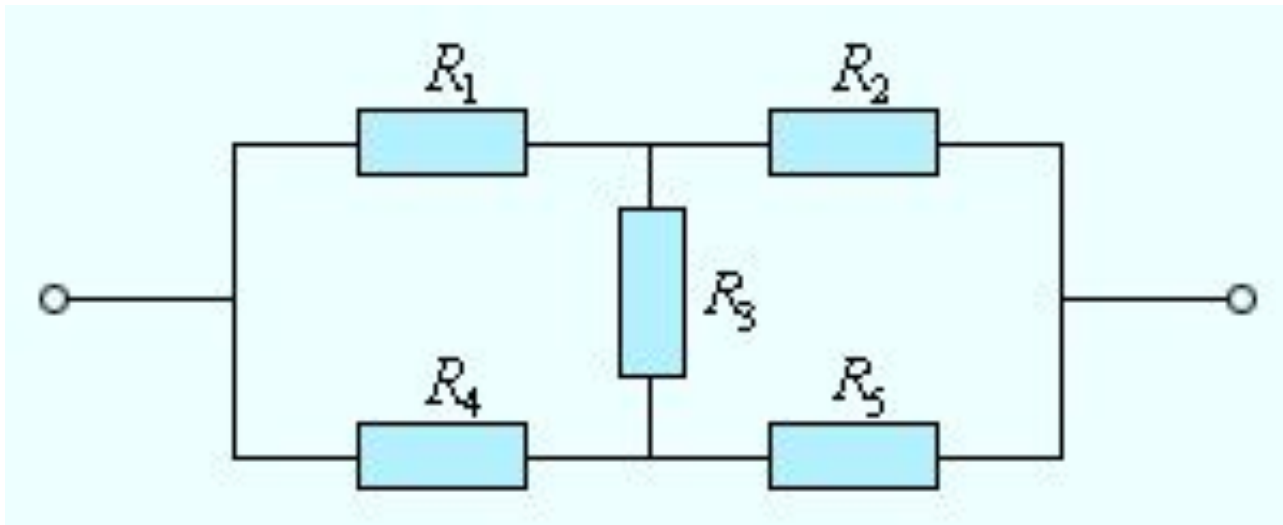
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n,$$

Смешанное соединение резисторов:



рассчитывается по формулам (1) и (2),



рассчитывается по правилам Кирхгофа.