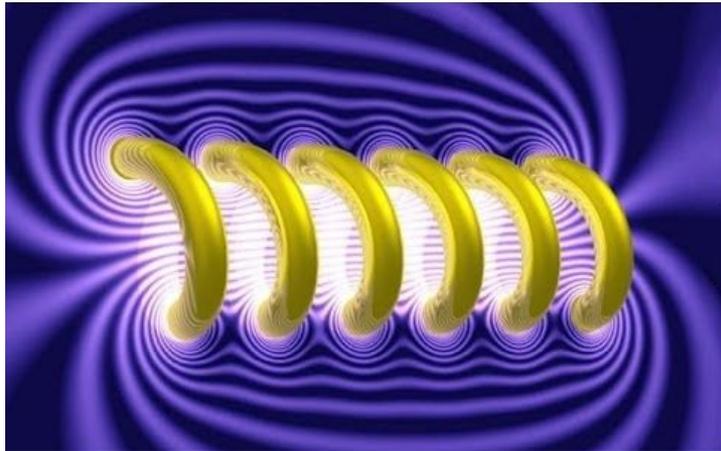


Электродинамика



- Электростатическое поле
- Электрическое поле в веществе
- Постоянный электрический ток**
- Магнитное поле
- Электромагнитное поле
- Уравнения Максвелла

Электрический ток

Электрический ток

любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов или заряженных макроскопических тел

Ток проводимости

движение заряженных частиц относительно той или иной среды (внутри макроскопических тел)

Конвекционный ток

движение макроскопических заряженных тел как целого (например, заряженных капель дождя)

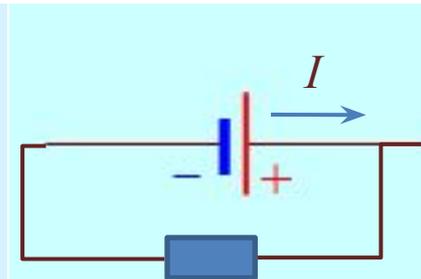
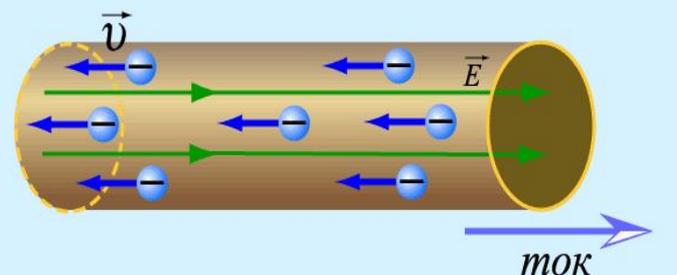
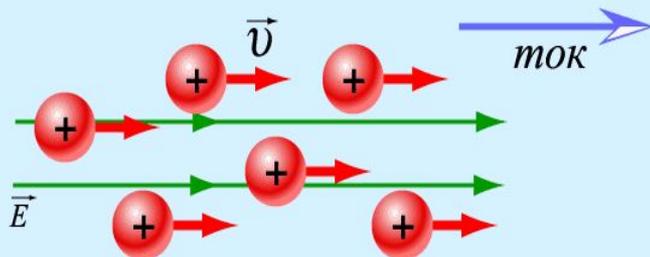
Условия существования тока проводимости

- наличие свободных носителей тока – зарядов
- наличие электрического поля

За направление тока принято

направление движения $+q$

Условно



Количественные характеристики тока

**Сила
тока
 I**

Физическая величина, численно равная
электрическому заряду, проходящему через
поперечное сечение проводника в единицу времени

скаляр!

Если ток не изменяется
по величине
и направлению, то он
называется **постоянным**

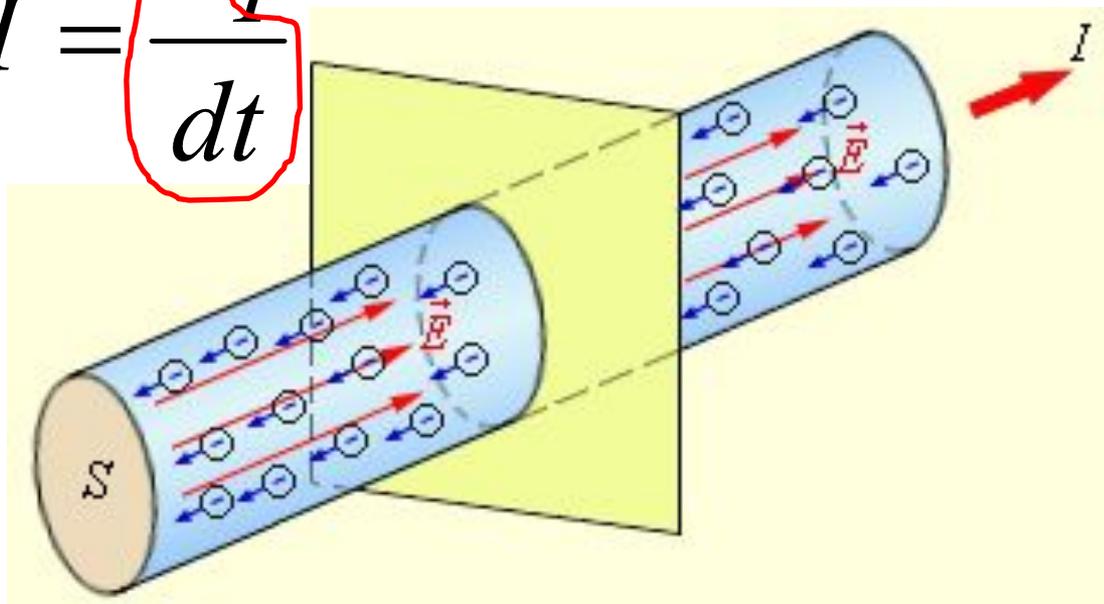
$$I = \frac{q}{t}$$

$$I = nq\langle v \rangle S$$

$$[I] = A = \text{Кл/с}$$

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

скорость протекания заряда



n – концентрация носителей тока

$\langle u \rangle$ – средняя скорость
упорядоченного движения зарядов

S – площадь поперечного сечения
проводника

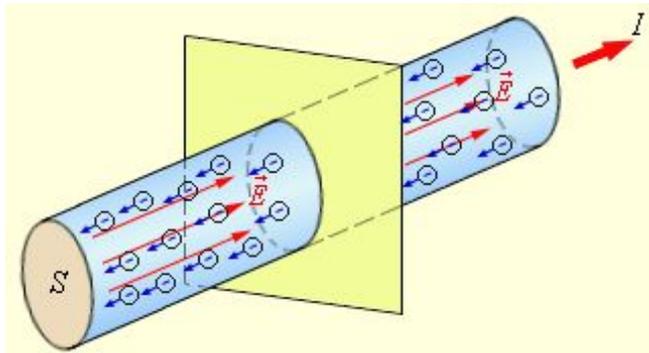
Количественные характеристики тока

**Плотность
тока**

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

$$j = qn v$$

⇒ **Электрический ток
можно определить
через плотность тока**



векторная физическая величина, ее модуль равен

- **электрическому заряду q , проходящему за единицу времени через единицу площади, \perp направлению движения зарядов**
- **силе тока через единицу площади проводника, \perp направлению тока**

направление j совпадает с направлением скорости $+q$ в проводнике

характеризует распределение электрического заряда по сечению проводника

$$I = \int_S j \cdot dS$$

**Сила тока –
поток вектора
плотности тока**

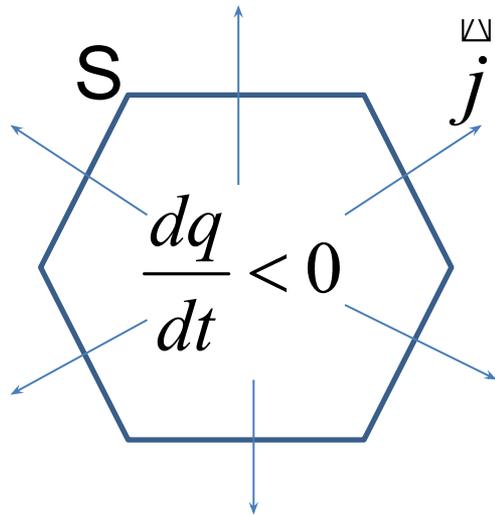
направление dS определяется направлением нормали к площадке

$$[j] = \text{А/м}^2 \quad dS = n dS$$

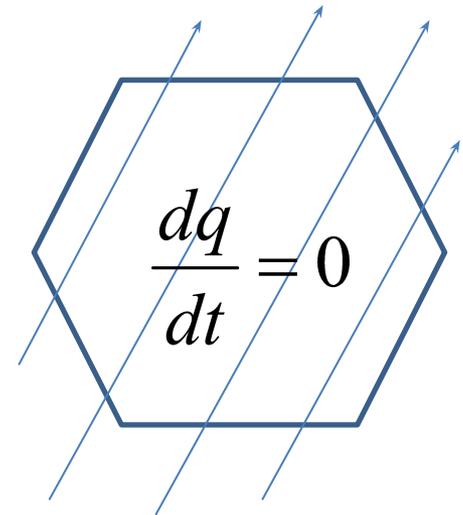
Поток вектора плотности тока

Закон сохранения заряда

- Заряд, выходящий в единицу времени из объема, ограниченного произвольной замкнутой поверхностью, равен скорости убывания заряда, содержащегося в данном объеме



$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$



- Для постоянного тока линии тока всегда замкнуты

Электрическая цепь

В замкнутой электрической цепи свободные q циркулируют по замкнутым траекториям

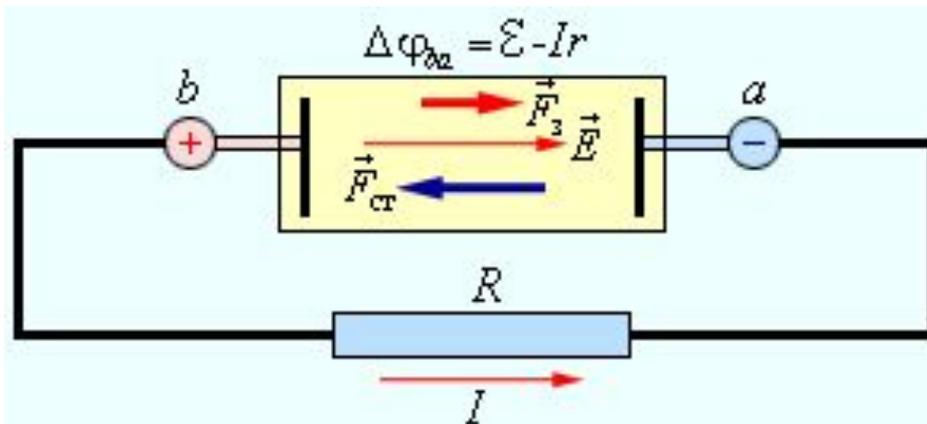
Если на q в цепи действуют только силы ЭС поля

происходит

перемещение зарядов q

приводит к

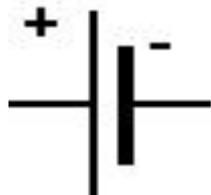
выравнивание потенциалов



в замкнутой цепи должны быть какие-либо другие силы, поддерживающие разность потенциалов

Источник тока

устройство, способное создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил **неэлектростатического происхождения**, необходимое для существования постоянного тока в цепи



Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные q со стороны источников тока

Сторонние силы

Аккумуляторы

Электрический аккумулятор

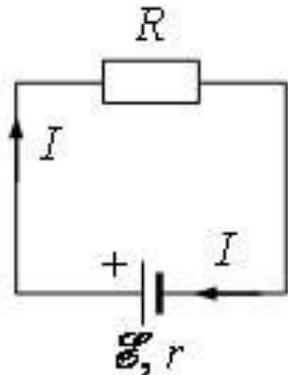
химический источник тока
многоразового действия (химические реакции в них многократно обратимы)
в отличие от гальванического элемента

Используются для накопления энергии и автономного питания различных устройств

автомобили,
мобильные телефоны и др.

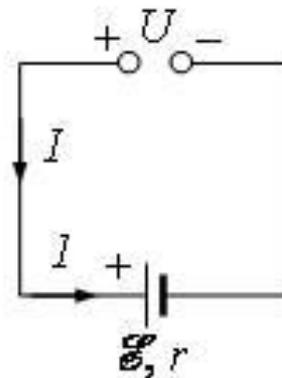
Принцип действия основан на обратимости химической реакции

Разрядка



По мере исчерпания химической энергии напряжение и ток падают, аккумулятор перестает действовать

Зарядка (другим источником)



Восстановление работоспособности аккумулятора пропусканием электрического тока в направлении, $\uparrow\downarrow$ направлению тока при разряде

Емкость аккумуляторов измеряют в ампер·часах

Характеристики аккумулятора зависят от вида и состава электролита

Электродвижущая сила (ЭДС)

Под действием сторонних сил заряды движутся внутри источника тока против сил ЭС поля



в электрической цепи поддерживается $\Delta\phi$ и в ней течет постоянный электрический ток

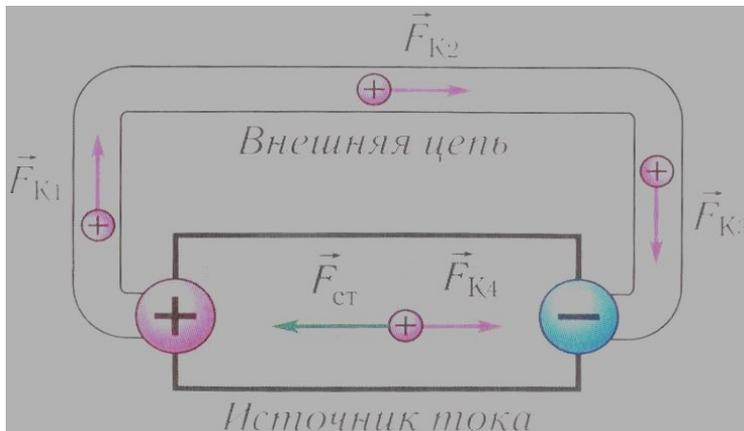
Электродвижущая сила источника

(ЭДС)

Физическая величина, характеризующая действие сторонних сил в источниках тока
Численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного «+» q по замкнутой цепи

$$\text{ЭДС} = \varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

- химические реакции – разделение зарядов
- механические и магнитные силы (гидро- и газогенераторы)



$$[\varepsilon] = \text{В}$$

Электрическое напряжение

Итак, При перемещении заряда по замкнутой цепи работу совершают как **электростатические** (кулоновские), так и **сторонние силы**

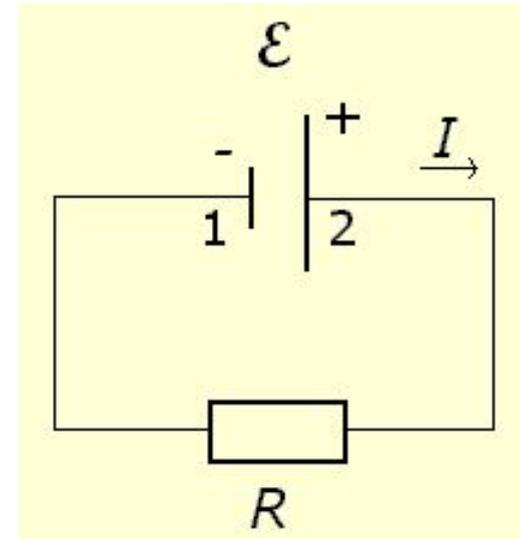
$$A = A_{\text{кул}} + A_{\text{ст}} \longrightarrow A_{\text{ст}} = q \int \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} = q\varepsilon$$

$$A_{\text{кул}} = q \int \vec{E}_{\text{кул}} d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

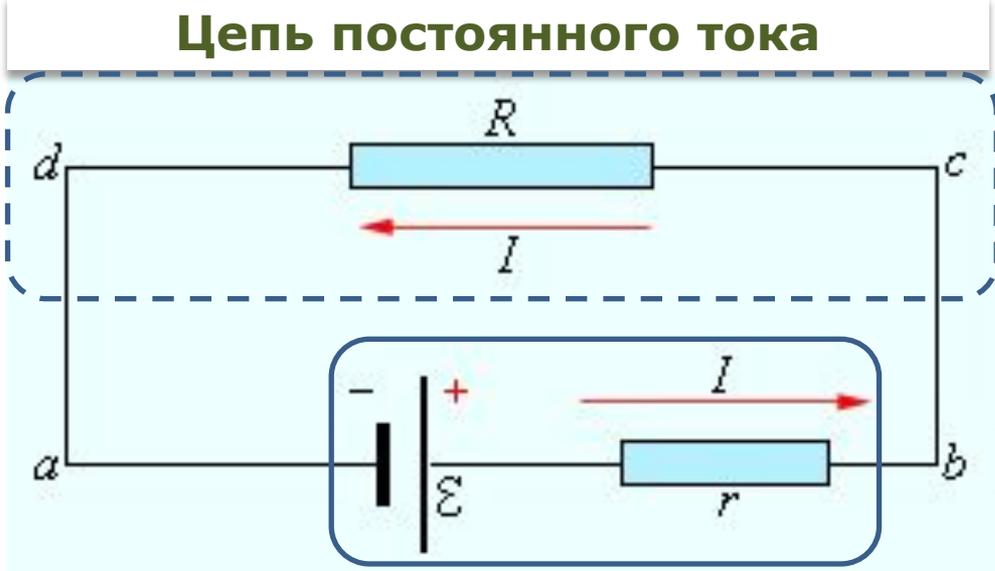
$$\Rightarrow A = qU_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon$$

$$\Rightarrow U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

Напряжение
на участке цепи 1-2



физическая величина, определяемая **работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного «+» заряда на данном участке цепи**



Участок, НЕ содержащий источника тока – cd

Участок, содержащий источник тока

Однородный участок цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Замкнутая цепь

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$$

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

Сила тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению

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

r – внутреннее сопротивление источника

Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для полной цепи

Георг Симон Ом

- **Немецкий физик**
- **Наиболее известные работы – по исследованию **электрического тока****
- **1826 – формулирует свой знаменитый закон**
- **1827-1887 – издание публикаций закона Ома с экспериментальным и теоретическим (исходя из теории, аналогичной теории теплопроводности Фурье) **выводами, и перевод на разные языки****
- **30 ноября 1841 – признание закона и награда медалью Копли** (на заседании Лондонского королевского общества)
- **1839 – ряд важных работ по **акустике****
- **1843 – высказан закон (тоже «закон Ома»), что человеческое ухо распознает лишь простые гармонические колебания, и что всякий сложный тон разлагается ухом на составные (по закону Фурье) и познается лишь как их сумма.**

Этот закон не был принят современниками Ома.

Лишь Гельмгольц, через восемь лет после смерти Ома, доказал его полную справедливость

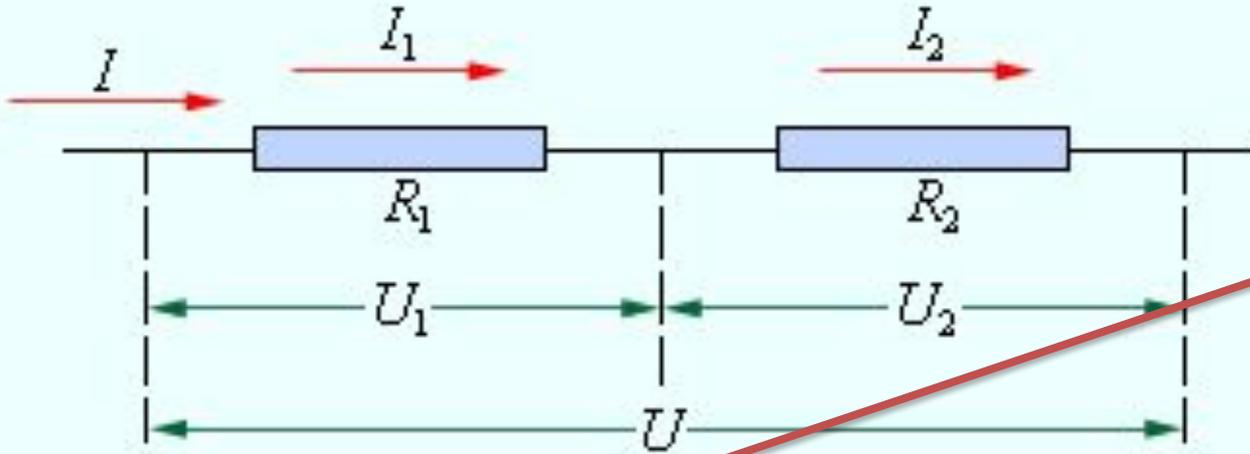
Georg Simon Ohm



**16 марта 1787 –
7 июля 1854,
Германия**

Соединение проводников

Последовательное соединение



$$I_1 = I_2 = I$$

$$U_1 = IR_1$$

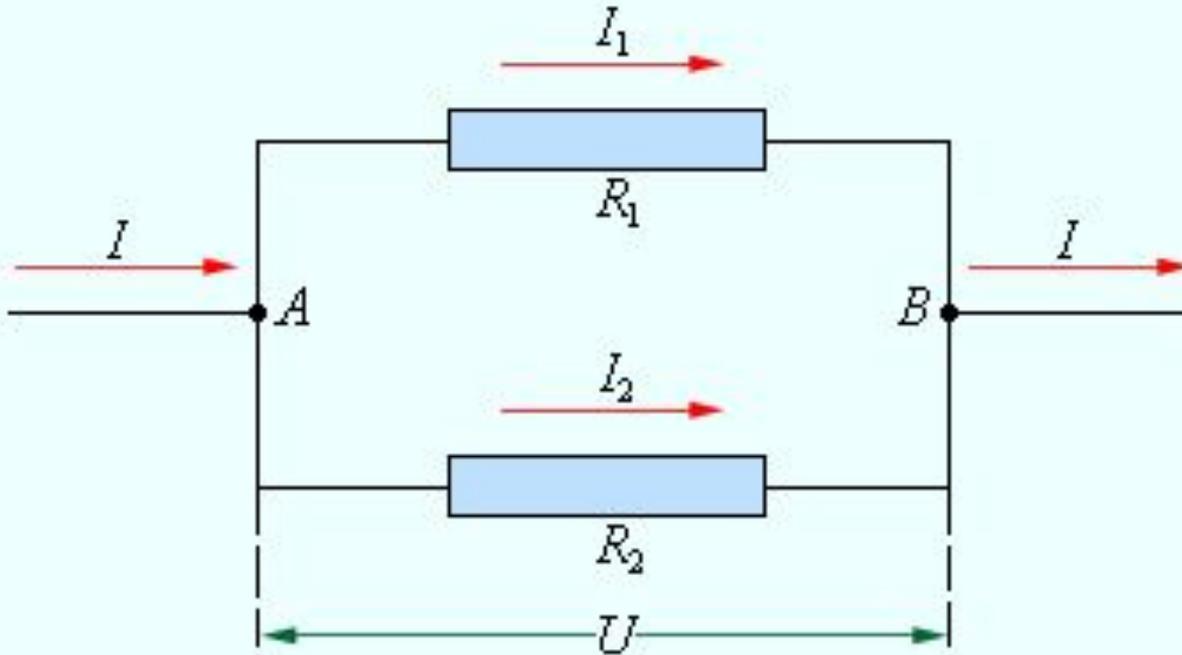
$$U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

Соединение проводников

Параллельное соединение



$$U_1 = U_2 = U$$

$$I = I_1 + I_2$$

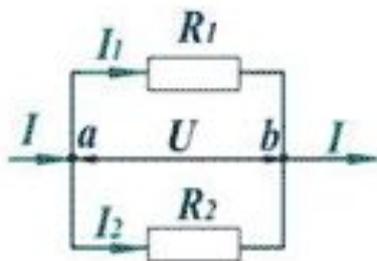
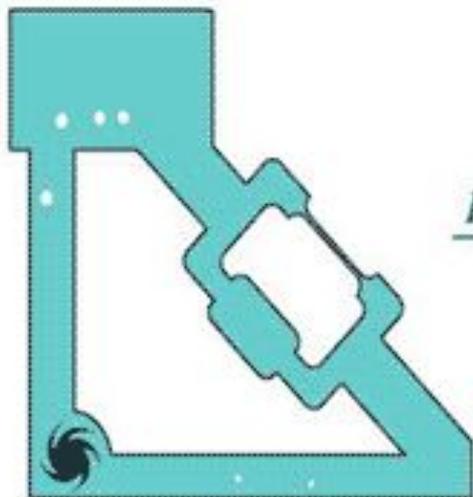
$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

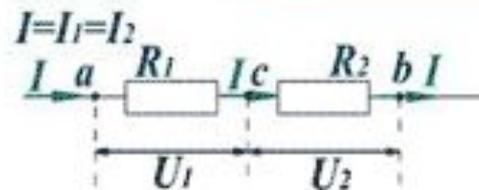
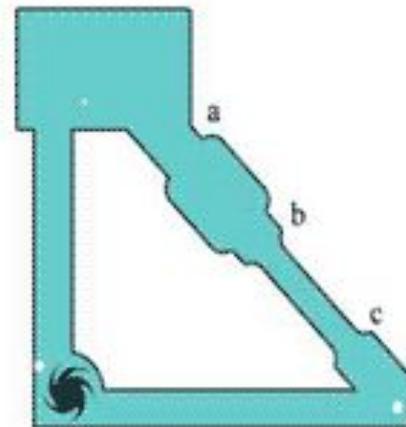
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Гидродинамическая аналогия соединения проводников



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



$$R = R_1 + R_2$$



Электрическое сопротивление

**Электрическое
сопротивление
R**

физическая величина, характеризующая противодействие электрической цепи (или ее участка) электрическому току

$[R] = \text{Ом}$

1 Ом – сопротивление проводника, в котором при напряжении $U=1 \text{ В}$ течет постоянный ток $I=1 \text{ А}$

Обусловлено

передачей или преобразованием электрической энергии протекающего тока в другие виды (преимущественно в тепловую)

Зависит от

- вещества
- размеров
- формы

Для однородного линейного проводника

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

l – длина проводника

S – площадь поперечного сечения

ρ – коэффициент пропорциональности –
удельное сопротивление

Удельное сопротивление

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

ρ – коэффициент пропорциональности –
удельное сопротивление

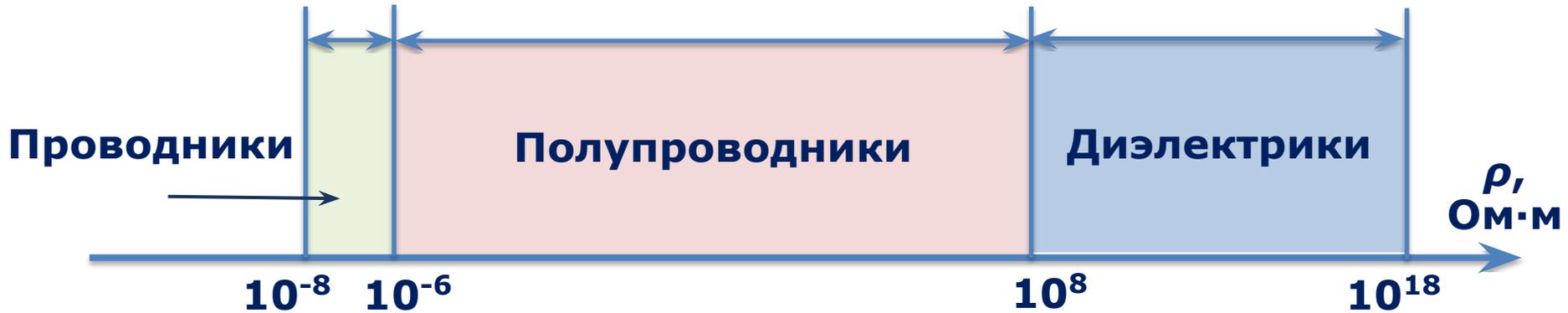
$\rho = f(\text{вещества})$

Служит характеристикой вещества,
из которого изготовлен проводник

$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$

1 Ом·м – удельное сопротивление
проводника площадью $S=1 \text{ м}^2$,
длиной 1 м, с сопротивлением 1 Ом

Область изменений ρ для различных материалов:



•серебро: $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

•медь: $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

•алюминий: $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Ом·м

•кварц: $\rho = 10^{14} - 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

•парафин: $\rho = 3 \cdot 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Температурная зависимость R

Опытный факт:

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

R и R_0 (ρ и ρ_0) –
сопротивления проводника
при температуре t и 0°C

α – температурный
коэффициент
сопротивления

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



$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta t$$

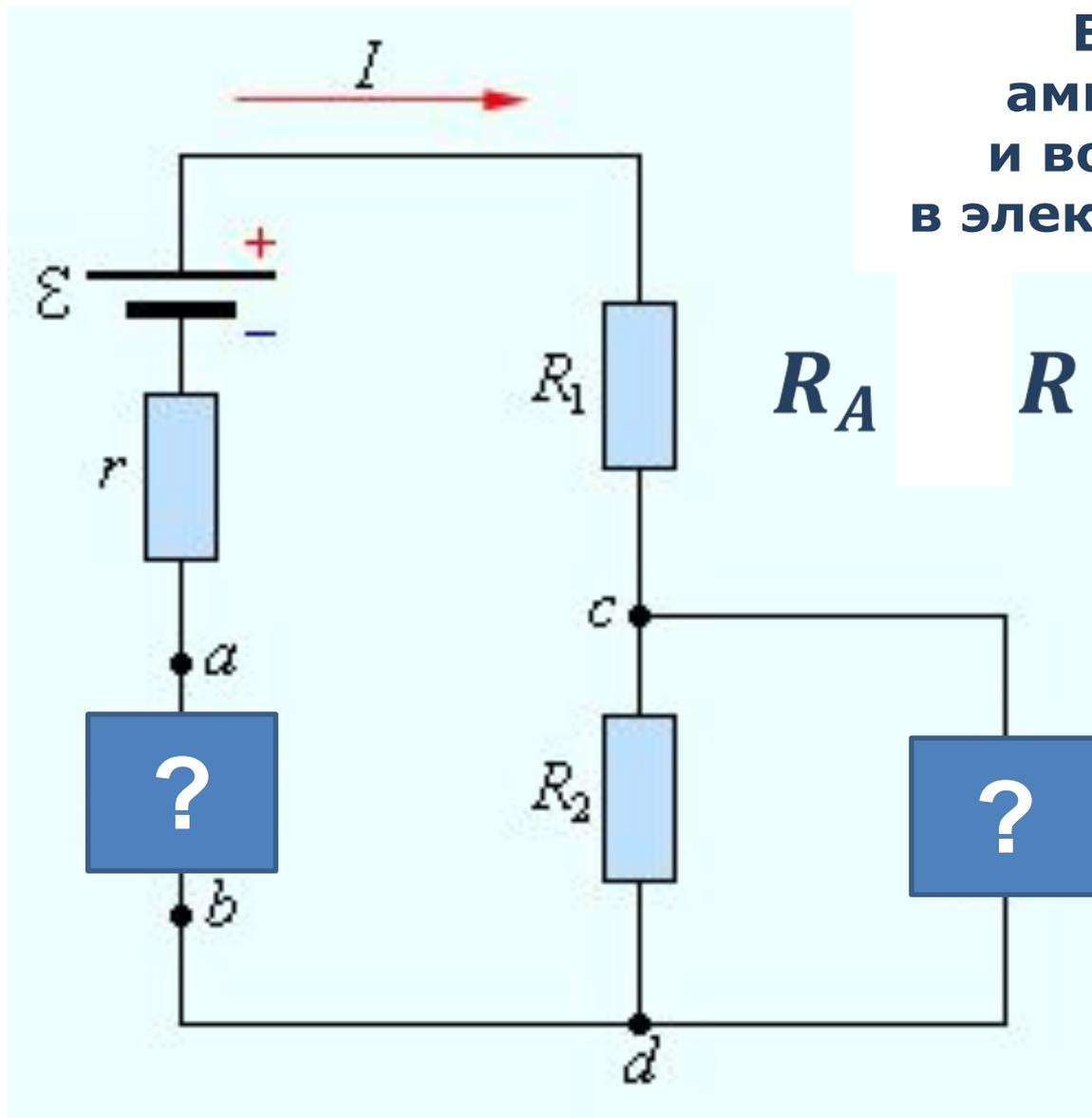
для чистых металлов
(при не очень низких T)

Практическое применение зависимости $R = f(T)$:

Термометр
сопротивления
(терморезистор)

- датчик для измерения температуры
- принцип действия основан на $R = f(T)$
- точность измерения температуры до тысячных долей градуса
- диапазон измеряемых температур от нескольких единиц до тысяч К

Измерение тока и напряжения



Включение
амперметра (А)
и вольтметра (В)
в электрическую цепь

R_A

R

R_V

R



Суть явления:

При определенной $T_{кр}$
удельное сопротивление ρ
скачком \downarrow до нуля

$T_{кр} = f(\text{вещества})$:

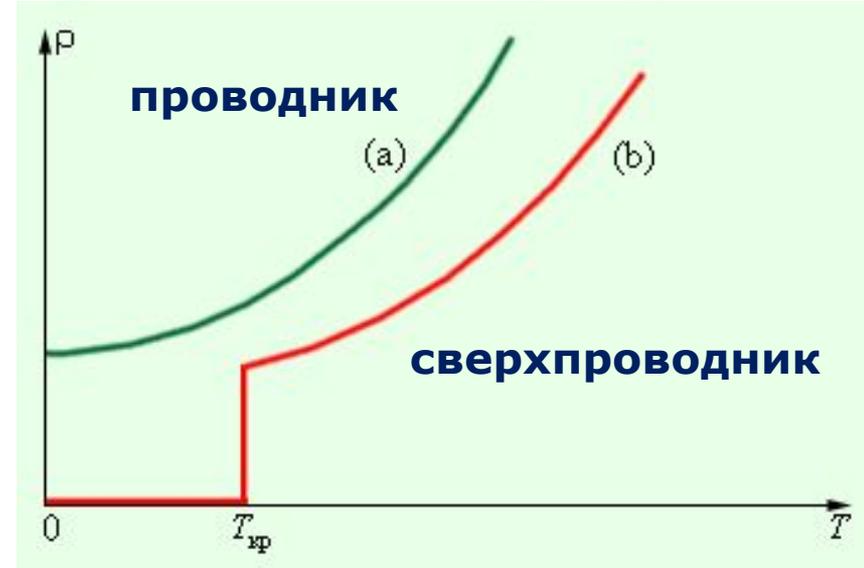
для ртути $T_{кр} = 4,1 \text{ K}$
для алюминия $T_{кр} = 1,2 \text{ K}$
для олова $T_{кр} = 3,7 \text{ K}$

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают особыми свойствами:

способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи

Классическая электронная теория НЕ способна объяснить это явление

Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры T при низких температурах



1988 г. – обнаружена высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП): создано керамическое соединение с $T_{кр} = 125 \text{ K}$

В настоящее время – поиск новых веществ с еще более высокими значениями $T_{кр}$

Электрическая проводимость

$$G = \frac{1}{R}$$

Физическая величина, характеризующая способность участка проводника проводить электрический ток

$$[G] = \text{См}$$

1 См (сименс) – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Удельная электрическая проводимость

$$[\gamma] = \text{См/м}$$

1 См/м – удельная электрическая проводимость проводника, который при площади поперечного сечения 1м^2 и длине 1 м имеет проводимость 1 См

Закон Ома в дифференциальной форме

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

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



$$\frac{l}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{I}$$

удельная
электрическая
проводимость

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$



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

Учитывая:

напряженность
ЭП в проводнике

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

плотность тока

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



**Закон Ома
в дифференциальной
форме**

Для бесконечно малых
величин в точке в любой
момент времени



**справедлив и для
переменных полей !**

Работа электрического тока

1. При протекании тока по однородному участку цепи ЭП совершает работу

$$dA = (\varphi_1 - \varphi_2) dq$$

За время dt по цепи протекает заряд dq

$$dq = Idt$$

Полезная работа электрического тока на участке 1-2

$$dA = \Delta\varphi_{12} Idt = UI dt$$

$$dQ = dA = RI^2 dt$$

Закон Джоуля-Ленца

2. Закон Ома для участка цепи

$$RI = U \Rightarrow RI^2 dt = UI dt$$

Умножаем на Idt обе части

Работа электрического тока

Если электрическая цепь замкнута (содержит источник тока), то вся работа, совершаемая сторонними силами

$$A = I\varepsilon t = IU_R t + IU_r t$$

↓
работа на **внешнем**
участке цепи

↓
работа на **внутреннем**
участке цепи



$$\varepsilon = U_R + U_r$$

↓
напряжение
на **внешнем**
сопротивлении цепи

↓
напряжение
на **внутреннем**
сопротивлении
источника тока

Мощность электрического тока

$$P = \frac{dA}{dt}$$

Мощность
численно равна
работе за единицу
времени

$$dA = RI^2 dt = UI dt$$

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



$$P = RI^2$$

$$P = UI$$

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

Внесистемные единицы измерения:

1 Вт·ч = 3600 Вт·с = $3,6 \cdot 10^3$ Дж –
работа тока мощностью 1 Вт в течение 1 ч

1 кВт·ч = 10^3 Вт·ч = $3,6 \cdot 10^6$ Дж

[P] = Вт

Мощность электрического тока

**Полная
мощность**

мощность, выделяемая в замкнутой цепи, определяется работой сторонних сил

$$P = \frac{A_{\text{полная}}}{t} =$$

**Полезная
мощность**

← часть полной мощности, выделяемая во внешней цепи

$$P_{\text{полезная}} = IU_R$$

**Мощность
потерь**

часть полной мощности, расходуемая на выделение теплоты внутри источника

$$P = IU_r$$

**Коэффициент
полезного
действия
источника тока**

$$\eta = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{полная}}} =$$

1840 г.

Закон Джоуля-Ленца

Установили экспериментально
независимо друг от друга

Если ток проходит по **неподвижному**
металлическому проводнику, то вся
работа тока идет на его нагревание

Закон сохранения энергии
для однородного участка цепи

$$dQ = dA$$

$$dQ = \frac{U^2}{R} dt$$

$$dQ = IU dt$$

$$dQ = RI^2 dt$$

Q – количество теплоты, выделяемое
в цепи при прохождении тока



Ток оказывает
тепловое действие

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

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

Удельная тепловая мощность тока

количество теплоты,
выделяющееся за единицу времени
в единице объема проводника

$$w = jE = \gamma E^2$$

**Закон Джоуля-Ленца
в дифференциальной форме**

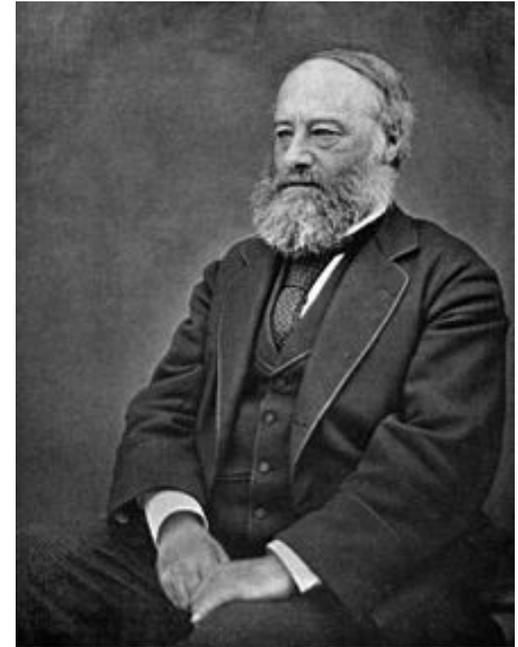
γ – удельная проводимость проводника
 j – плотность тока

Практическое применение теплового действия тока:

- Лампы накаливания (1873)
- Бытовые электронагревательные приборы
- Электрические муфельные печи
- Электрическая дуга
- Контактная электросварка
- ...

Джеймс Прескотт Джоуль

- **Единица измерения энергии** – джоуль (Дж)
- Работал с лордом Кельвином над **абсолютной шкалой температуры**
- **1841** – закон **Джоуля–Ленца** – тепловое действие тока: зависимость между силой тока и выделенным этим током в проводнике теплом
- **1843** – обнаруженная зависимость между работой и количеством произведенного ею тепла — механический эквивалент тепла – привела к **теории сохранения энергии**, что в свою очередь привело к разработке **I начала ТД**
- Член **Лондонского королевского общества** и доктор права Эдинбургского (1871) и Лейденского (1875) университетов
- Награжден двумя **медалями Лондонского королевского общества**
- В **1872 и 1877** – президент **Британской ассоциации по распространению научных знаний**



24 декабря 1818 –
11 октябрь 1889,
Англия

Эмилий Христианович Ленц

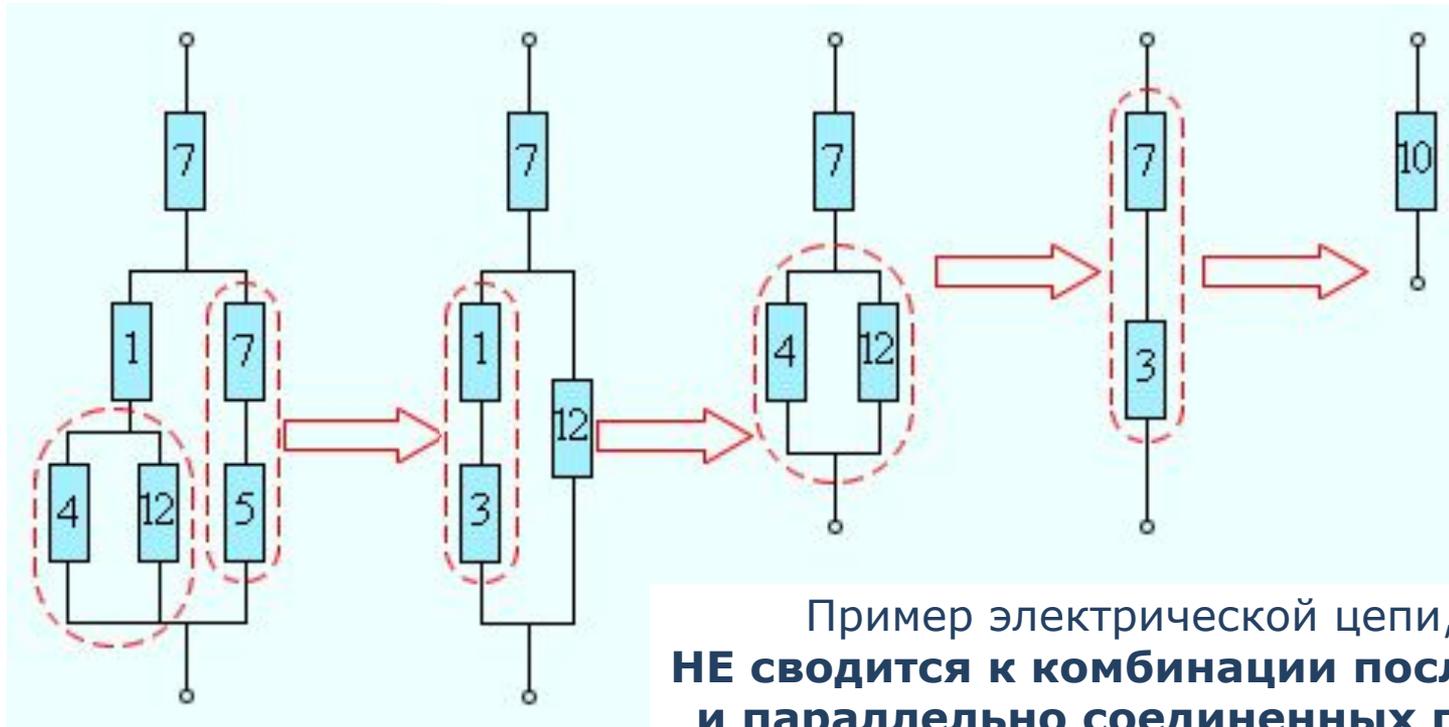
- Российский физик и электротехник немецкого происхождения
- Академик Петербургской АН (1830), ректор Санкт-Петербургского университета (с 1863)
- Установил (1833) правило, названное его именем, экспериментально обосновал закон Джоуля-Ленца (1842)
- С его именем связаны фундаментальные открытия в области электродинамики
- Считается одним из основоположников русской географии



24 февраля 1804 –
10 февраля 1865

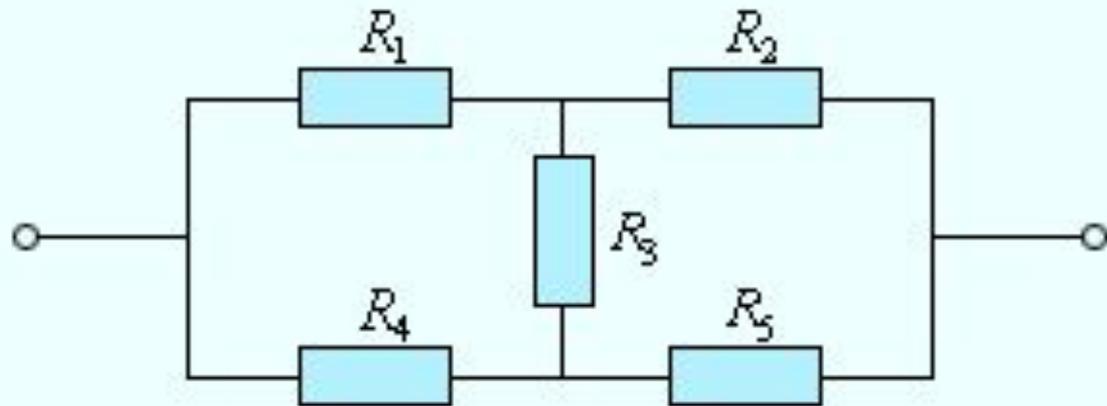
Расчет сложных цепей

Расчет сопротивления сложной цепи



Пример электрической цепи, которая **НЕ** сводится к комбинации последовательно и параллельно соединенных проводников

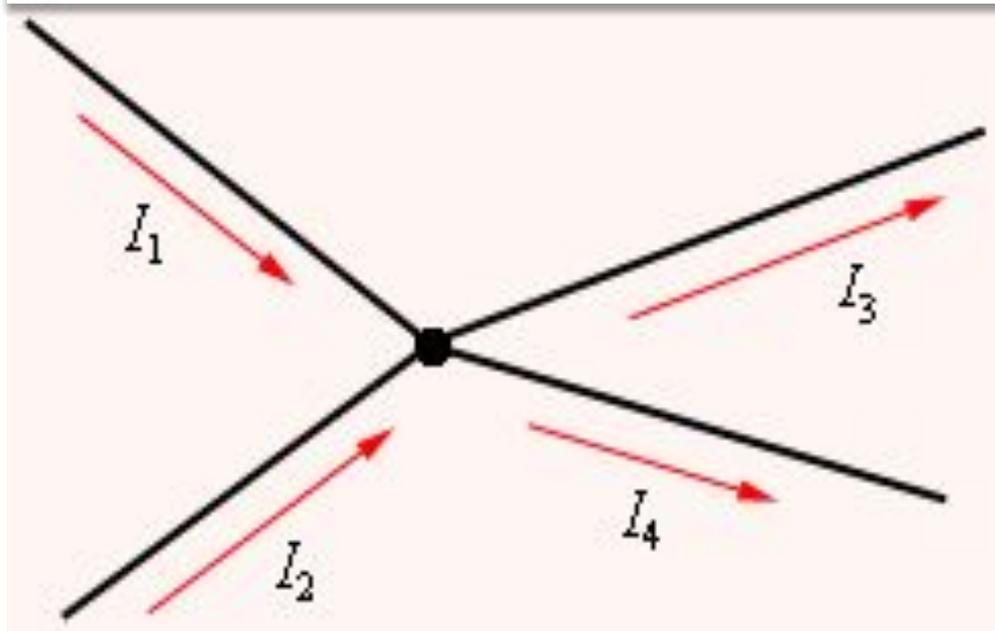
Сопротивления
всех проводников
указаны в Ом



Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

1-е правило Кирхгофа (закон сохранения заряда)

Узел электрической цепи



$$I_1, I_2 > 0 \quad I_3, I_4 < 0$$

Алгебраическая
сумма сил токов
для каждого узла
в разветвленной
цепи равна нулю

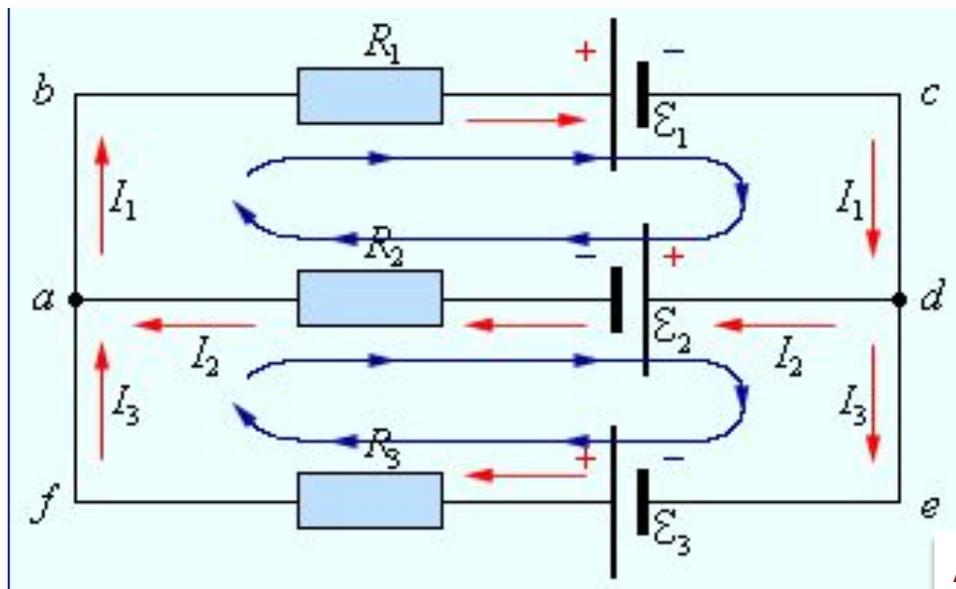
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

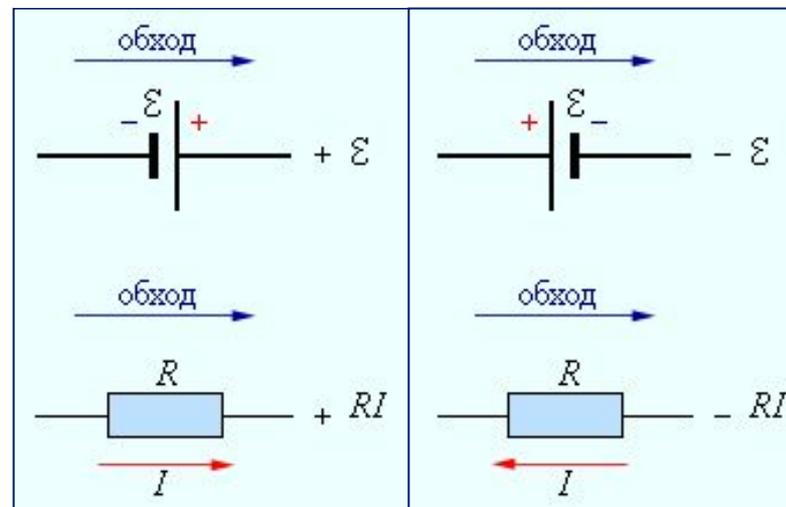
2-е правило Кирхгофа

(обобщение закона Ома для разветвленных цепей)

Разветвленная электрическая цепь



«Правила знаков»



Цепь содержит один независимый узел (а или d) и два независимых контура (например, abcd и adef)

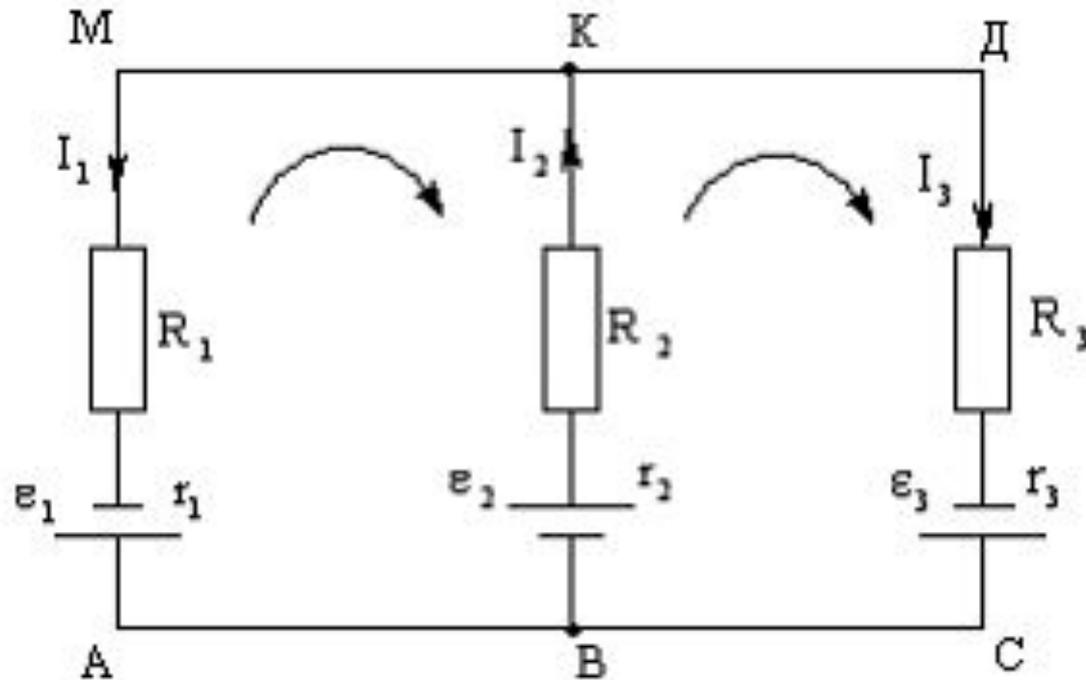
$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

Алгебраическая сумма произведений сопротивления каждого из участков любого замкнутого контура разветвленной цепи постоянного тока на силу тока на этом участке равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре

Расчет цепей по правилам Кирхгофа

- 1. Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи**
 - если искомый ток получится >0 , то его направление было выбрано правильно
 - если <0 — его истинное направление $\uparrow\downarrow$ выбранному
- 2. Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться**
 - $IR >0$, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода и наоборот
 - э.д.с., действующие по выбранному направлению обхода, считаются >0 , против — <0
- 3. Составить уравнения, по количеству равное количеству искомых величин**
 - в систему уравнений должны входить все сопротивления и э.д.с. рассматриваемой цепи
 - каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах

Пример расчета цепи



Узел К :

Узел В :

Контур КДСВ :

Контур АМКВ :

Контур АМДС :

Густав Роберт Кирхгофф

Один из великих физиков XIX века

Основная область работы – математическая физика

Наиболее значимые работы

- **по электричеству:**

- о распространении электричества по пластинкам
- о разряде конденсаторов
- о распределении электричества на проводниках
- о течении электричества по подводным кабелям, ...
- **об индукции токов (1849)** – описание способа определения электрического сопротивления проводников в абсолютной мере
- **об индуктированном магнетизме**
- **об изменении формы тел под влиянием магнитных и электрических сил**

- **по механике:**

- теория деформации, равновесия и движения упругих тел

- **по оптике (излучению)**

- его работы привели к открытию обращения линий спектра, к объяснению Фраунгоферовых линий и к созданию спектрального анализа

- **по термодинамике паров и растворов**



**12 марта 1824 –
17 октября 1887,
Германия**

С 1862 года состоял членом-корреспондентом Санкт-Петербургской академии наук

Элементарная классическая теория электропроводности металлов

1897	Дж.Дж.Томсон	Открытие электрона
1900	Друде, Лоренц	Электронная теория проводимости металлов
1901	К. Рикке	Опыт с цилиндрами
1901	Толмен, Стьюарт (идеи Мандельштама и Папалекси)	Опыт: носители тока в металле – e^-

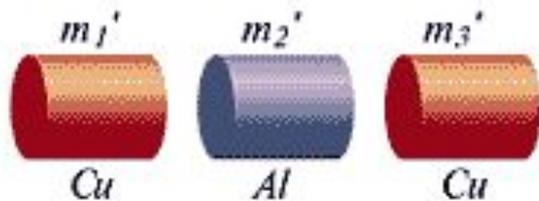
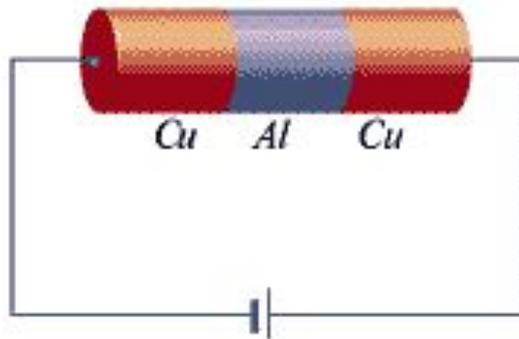
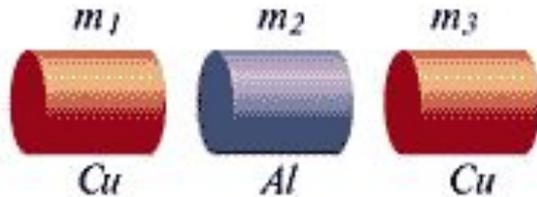


Джозеф Джон Томсон

**1856-1940,
Англия (Кембридж)**

**Нобелевская премия по физике 1906 г.
«за исследования прохождения электричества через газы»**

Носители тока в металле



$$m_1' = m_1 \quad m_2' = m_2 \quad m_3' = m_3$$

До начала опыта:

1. Цилиндры взвесили
2. Хорошо зачистили торцы

В течение года через цилиндры пропусклся значительный электрический ток – за это время через них прошел $q \sim 3,5 \cdot 10^6$ Кл

После:

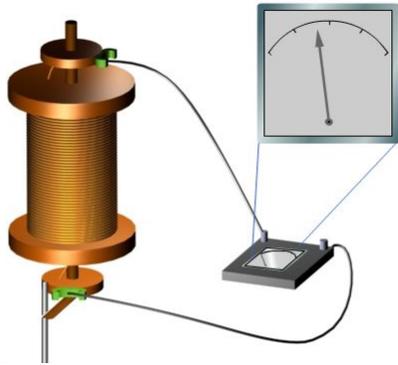
1. Массы цилиндров не изменились
2. Ни один металл не проник внутрь другого



экспериментальное доказательство того, что ионы в металлах не участвуют в переносе электричества, а перенос заряда в металлах осуществляется частицами, которые являются общими для всех металлов

Носители тока в металле

Что является носителем тока в металле ? **электроны**



При торможении
вращающейся катушки
на каждый носитель
заряда действует сила

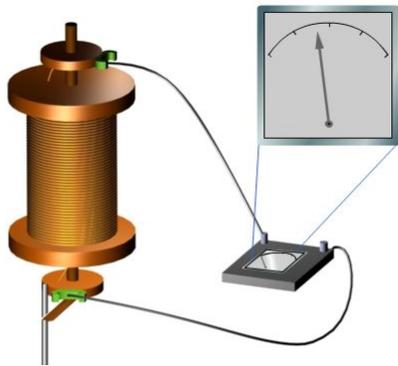
$$F = -m \frac{dv}{dt}$$

Носители тока в металле

Опыт Толмена и Стьюарта

Носители тока в металле

Что является носителем тока в металле ? **электроны**



При торможении
вращающейся катушки
на каждый носитель
заряда действует сила

$$F = -m \frac{dv}{dt}$$



Играет роль
сторонней силы
неэлектрического
происхождения

$$E_{cm} = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt}$$



$$e^- = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

сэр Джозеф Джон Томсон



J.J. Thomson.

18 декабря 1856 –
30 августа 1940,
Англия

- **1881** – ввел понятие **электромагнитной массы**, назвав так ту часть массы, которая обусловлена энергией электростатического поля заряженной частицы – эта работа считается первой работой, в которой обсуждается **связь энергии и массы**
- **С 1882 г. лектор по математике в Тринити Колледже (Кембридж)**
- **С 1884 г. заместил Рэля**, став **профессором физики на кафедре экспериментальной физики в Кембридже**
- **1897** – **открыл электрон** (Нобелевская премия по физике, 1906 г. с формулировкой «за исследования прохождения электричества через газы»)
- **1911** – **разработал метод парабол для измерения отношения заряда частицы к ее массе**, сыгравший большую роль в исследовании изотопов
- За научные заслуги награжден медалями Б. Франклина (1923), М. Фарадея (1938), Копли (1914) и др.
- **Один из учеников Томсона – Эрнест Резерфорд**, который позже занял его пост
- Его сын Джордж Пейджт Томсон (1892—1975) тоже Нобелевский лауреат по физике (1937) за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах

Пауль Карл Людвиг Друдэ



12 июля 1863 –
5 июля 1906,
Германия

- **Основные достижения по приложениям классической электронной теории:**
 - **теория электронной проводимости металлов**
 - **теория поляризации света,** отраженного от металлической поверхности
 - **теория дисперсии света:** впервые обнаружил и объяснил аномальную дисперсию диэлектрической проницаемости (позднее это объяснение было заменено теорией Дебая)
- **Предложил методы измерения диэлектрической проницаемости и показателя поглощения жидких диэлектриков в метровом и дециметровом диапазонах электромагнитных волн**
- **Член Берлинской Академии наук**
- **Профессор Лейпцигского (с 1894), Гисенского (с 1900) и Берлинского (с 1905) университетов**
- **Редактор журнала «Annalen der Physik» с 1900**

Элементарная классическая теория электропроводности металлов

Совокупность свободных e^-

представляет собой некоторый **идеальный газ**, к которому применимы законы классического идеального газа

Суть теории:

Виды движения e^- проводимости в металле

- **хаотическое** тепловое
- **направленное**, обусловленное внешним ЭП

e^- проводимости сталкиваются с ионами решетки



устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой

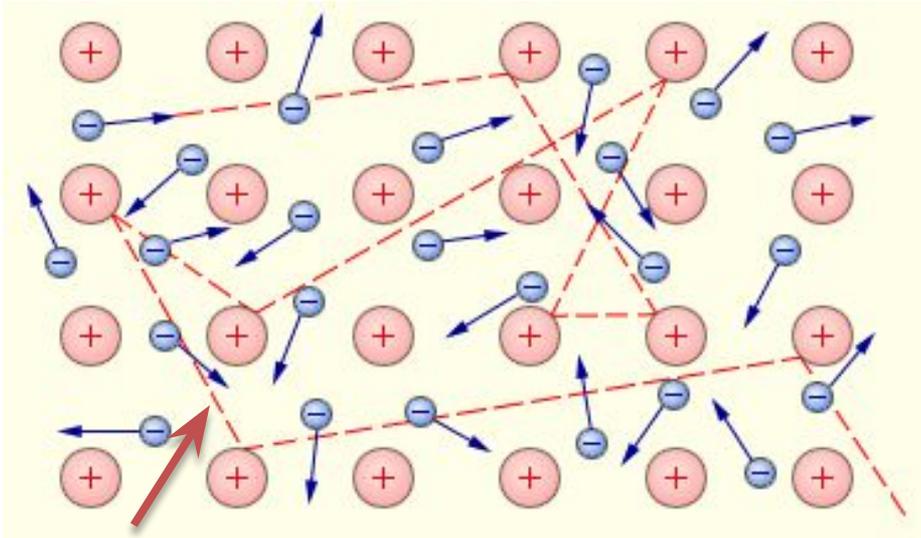
по теории Друде-Лоренца:

e^- обладают энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного газа

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{nm_e}}$$

Движение электронов в металле

Газ свободных электронов в кристаллической решетке металла



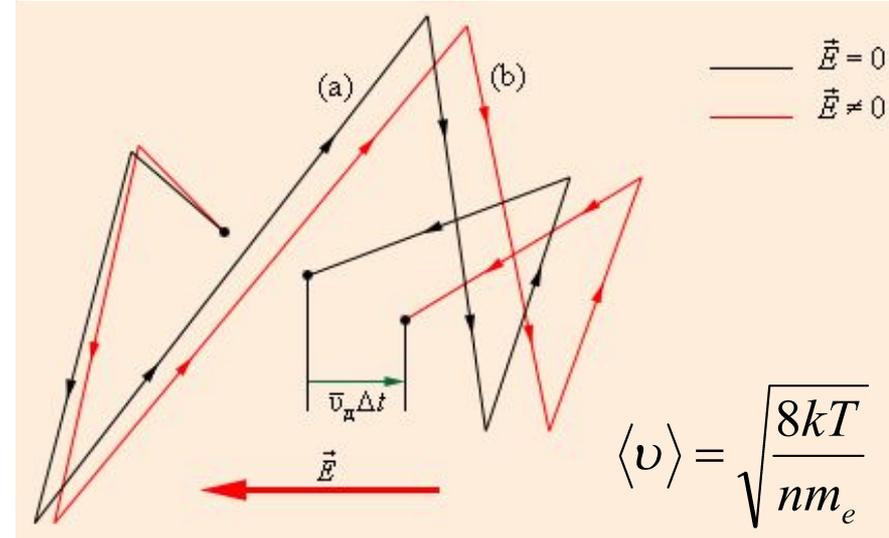
траектория одного из электронов

для меди при $T=300$ К:

- концентрация атомов в металлах
 $n \sim 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$
- хаотическое $\langle u \rangle \sim 10^5 \text{ м/с}$
- упорядоченное $\langle v \rangle \sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$

Замыкание цепи вызывает распространение ЭП со скоростью $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Движение свободного электрона в кристаллической решетке



а – хаотическое движение электрона в кристаллической решетке металла

б – хаотическое движение с дрейфом, обусловленным ЭП

Масштаб дрейфа сильно преувеличен

$$I = \frac{dq}{dt} = enS \langle v \rangle \Rightarrow \langle v \rangle = \frac{I}{enS}$$

Элементарная классическая теория электропроводности металлов

успехи теории

- объяснила физическую природу электропроводности
- объяснила закон Ома
- объяснила закон Джоуля-Ленца
- качественно объяснила закон Видемана-Франца

трудности теории

- не объяснила зависимость $R=f(T)$
- неверная оценка средней длины свободного пробега e -
- неверная оценка теплоемкости металлов

**квантовая механика
решила эти вопросы**

Физическая природа электропроводности

Удельная электропроводность

$$\sigma = \frac{ne^2 \cdot \langle \lambda \rangle}{2m \cdot \langle v \rangle}$$

n – концентрация свободных электронов

l – расстояние между атомами в кристалле

v – скорость теплового движения e^-



Закон Ома в дифференциальной форме из классической теории электропроводности

Со стороны ЭП ($E = \text{const}$) в проводнике e^- испытывает действие силы

$$F = eE \rightarrow$$

Приобретает ускорение $a = \frac{eE}{m}$

Скорость e^- к концу свободного пробега

$$v_{\text{max}} = \frac{eE \langle t \rangle}{m}$$

t – время между последовательными соударениями $\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle v \rangle}$

Средняя скорость направленного движения e^-

$$\langle v \rangle = \frac{eE \langle t \rangle}{2m} = \frac{eE \langle l \rangle}{2m \langle v \rangle}$$

по теории Друде к концу свободного движения $\langle v \rangle = 0$, т.к. e^- отдает всю энергию ионам решетки

Плотность тока в металлическом проводнике

$$j = ne \langle v \rangle = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v \rangle} E = \gamma E$$

$$j = \gamma E$$

удельная электрическая проводимость

$$\gamma = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v \rangle}$$

Закон Ома в дифференциальной форме



Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме из классической теории электропроводности

К концу свободного движения скорость $e^- = 0$, т.к. он отдает всю энергию ионам решетки

Дополнительная энергия, которую приобретают e^- и ионы в узлах кристаллической решетки в результате столкновений со свободными электронами

$$\langle E_k \rangle = \frac{m v_{\max}^2}{2}$$

Энергия идет на нагревание металла

Температура – мера средней кинетической энергии движущихся частиц

Число столкновений электронов за 1 с с узлами кристаллической решетки

$$\langle z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle}$$

l - длина свободного пробега
 v - скорость теплового движения

Энергия, передаваемая решетке за 1 с в 1 м^3

$$w = n \langle z \rangle \langle E_k \rangle = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v \rangle} E^2$$

$$w = j E^2$$

с учетом: $j = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v \rangle}$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



Закон Видемана-Франца

Металлы характеризуются большими значениями

ЭЛЕКТРОпроводности

γ

ТЕПЛОпроводности

λ

Носителями тока и теплоты являются одни и те же частицы – **свободные электроны**

Закон Видемана-Франца

отношение удельной теплопроводности к удельной проводимости для всех металлов при одной и той же температуре одинаково и пропорционально температуре

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T$$

β – постоянная,
 $\neq f(\text{от рода металла})$



Трудности классической теории электропроводности

Температурная зависимость электрического сопротивления в металлах

из теории:

т.к.

$$\langle \tau \rangle \sim \frac{1}{n}$$

$$\langle v \rangle \sim \sqrt{T}$$



удельное сопротивление

$$\rho = 1/\sigma \sim \sqrt{T}$$

?

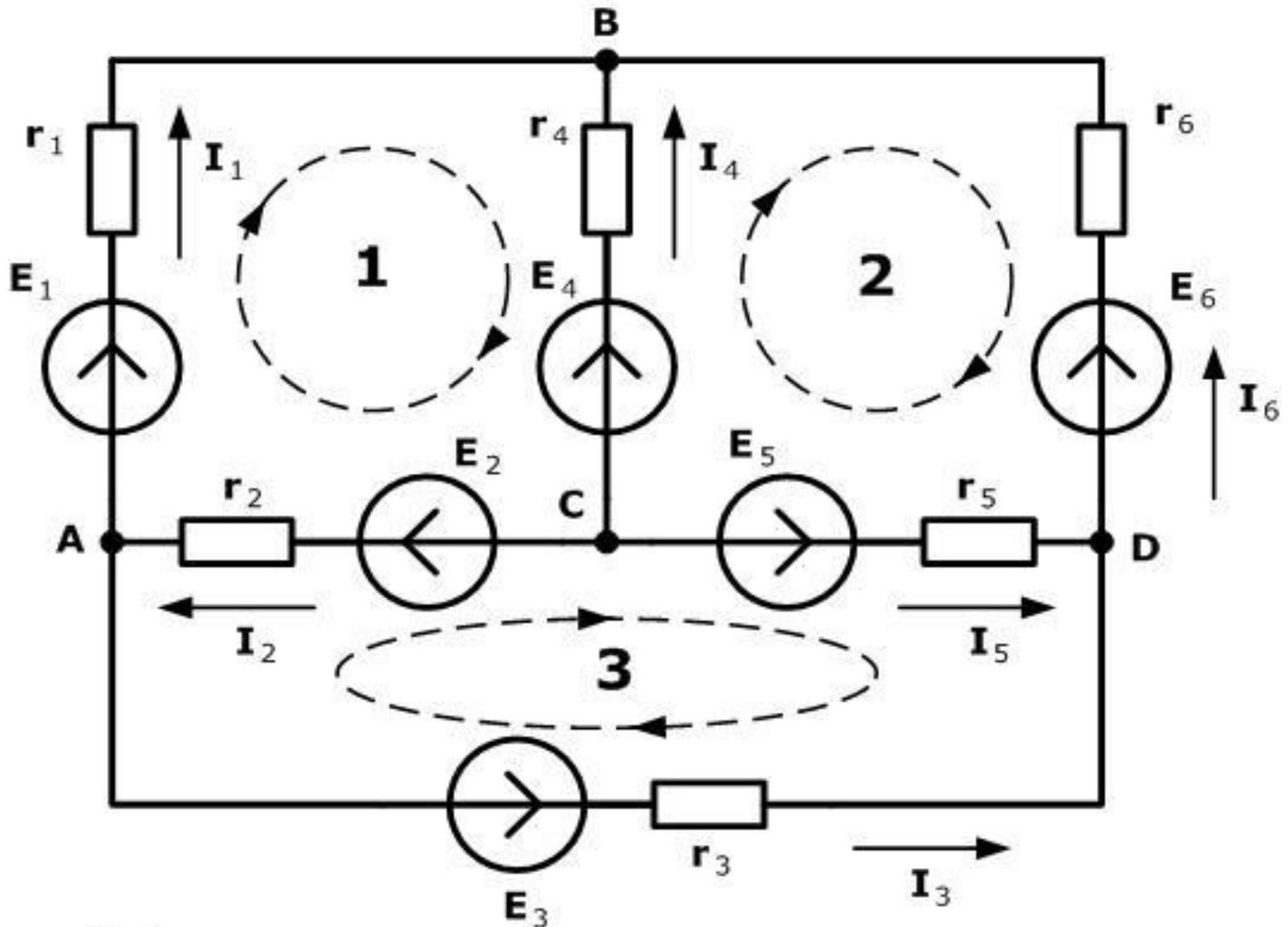


из опыта:

$$\rho \sim T$$

Контрольный вопрос

Написать 1 и 2 законы Кирхгофа для схемы



Дополнительные слайды

к разделу

Постоянный электрический ток

Работа выхода электрона из металла

ОПЫТ:

При обычных температурах e^- не покидают металл



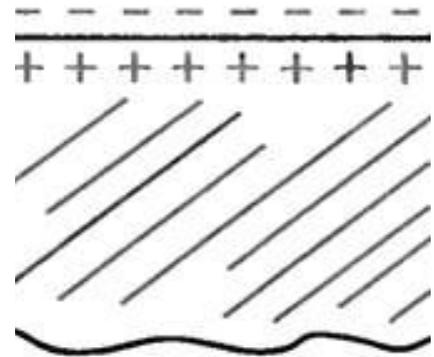
Существуют силы, препятствующие этому



Чтобы удалить e^- из металла нужно совершить работу

Работа
выхода
 $A_{\text{вых}}$

Работа, которую нужно совершить для удаления e^- из металла в вакуум



В чем причины появления работы выхода ?

1 ↓

2 ↓

индуцированный электроном $+q$ притягивает e^-

отталкивание от внешнего «электронного облака»

двойной электрический слой

$d \sim 10^{-10} - 10^{-9} \text{ м}$

НЕ создает электрического поля во внешнем пространстве, НО препятствует выходу свободных электронов из металла !

Работа выхода электрона из металла

➔ e^- при вылете из металла должен преодолеть задерживающее поле **двойного электрического слоя**

Поверхностный скачок потенциала

Разность потенциалов $\Delta\phi$ в двойном электрическом слое

$$\Delta\phi = \frac{A}{e}$$

Другими словами:

e^- при вылете из металла должен преодолеть **потенциальный барьер**

Работа выхода
 $A_{\text{вых}}$

Высота потенциального барьера

зависит от:

- химической природы вещества
- чистоты поверхности



НЕ зависит от:

- энергии электрона, т.е. от температуры

Эмиссионные явления

**Электронная
эмиссия**

явление испускания электронов
с поверхности твердых тел

Виды эмиссии в зависимости от способа
сообщения электронам энергии:

Термоэлектронная эмиссия

Фотоэлектронная эмиссия

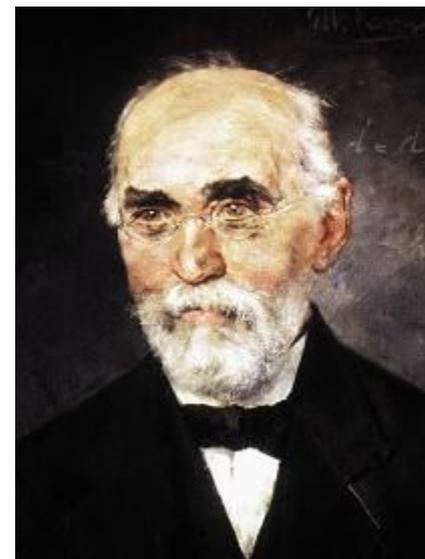
Вторичная электронная эмиссия

Автоэлектронная эмиссия

*Будут
рассмотрены
позже*

Хендрик Антон Лоренц

- Профессор математической физики Лейденского университета (с 1878 г.)
- Развил электромагнитную теорию света и электронную теорию материи
- Сформулировал самосогласованную теорию электричества, магнетизма и света
- Ввел понятие силы, действующей на заряд, движущийся в магнитном поле (1895 г.) – сила Лоренца
- Предложил метод вычисления локального поля, широко применяемый в электродинамике – «Сфера Лоренца»
- Развил теорию о преобразованиях состояния движущегося тела, одним из результатов которой было так называемое сокращение Лоренца-Фицджеральда, описывающее уменьшение длины объекта при поступательном движении
- За объяснение эффект Зеемана, совместно с другим нидерландским физиком Питером Зееманом удостоен Нобелевской премии по физике (1902)



18 июля **1853** –
4 февраля **1928**,
Нидерланды