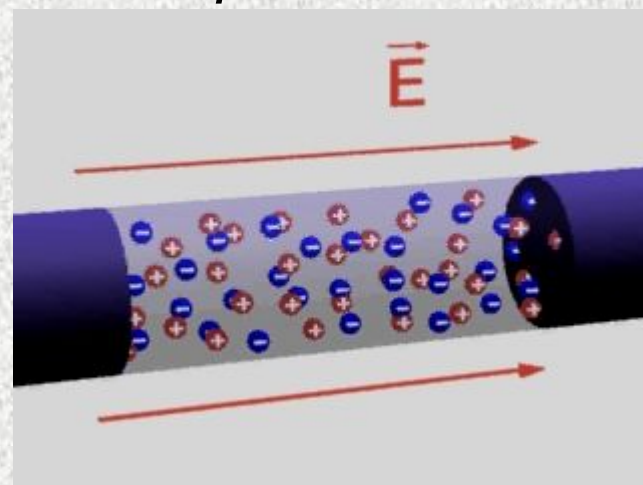


## *3.2.1. Основные законы Постоянного тока*

Электрический ток – это упорядоченное движение заряженных частиц под действием электрического поля.

Такой ток называют током проводимости.

Постоянным электрическим током называется ток, величина и направление которого не изменяются с течением времени.



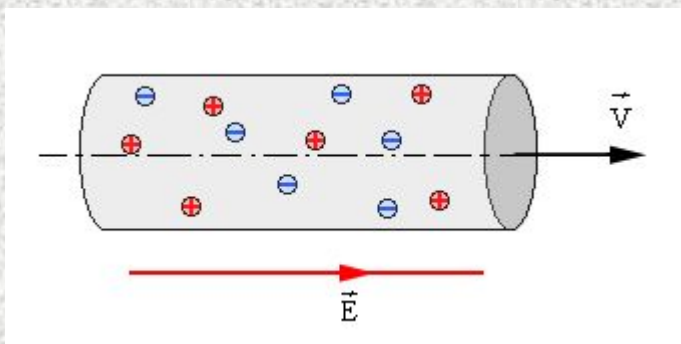
**За направление электрического тока условно принимают направление движения положительных зарядов.**

***Условия возникновения и существования тока:***

- Наличие свободных носителей зарядов.
- Существование в проводнике электрического поля.
- Замкнутость электрической цепи.

Различают также другие виды тока:

Ток переноса (конвекционный ток) – упорядоченное движение заряженных частиц вместе с самим заряженным телом.



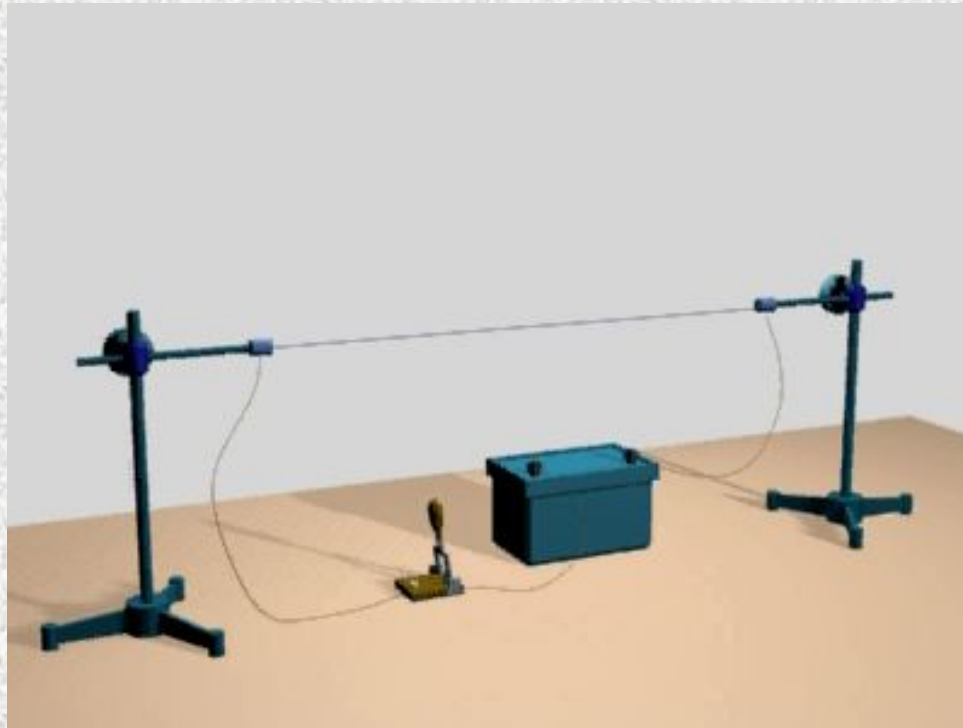
Ток смещения – изменяющееся во времени вихревое электрическое поле.

Направленное движение электронов в вакууме называется током в вакууме.

# *Действия электрического тока*

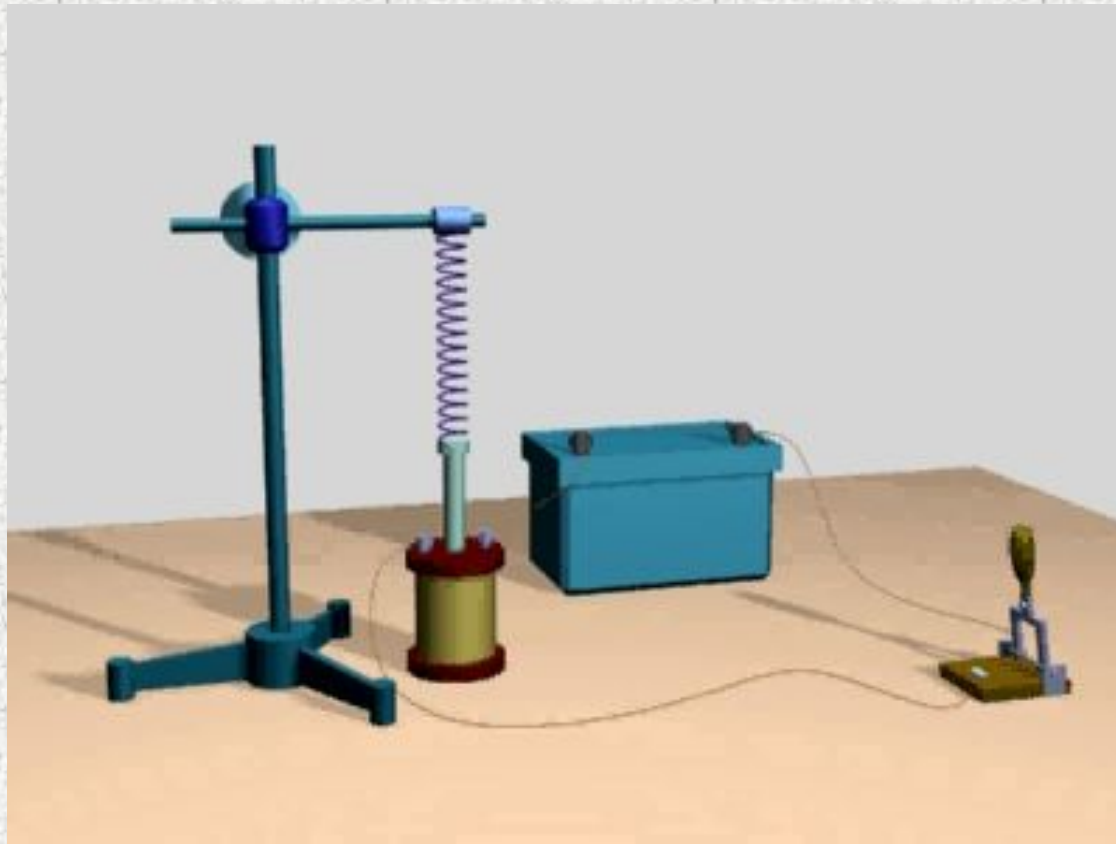
1. Тепловое действие электрического тока.
2. Магнитное действие электрического тока.
3. Химическое действие электрического тока.
4. Световое действие электрического тока.

**При пропускании тока проволока  
нагревается,  
удлиняется и провисает.**

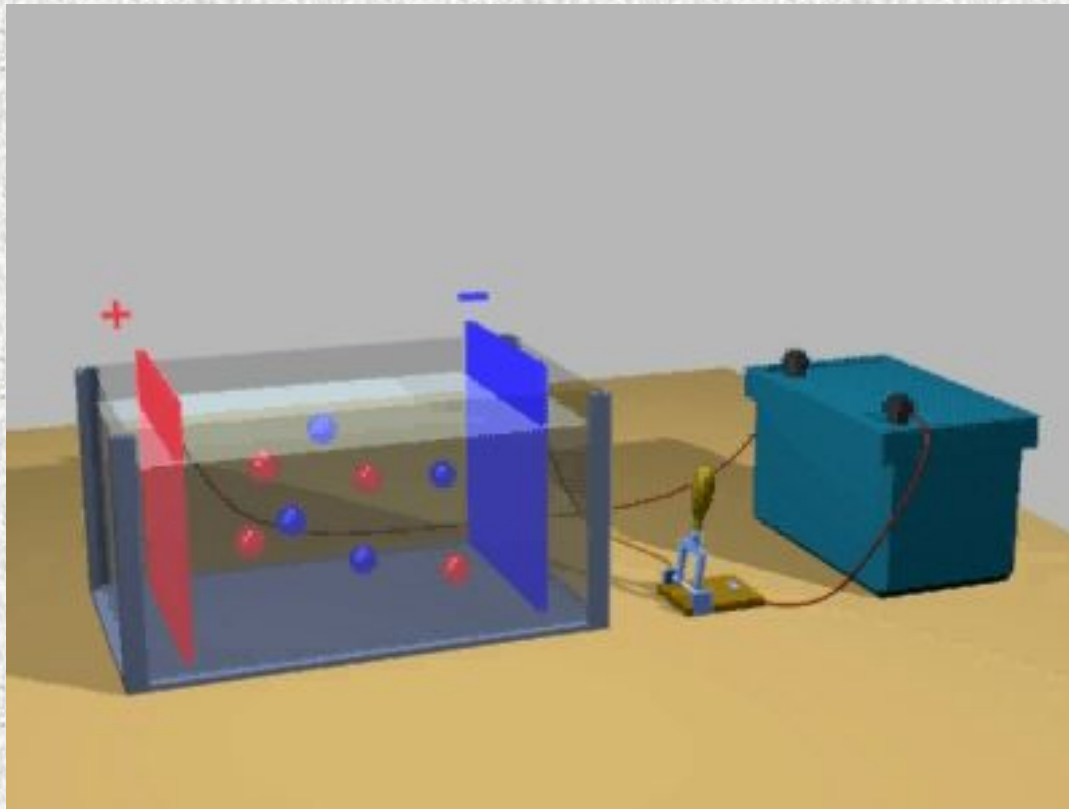




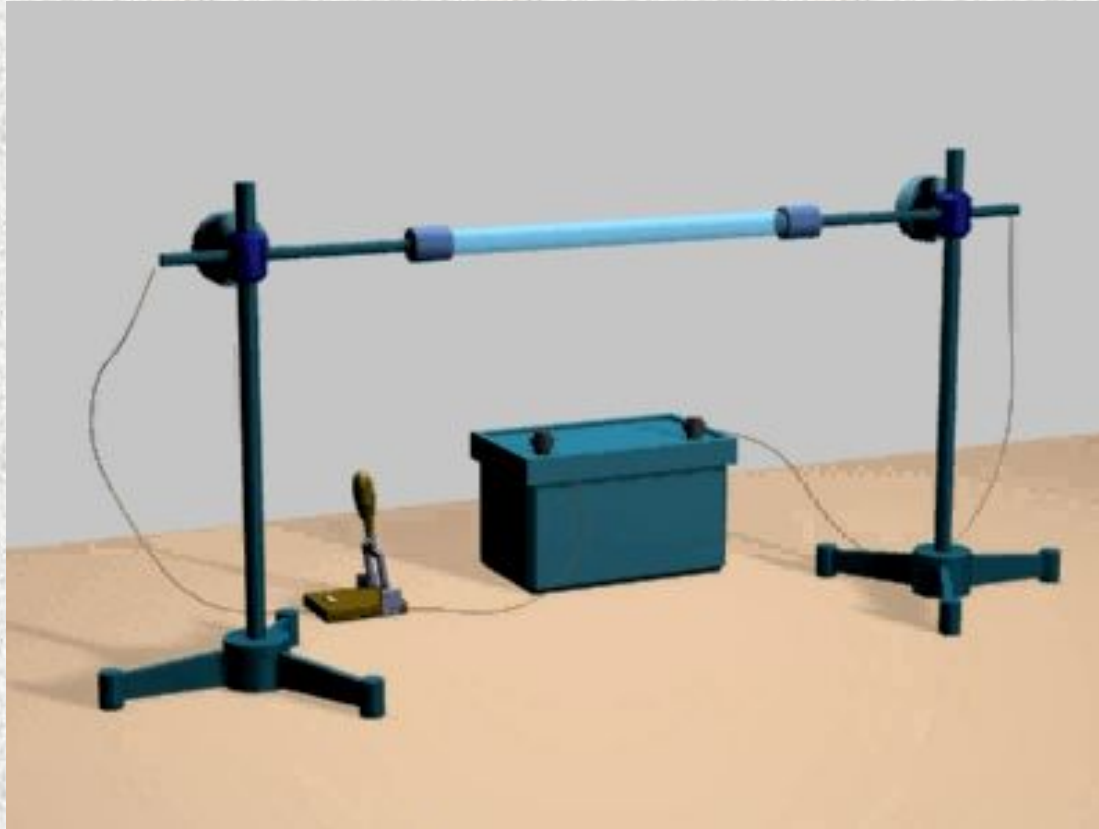
**При включении тока металлический  
цилиндр  
втягивается внутрь катушки.**



**При прохождении тока через раствор электролита на электродах выделяется новое вещество.**



**При прохождении тока через газ может возникнуть его свечение.**





# Характеристики электрического тока.

Сила тока – это СФВ, характеризующая интенсивность направленного движения носителей свободного заряда в проводнике и равная отношению заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника ко времени его прохождения

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

В случае постоянного тока

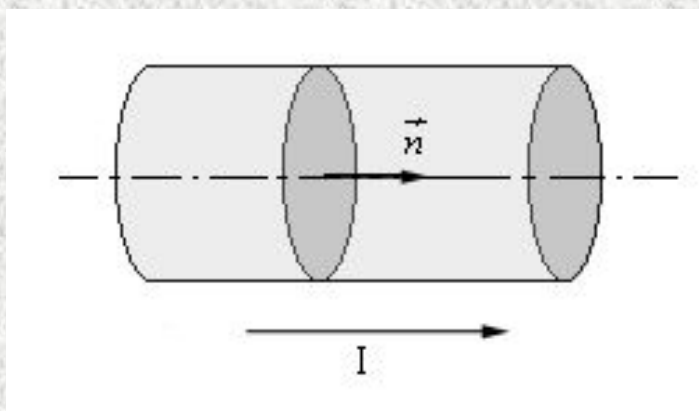
$$I = \frac{q}{t}$$

$$[I] = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ А (ампер)}$$

Прибор для измерения силы тока называется амперметром.

**Плотность электрического тока** – ВФВ, характеризующая распределение силы тока по площади поперечного сечения проводника, модуль которой равен отношению тока, проходящего через поперечное сечение проводника, к площади этого сечения, а направление совпадает с направлением тока в проводнике.

$\vec{n}$  – вектор единичной положительной нормали к поперечному сечению проводника ( $|\vec{n}| = 1$ )

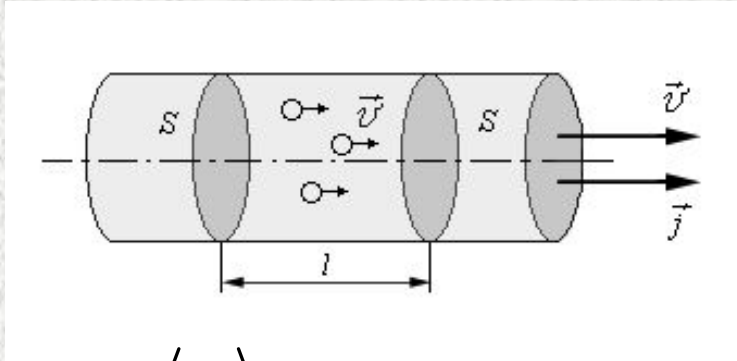


$$\vec{j} = \frac{I}{S} \cdot \vec{n} \qquad j = \frac{I}{S}$$

$$[j] = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

# Кинетическое уравнение тока.

Рассмотрим элемент проводника с током  $I$  длиной  $l$ :



$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{tS} = \frac{q_0 N}{tS} = \frac{q_0 n V}{tS} =$$
$$= \frac{q_0 n l S}{tS} = \frac{q_0 n l}{t} = q_0 n \langle u \rangle$$

где  $\langle u \rangle$  - модуль средней скорости направленного движения свободных носителей заряда в проводнике (дрейфовая скорость)

$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{u} \rangle \quad - \text{кинетическое уравнение тока}$$

В проводнике существуют два вида движения носителей заряда:

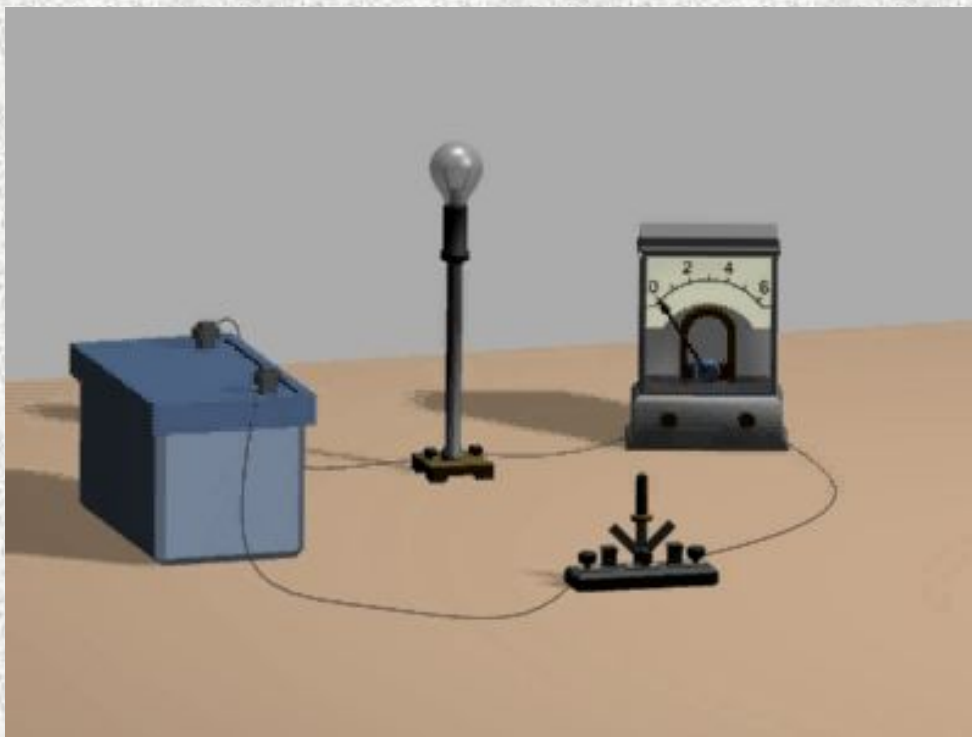
- 1) тепловое хаотическое;
- 2) направленное.

Например, при нормальных условиях для меди ( $j = 10 \text{ A/мм}^2$ )

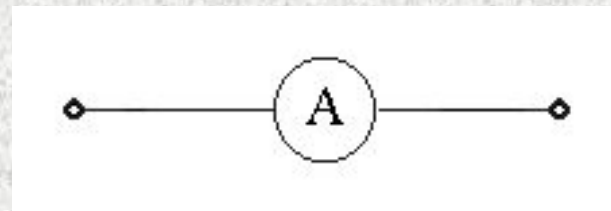
$$\sim 10^5 \text{ м/с}, \quad \sim 10^{-3} \text{ м/с} \quad \langle u \rangle$$

# Амперметр

## Измерение силы тока



Амперметр включают в электрическую цепь последовательно



Условное графическое обозначение (УГО) амперметра.



# Электрическое сопротивление.

Электрическое сопротивление - СФВ, характеризующая свойство проводника препятствовать протеканию по нему тока и зависящего от рода проводника, его размеров и формы, и от температуры.

Для цилиндрических и призматических металлических проводников зависимость сопротивления от его размеров задается формулой

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

где  $\rho$  - удельное сопротивление вещества,

$l$  – длина проводника,

$S$  – площадь поперечного сечения проводника.

$$[R] = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Ом}$$



*Температурная зависимость сопротивления металлических проводников выражается формулой:*

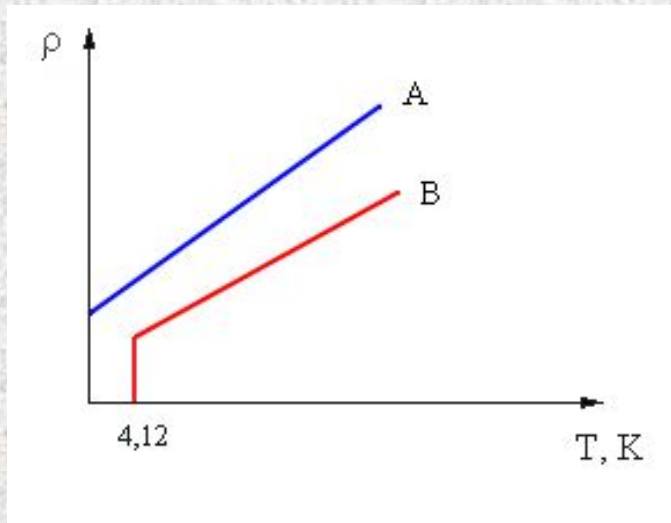
$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

*где  $R_0$  – сопротивление проводника при  $T_0 = 273 \text{ K}$ ,  
 $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления (ТКС),  
 $\Delta T = T - T_0$  – приращение температуры проводника.*

*Для большинства металлов  $\alpha \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$*

*ТКС равен относительному изменению сопротивления проводника при изменении его температуры на 1 К.*

# Сверхпроводимость

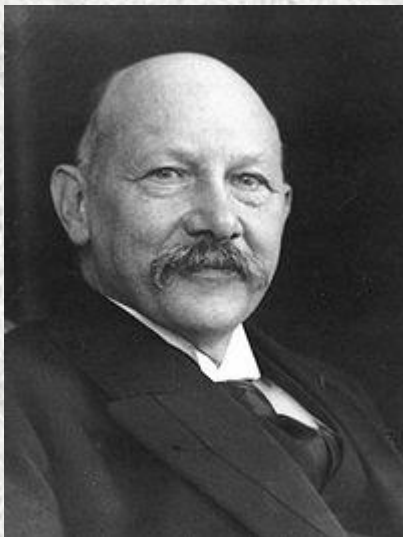


**Сверхпроводимость** — явление резкого падения сопротивления проводника при понижении его температуры до некоторого критического значения.

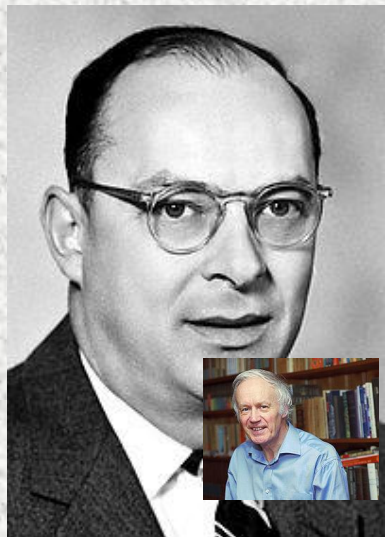
Температура  $T_k$ , при которой наступает сверхпроводимость, называется критической.

Вещество	$T_{кр}, K$
Вольфрам	0,015
Титан	0,4
Кадмий	0,5
Уран	0,8
Цинк	0,9
Алюминий	1,2
Индий	3,4
Олово	3,7
Ртуть	4,2
Свинец	7,2
Ниобий	9,2
(Ba-La-Cu-O)сплав	35
(Ba-Yt-Cu-O)сплав	98
(Tl-Ca-Ba-Cu-O)	125
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$	135

# Сверхпроводимость и Нобелевские премии



Хейке  
Камерлинг-Оннес  
(1853-1926)  
N.P. 1913



Джон Бардин  
(1908-1991)  
N.P. 1956, 1972



Леон Купер  
(р. 1930)  
N.P. 1972



Джон Роберт  
Шриффер  
(р.1931)  
N.P. 1972

Теория БКШ



# Сверхпроводимость и Нобелевские премии



Брайан Дэвид  
Джозефсон  
(р. 1940)  
N.P. 1973



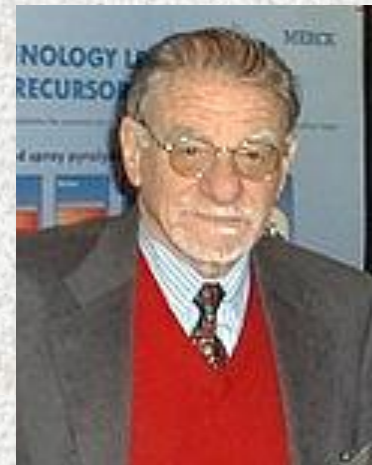
Лео Эсаки  
(р. 1925)  
N.P. 1973



Айвор  
Джайевер  
(р. 1929)  
N.P. 1973

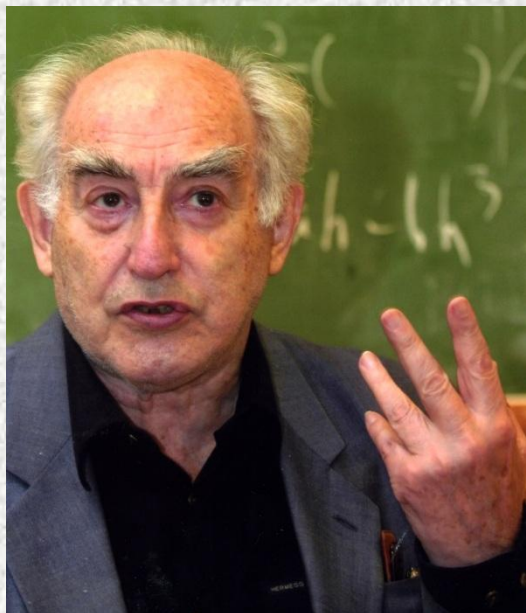


Йоханнес  
Георг  
Беднорц  
(р.1950)  
N.P. 1987



Карл  
Александр  
Мюллер  
(р. 1927)  
N.P. 1987

# Сверхпроводимость и Нобелевские премии



Виталий Лазаревич  
Гинзбург  
(1916-2009)  
N.P. 2003



Алексей Алексеевич  
Абрикосов  
(р. 1928)  
N.P. 2003



сэр Энтони Джеймс  
Легgett  
(р. 1938)  
N.P. 2003

Теория ГЛАГ

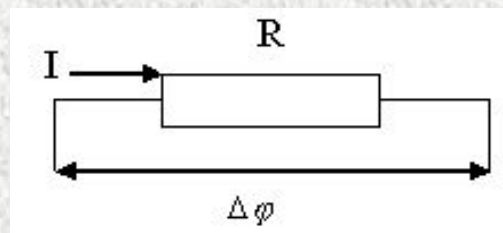


# Закон Ома для однородного участка цепи

Сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна разности потенциалов на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению участка.

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

Однородный участок цепи – участок, не содержащий источника тока, то есть в котором на заряженные частицы действуют только электростатические силы.



# Электродвижущая сила (ЭДС)

**Сторонние силы** – это любые силы некулоновской природы, способствующие разделению разноименных зарядов.

*Сторонние силы действуют внутри источника тока.*

ЭДС & источника тока – это СФВ, являющаяся энергетической характеристикой источника тока и равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда внутри источника тока с отрицательного полюса на положительный к этому заряду:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{СТ}}}{q_{+}}$$

$$[\varepsilon] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В (вольт)}$$

**ВОЛЬТА** (Volta) Алессандро (1745-1827), итальянский естествоиспытатель, физик, химик и физиолог. Его важнейшим вкладом в науку явилось изобретение принципиально нового источника постоянного тока, сыгравшее определяющую роль в дальнейших исследованиях электрических и магнитных явлений. В честь него названа единица разности потенциалов электрического поля - вольт.



# Напряжение.

Напряжение на участке цепи – СФВ, равная отношению алгебраической суммы работ, совершаемых кулоновскими и сторонними силами при перемещении точечного положительного заряда, к этому заряду:

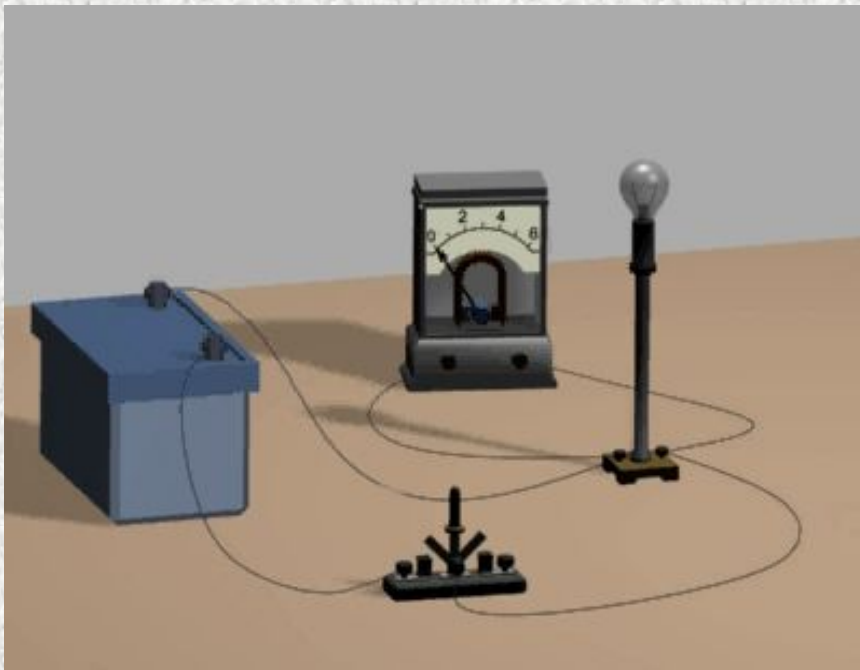
$$U = \frac{A_{\Sigma}}{q_{+}} = \Delta\varphi + \varepsilon$$

Прибор для измерения напряжения называется вольтметром

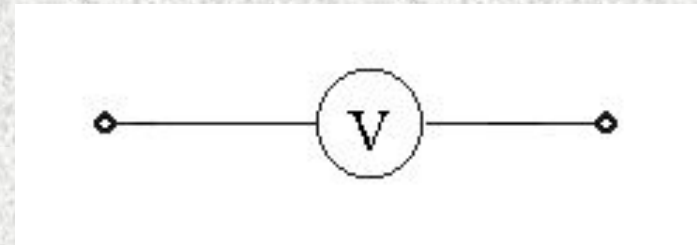


# Вольтметр

## Измерение напряжения



В измеряемую электрическую цепь вольтметр включают параллельно



УГО вольтметра.



# Теорема о циркуляции вектора напряженности

Рассмотрим работу кулоновских сил по перемещению заряда вдоль замкнутого контура.

Так как кулоновские силы - консервативные, то их работа по замкнутому контуру равна нулю:

$$A_{\text{кул}} = \oint_L \vec{F} d\vec{r} = \oint_L q_+ \vec{E} d\vec{l} = q_+ \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

*Теорема о циркуляции вектора напряженности по замкнутому контуру:*

Циркуляция вектора напряженности поля кулоновских сил по замкнутому контуру равна нулю.

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Рассмотрим теперь работу сторонних сил по перемещению заряда вдоль замкнутого контура.

$$A_{\text{ст}\odot} = \oint_L \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = \oint_L q_+ \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} = q_+ \oint_L \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$$

Разделим на переносимый заряд  $q_+$ :

$$\frac{A_{\text{ст}\odot}}{q_+} = \oint_L \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}$$

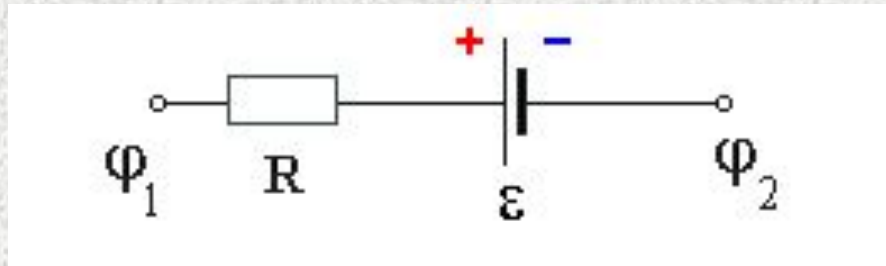
но  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q_+}$ , следовательно

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_{\text{ст}} \cdot d\vec{l} \quad - \text{ теорема о циркуляции вектора напряженности поля сторонних сил}$$

Циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил по замкнутому контуру отлична от нуля и равна ЭДС.

**ВЫВОД:** Электростатическое поле (поле кулоновских сил) является потенциальным, а поле сторонних сил является вихревым.

**Неоднородный участок электрической цепи** – участок, содержащий источник тока, то есть в котором на заряженные частицы действуют и электростатические и сторонние силы.



**Закон Ома для неоднородного участка цепи**

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R_{\Sigma}} = \frac{\Delta\varphi + \varepsilon}{R_{\Sigma}}$$

где  $R$  – сопротивление внешнего участка цепи;

$r$  – сопротивление источника тока;

$R_{\Sigma} = R + r$  - полное сопротивление цепи

## Закон Ома для полной цепи

Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

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

*Если полюсы источника тока напрямую соединить между собой, то получится короткое замыкание источника тока*

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\varepsilon}{r}$$



# Закон Ома в дифференциальной (локальной) форме

Рассмотрим дифференциально малый участок проводника

$$I = \frac{dU}{dR} = \frac{SdU}{\rho dl} = \frac{Sd\varphi}{\rho dl} = \frac{ES}{\rho}$$

Разделим на  $S$ :  $j = \frac{E}{\rho}$

Введем обозначение  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  - удельная проводимость вещества

Тогда

$\vec{j} = \gamma \vec{E}$  - закон Ома в дифференциальной (локальной) форме

$G = \frac{1}{R}$  - проводимость проводника

$[G] = 1 \text{ Ом}^{-1} = 1 \text{ См (сименс)}$



# Работа

## электрического тока

Работа электрического тока на однородном участке цепи – это работа электрических сил по перемещению свободных зарядов в проводнике.

$$A = q\Delta\varphi = qU = IUt$$

С учетом закона Ома: 
$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

$$[A] = 1A \cdot 1V \cdot 1c = 1Дж$$

Работа непостоянного тока

$$A = \int_{t_1}^{t_2} i(t)u(t)dt$$

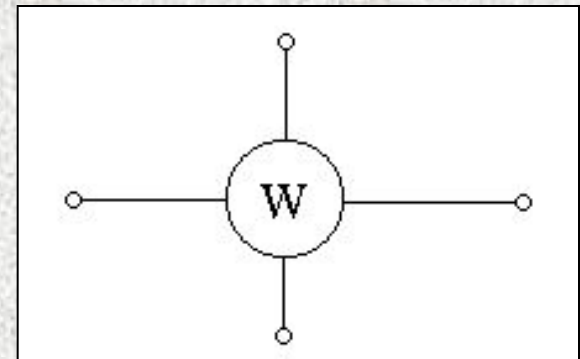
Прибор для измерения работы электрического тока называется **электрическим счетчиком**

# Мощность электрического тока

Мощность электрического тока – СФВ, характеризующая быстроту совершения работы электрическим током, и равная отношению работы тока к промежутку времени, за который эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad [P] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В} = 1 \text{ Вт}$$

Прибор для измерения мощности электрического тока называется **ваттметром**.



## **Закон Джоуля - Ленца**

Пусть в проводнике происходит преобразование электрической энергии только в тепловую:

$$Q = A = I^2 R t.$$

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике при протекании по нему тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока:

$$Q = I^2 R t$$

**Границы применимости закона Джоуля – Ленца:**

закон Джоуля - Ленца справедлив, если на неподвижном участке цепи происходит превращение электрической энергии только в тепловую (вся работа тока идет на нагревание проводника,  $A = Q$  ).

Рассмотрим количество теплоты, выделяемой в единице проводника за единицу времени:

$$w = \frac{Q}{Vt} \quad \text{- удельная тепловая мощность}$$

$$w = \frac{I^2 R t}{Vt} = \frac{U^2 R}{R^2 V} = \frac{U^2}{RV} = \frac{U^2 S}{\rho l V} = \frac{U^2 S}{\rho l^2 S} = \frac{U^2}{\rho l^2} = \frac{E^2}{\rho} = \gamma E^2$$

$$w = \gamma E^2 \quad \text{- закон Джоуля–Ленца в дифференциальной (локальной) форме.}$$

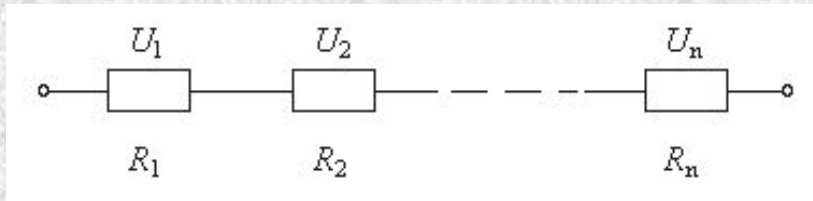


# Соединения проводников

## Последовательное соединение

### проводников.

Соединение, при котором начало каждого последующего проводника соединяется с концом предыдущего.

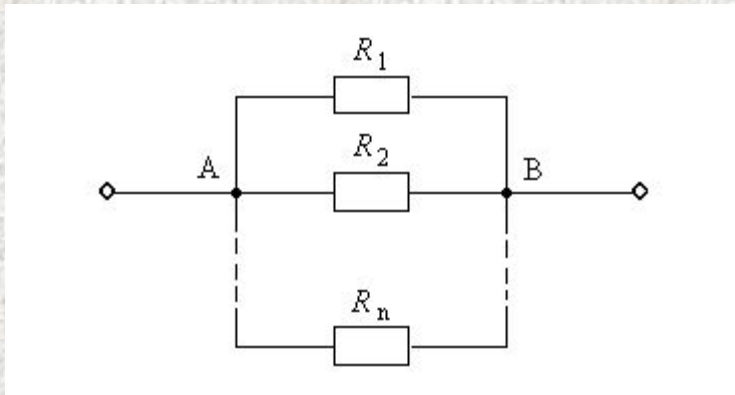


$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i$$

## Параллельное соединение

### проводников

Соединение, в котором все начала проводников соединяются в один узел, а все концы – в другой.



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

$$G_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n G_i$$

# *Правила Кирхгофа*



Густав Роберт  
Кирхгоф  
(1824-1887)  
*немецкий физик*

## Узел электрической цепи

– любая ее точка, в которой сходятся не менее трех проводников.

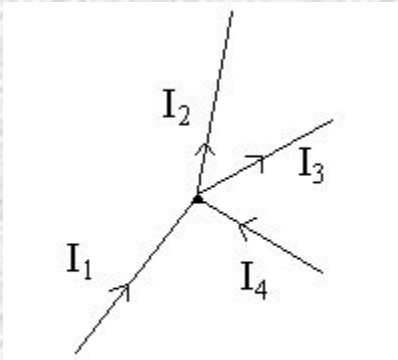
# Правила Кирхгофа

## Первое правило Кирхгофа:

Алгебраическая сумма токов в любом узле разветвленной электрической цепи равна нулю

**Токи, входящие в узел – положительные, а выходящие из узла – отрицательные**

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



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

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

## Второе правило Кирхгофа:

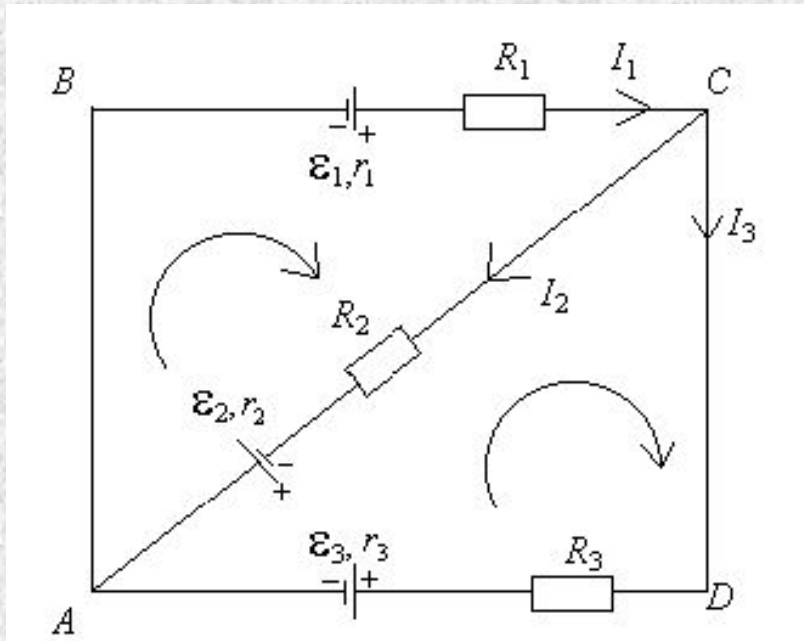
*Алгебраическая сумма падений напряжений на различных участках замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре.*

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j$$

*Второе правило Кирхгофа вытекает из закона Ома, а значит является следствием закона сохранения энергии.*



Рассмотрим пример:



*I* правило:

узел C:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

*II* правило:

контур ABCDA:

$$I_1(R_1 + r_1) + I_3(R_3 + r_3) = \varepsilon_1 - \varepsilon_3.$$

контур ACDA:

$$-I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = -(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

# Алгоритм решения задач на правила Кирхгофа

1. Нарисовать схему цепи.
2. Выбрать произвольно направления токов в отдельных участках цепи.
3. Для узлов составить уравнения по первому правилу Кирхгофа. При этом если узлов  $n$ , то уравнений должно быть составлено  $n - 1$  (на одно меньше).
4. Выбрать замкнутые контуры в данной цепи. При этом каждый новый контур обязательно должен включать в себя хотя бы один участок, не вошедший в предыдущие контуры.
5. Выбрать произвольно направления обходов в этих контурах.
6. Составить для контуров уравнения по второму правилу Кирхгофа.
7. Проверить полученную систему уравнений на совместность и решить алгебраически.