

# Лекция 3

## *Электричество и магнетизм*

Раздел физики электродинамика (электричество и магнетизм) – изучает электромагнитные взаимодействия. Носителем этих взаимодействий является электромагнитное поле, которое представляет собой совокупность двух взаимосвязанных полей: электрического и магнитного.

- **Электрическое поле** – это особая форма существования материи, связанная с электрическими зарядами и осуществляющая взаимодействие между заряженными телами.
  - Существует **два вида электрических зарядов**, условно называемых **положительными** и **отрицательными**.

Заряды разных знаков притягиваются друг к другу

Заряды одного знака отталкиваются

Единица заряда в СИ - кулон (Кл).

Точечный заряд - заряженное тело, размерами которого можно пренебречь.

Заряд передается от одного тела к другому порциями, содержащими **целое число элементарных зарядов**.

$$q = \pm ne \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Величина заряда не зависит от скорости, с которой он движется.

Закон сохранения электрического заряда:  $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$

В электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной при любых процессах, происходящих в системе.

**Электростатика** изучает взаимодействия электрических зарядов, неподвижных относительно выбранной инерциальной системы отсчета.

## Закон Кулона

Силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними и направлены вдоль соединяющей их

Закон Кулона в системе СИ в скалярной

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

и в векторной форме

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

– электрическая постоянная.

**Заряд - индикатор электрического поля.**

Пробный заряд – небольшой по величине точечный положительный заряд, который не вносит заметного изменения в исследуемое поле ( $q'$ ).

## Напряженность – силовая характеристика электрического поля

**Напряженностью электрического поля называют векторную физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.**

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q'}$$

Зная напряженность в точке пространства можно найти силу, действующую на заряд в данную точку:

$$\vec{F}(\vec{r}) = q \cdot \vec{E}(\vec{r})$$

Единица напряженности в СИ : вольт на метр В/м = Н/Кл

Напряженность поля, созданного в точке  $\vec{r}$  точечным зарядом  $q$ : 

Сила Кулона, действующая на пробный заряд в вакууме:

$$F = \frac{qq_{пр}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Модуль напряженности:

$$E = \frac{F}{q_{пр}} = \left( \frac{qq_{пр}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right) / q_{пр} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

В векторной форме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

$r$  – модуль радиус-вектора ,

**В однородном изотропном диэлектрике электрическое поле ослабляется в  $\epsilon$  раз**

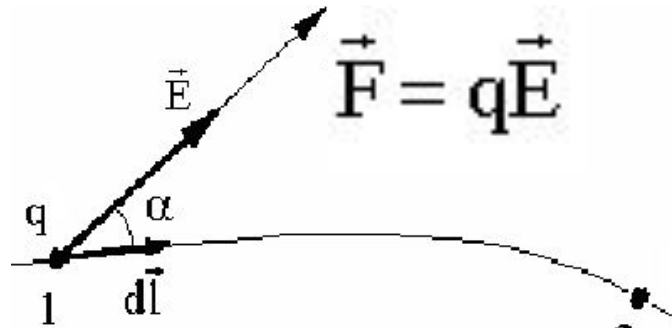
$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость

Напряженность поля точечного заряда в диэлектриках (веществах, в которых нет подвижных зарядов)

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

## Работа электростатического поля .



Заряд перемещается из 1 в 2  
вдоль кривой  $l$

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{l}) = F \cdot dl \cdot \cos \alpha =$$

$$= q \cdot E \cdot \cos \alpha \cdot dl = qE_1 dl$$

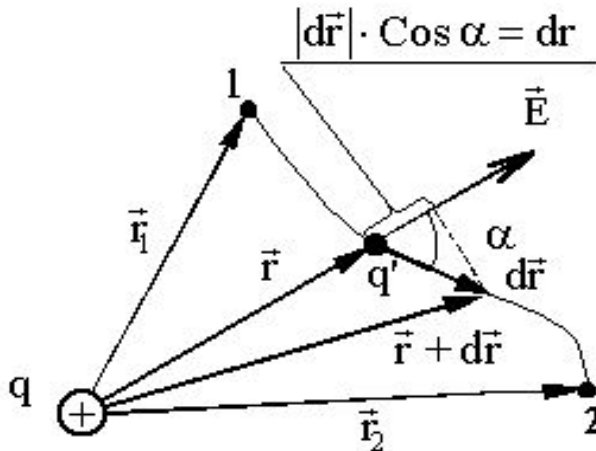
$$A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 q\vec{E} d\vec{l} =$$

$$= q \int_1^2 E \cdot \cos \alpha \cdot dl = q \int_1^2 E_1 dl$$

### Работа электрического поля точечного заряда

Пусть  $E$  создается точечным зарядом  $q$ , тогда:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad F = q'E = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$



$$A_{12} = \int_1^2 |\vec{F}| \cdot |d\vec{r}| \cdot \cos \alpha = \int_1^2 |\vec{F}| \cdot dr = \int_1^2 \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr$$

$$= \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

**Работа сил поля не зависит от пути перехода из точки 1 в точку 2**

**Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля - работа кулоновских сил по замкнутому контуру равна нулю.**

**Кулоновская сила - консервативна, а электростатическое поле является потенциальным.** Работу по изменению конфигурации поля можно представить в виде разности 2 чисел:

$$A_{12} = W_{\pi 1} - W_{\pi 2}$$

**В электростатическом поле заряд обладает потенциальной энергией  $W_{\pi}$ .**

$$W_{\pi} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r} + \text{const}$$

Для электрического поля точечного заряда принято выбирать **const** так, чтобы взаимная потенциальная энергия на бесконечно большом расстоянии между зарядами обращалась в ноль:

$$r \rightarrow \infty, W_{\pi} = 0.$$

Тогда:

$$W_{\pi} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

**Потенциал - энергетическая характеристика поля**

**Потенциал электростатического поля в точке  $r$  равен отношению потенциальной энергии пробного точечного заряда  $q'$ , помещенного в данную точку, к величине этого заряда  $q'$ .**

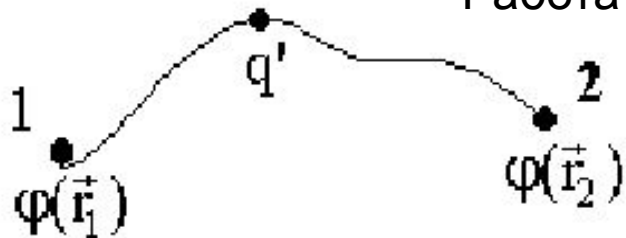
$\varphi$  - не зависит от  $q'$ ,

$\varphi$  - скалярная физическая величина

$$\varphi(\vec{r}) \equiv \frac{W_{\pi}}{q'}$$

## Разность потенциалов, связь с работой

Работа по перемещению заряда в электрическом поле:



$$W_{n1} = q' \varphi(\vec{r}_1)$$

$$W_{n2} = q' \varphi(\vec{r}_2)$$

$$W_{n1} = q' \varphi_1 \quad W_{n2} = q' \varphi_2$$

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2} = q' (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$A_{12} = q' (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов,

$$\varphi_1 \equiv \varphi(\vec{r}_1), \quad \varphi_2 \equiv \varphi(\vec{r}_2)$$

## Потенциал поля точечного заряда:

Потенциальная энергия  
взаимодействия  
точечных зарядов:

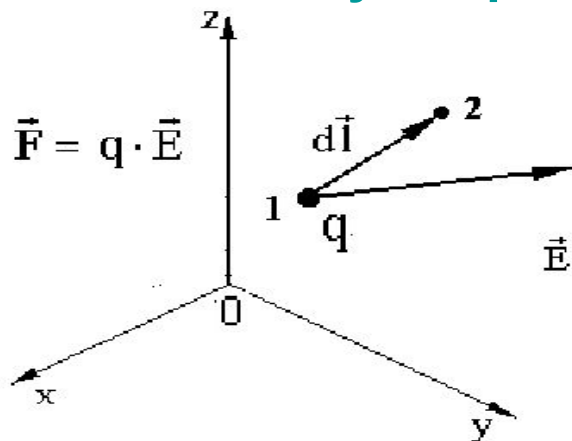
$$W_{\pi} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\varphi(r) = \frac{W_{\pi}}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Единица потенциала в СИ вольт (1 В)

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

# Связь между напряженностью и потенциалом



Элементарную работу по перемещению заряда  $q$  в электрическом поле из 1 в точку 2 можно выразить двумя способами: а) через напряженность

$$\begin{aligned} dA_{12} &= F \cdot dl \cdot \cos \alpha = \\ &= q \cdot E \cdot \cos \alpha \cdot dl = qE_l dl \end{aligned} \quad E_l = E \cos \alpha$$

б) через разность потенциалов

$$dA_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -d\varphi \cdot q$$

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl}$$

- получили, приравнявая (а) и (б)

Возьмем  $d\vec{l}$  вдоль оси  $x$ , тогда:  $E_x = -\frac{d\varphi}{dx}$

Для  $d\vec{l}$  вдоль оси  $y$ :  $E_y = -\frac{d\varphi}{dy}$

Для  $d\vec{l}$  вдоль оси  $z$ :  $E_z = -\frac{d\varphi}{dz}$

Вектор напряженности:

$$\vec{E} = -\left( \vec{e}_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$$

Обозначим

$\vec{e}_x, \vec{e}_y$  и  $\vec{e}_z$  - единичные вектора вдоль осей  $x, y$  и  $z$ .

$$\text{grad} \equiv \vec{\nabla} \equiv \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$$

- оператор градиента (оператор набла)

Напряженность электрического поля равна минус градиенту потенциала:

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi$$

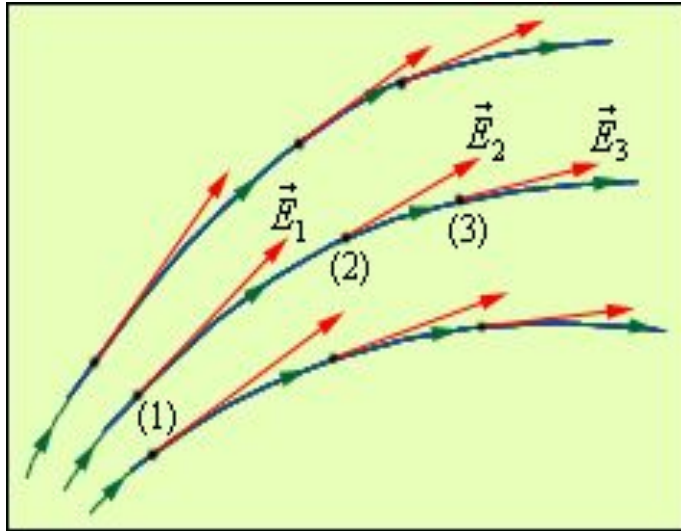
$\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала



## Линии напряженности и эквипотенциальные

поверхности электрического поля ( используются для графического изображения электрических полей )

Правила построения силовых линий :

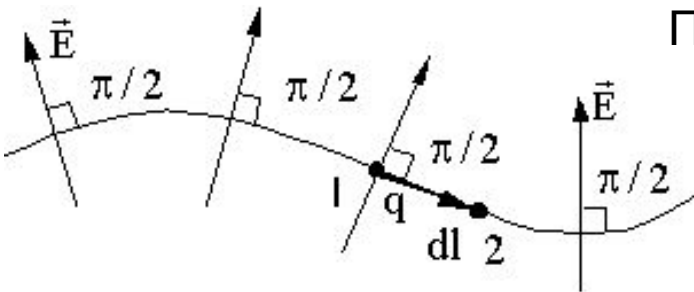


- ✦ *Непрерывны, начинаются у «+» зарядов, заканчиваются у «-» зарядов или уходят в бесконечность, нигде не пересекаются*
- ✦ *Направление вектора  $\vec{E}$  в каждой точке совпадает с направлением касательной к силовой линии.*
- ✦ *Густота линий пропорциональна модулю  $\vec{E}$  в данной точке.*

**Эквипотенциальная поверхность** - поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал

$$\varphi(\vec{r}) = \text{const.}$$

При перемещении заряда вдоль эквипотенциальной поверхности работа электростатических сил равна нулю:



$$dA_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot \theta = q \cdot E dl \cdot \text{Cos } \alpha$$

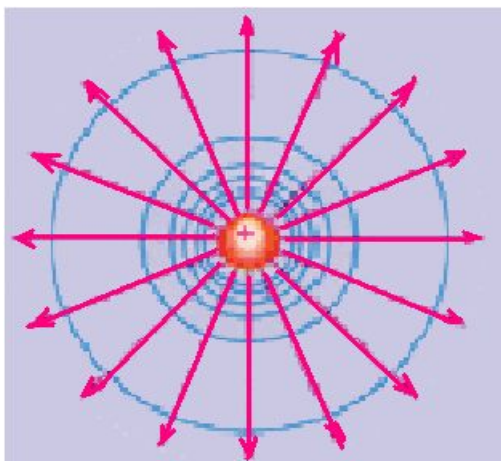
$$\Rightarrow \text{Cos } \alpha = \theta, \quad \alpha = \frac{\pi}{2}$$

## Правила построения эквипотенциальных поверхностей :

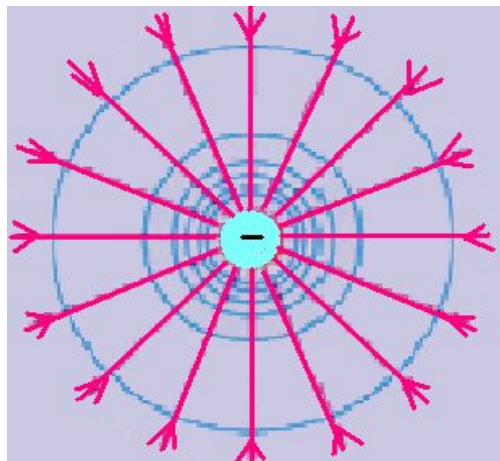
- ✦ *Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны к линиям напряженности.*
- ✦ *Разность потенциалов для двух соседних эквипотенциальных поверхностей одинакова*
- ✦ *Эквипотенциальные поверхности расположены гуще там, где напряженность поля больше*

Эквипотенциальные поверхности(синие) и силовые линии(красные линии):

### 1) Электрического поля **точечного заряда**

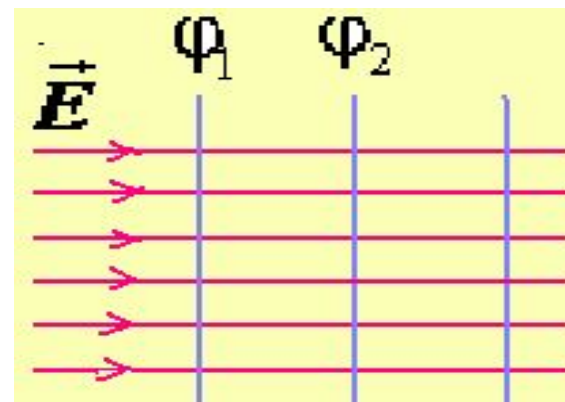


положительного  
заряда



отрицательного  
заряда

### 2) **Однородного** электрического поля



$$\vec{E}(\vec{r}) = \text{const}$$

## Принцип суперпозиции (наложения) для сил кулоновского

взаимодействия :

*Если заряженное тело взаимодействует с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил попарного взаимодействия зарядов.*

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Следовательно, поля складываются, не возмущая друг друга

**Принцип суперпозиции напряженностей электрических полей:**

*Для системы зарядов*

✦ *результатирующая напряженность поля в данной точке равна векторной сумме напряженностей полей отдельных зарядов:*

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

**Принцип суперпозиции потенциалов электрических полей:**

*Для системы зарядов*

✦ *результатирующий потенциал в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов от отдельных зарядов:*

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

Принцип суперпозиции позволяет вычислять характеристики электрических полей для любой системы зарядов, представив ее как сумму точечных зарядов

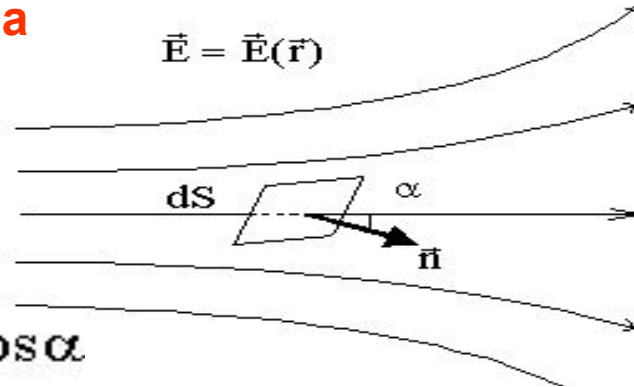
# Поток вектора напряженности электрического поля

скалярная физическая величина

dΦ через

бесконечно малую площадку

$$d\Phi = dS \cdot E \cdot \cos \alpha = dS \cdot E_n$$

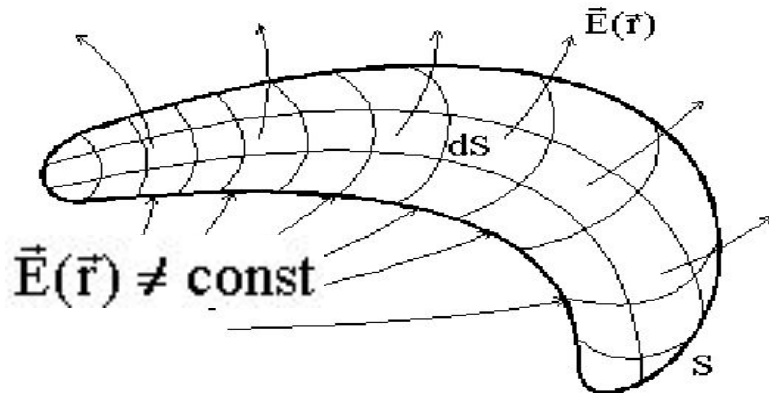


вектор  
внешней  
нормали к  
поверхности  
S.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \text{const} \quad E_n = E \cdot \cos \alpha$$

Для неоднородного поля

Φ через произвольную поверхность



$$d\Phi = E_n \cdot dS$$

$$\Phi = \int_S E_n dS$$

Φ пропорционален  
числу силовых  
линий,  
проходящих через S

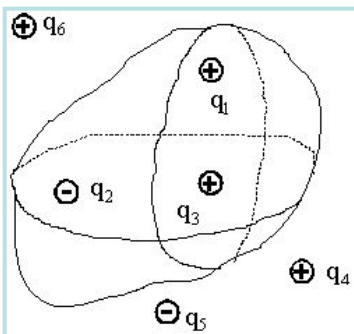
## Теорема Остроградского-Гаусса:

Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность = алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности, деленной на ε<sub>0</sub> :

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$

или

$$\int E_n ds = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$



Теорема Остроградского-Гаусса позволяет найти характеристики электрических полей для некоторых систем зарядов

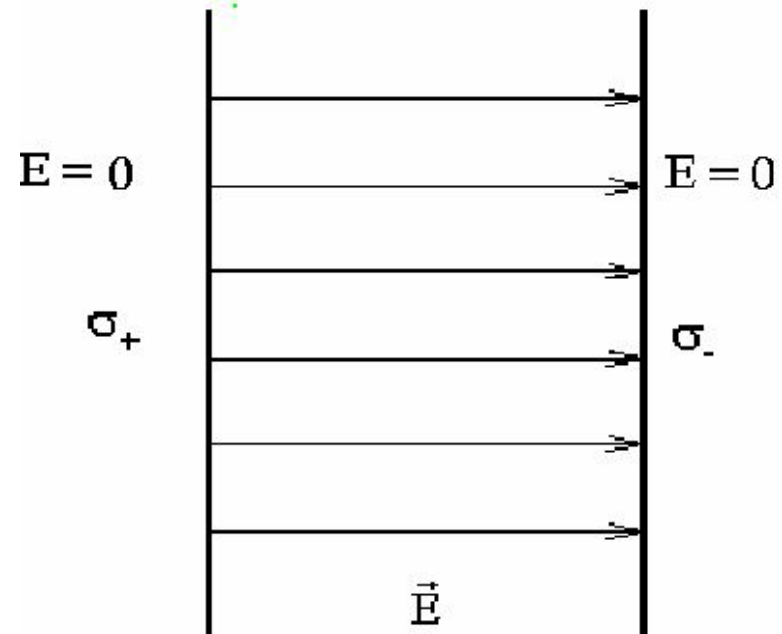
Для равномерно заряженной бесконечной плоскости в вакууме

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

$$\varphi = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} x$$

$\sigma$  - поверхностная плотность заряда

Для поля между разноименно заряженными пластинами в вакууме



$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}$$

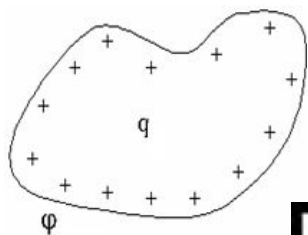
## Проводники - вещества, проводящие электрический ток:

металлы, растворы и расплавы солей, кислот, щелочей, ионизированные газы.

**В проводниках имеется большое количество подвижных носителей зарядов, свободных электронов или ионов.**

**Носители заряда способны упорядоченно перемещаться по проводнику под действием внешнего электрического поля.**

Избыточный заряд распределяется по внешней поверхности проводника (кулоновское отталкивание). Эл. поле не проникает в проводник



Емкость проводника характеризует его способность накапливать заряды и зависит только от геометрических размеров проводника и диэлектрических свойств окружающей среды

$$\frac{q}{\varphi} \equiv C$$

Единица емкости - фарада, Ф.

$$[C] = \text{Кл} / \text{В} = \text{Ф}$$

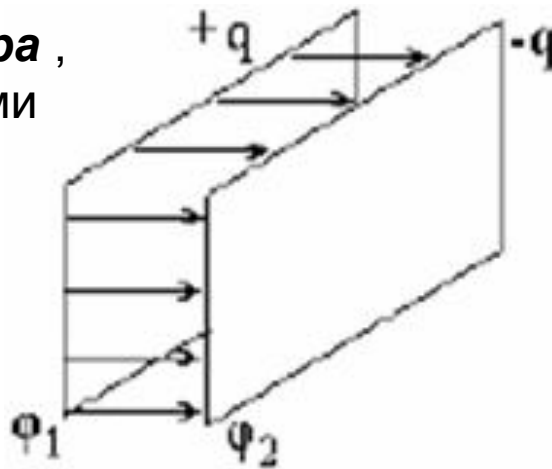
Наличие вблизи уединенного проводника тел увеличивают его емкость.

**Конденсатор** - две металлические пластины, обычно плоской формы, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, разделенные слоем диэлектрика.



**Обкладки конденсатора** ,  
заряжают разноименными  
зарядами, равными по  
абсолютной величине:

$$q_+ = q_- = q$$



**Емкость конденсатора:**

$q$  - заряд положительно  
заряженной пластины,  
 **$(\phi_1 - \phi_2)$**  – разность  
потенциалов между  
его обкладками.

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U}$$

**Емкость плоского конденсатора:**

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{\sigma S}{(\sigma / \epsilon \epsilon_0) \cdot d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Для плоского конденсатора:  $\phi_1 - \phi_2 = Ed$ ,  
 $E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$   
 $\sigma$  – поверхностная  
плотность заряда

**Энергия заряженного конденсатора = работе зарядки конденсатора = энергии электрического поля внутри конденсатора**

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{2d} (Ed)^2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} V = wV$$

$V$  - объем пространства между обкладками конденсатора

$w$  - **объемная плотность энергии**

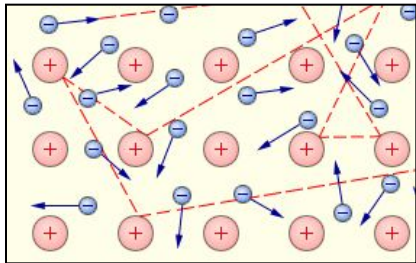
**электростатического поля** (энергия в единице объема).

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$$

# Электрический ток. Сила и плотность тока.

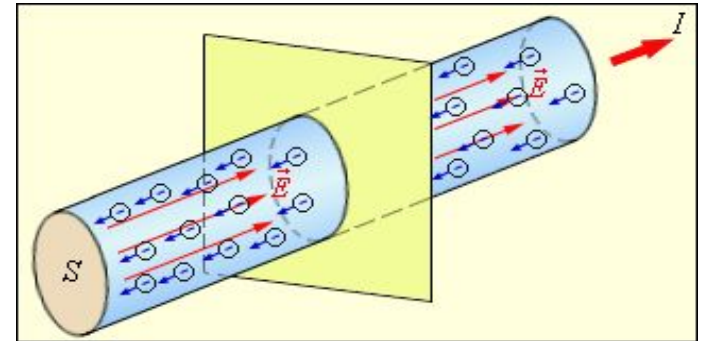
**В металлах** Электроны участвуют в тепловом хаотическом движении со средней скоростью

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{эл}}} \approx 1 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$



$$\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$$

**В электрическом поле** у электронов появляется добавочная скорость направленного упорядоченного движения  $\langle v \rangle \approx 10^{-3} \text{ м/с.}$



**Упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда называется электрическим током.**

Количественная мера электрического тока : **Сила тока  $I$  – скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $dq$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени :**

$$I = dq/dt$$

Сила тока – алгебраическая величина.

За **направление тока** принимают направление движения «+» зарядов.

$$[I] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$$

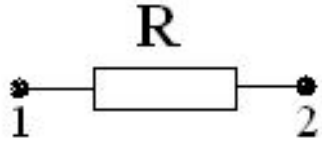
Единица силы тока в СИ - ампер.

**Ток, не изменяющийся со временем по величине и по направлению, называют постоянным.**

$$I = q/t$$



**Однородным участком цепи** называют участок, на котором направленное движение зарядов происходит под действием только кулоновских сил.



## Закон Ома для однородного участка электрической цепи (1826 год):

*Сила тока  $I$ , текущего по однородному участку цепи, прямо пропорциональна напряжению  $U$ , приложенному к нему, и обратно пропорциональна сопротивлению  $R$  этого участка*

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

**Напряжение  $U$**  совпадает с разностью потенциалов  $\phi_1 - \phi_2$  между начальной и конечной точками участка.

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

*$R$  - сопротивление проводника характеризует свойство проводника препятствовать протеканию по нему электрического тока.*

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

**Для проводника длиной  $l$  и сечением  $S$ :**

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

$\rho$  – удельное сопротивление

$\rho$  проводника зависит только от его материала и температуры.

Для чистых металлов

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

$\rho_0$  - удельное сопротивление проводника при  $t = 0^\circ\text{C}$   
 $t$  – температура проводника по шкале Цельсия.

$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления

Направление тока и его распределение по сечению проводника характеризует **вектор плотности тока  $\vec{j}$**

Для постоянного тока модуль вектора  $\vec{j}$  равен:  $\mathbf{j} = I/S$ .

**Направление вектора  $\vec{j}$**  совпадает с направлением вектора скорости  $\vec{v}$  упорядоченного движения положительных зарядов в проводнике.

### Связь плотности тока и скорости упорядоченного движения зарядов

$$\vec{j} = q_0 n \vec{v}$$

$q_0$  – заряд одного носителя;

$n$  – концентрация, число носителей в единице объема;

$\langle v \rangle$  – средняя скорость направленного движения;

Оценим  $\langle v \rangle$  электронов в меди:

$$n \sim 10^{29} \text{ м}^{-3},$$

$$j_{\text{пред}} \sim 10^7 \text{ А/м}^2$$

$$\langle v \rangle = \frac{j}{|q_0|n} \sim \frac{10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

### Закон Ома в дифференциальной форме:

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

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

- где **удельная проводимость**

$$[\sigma] = \frac{1}{[\rho]} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$$

# Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца.

**Работа сил электрического поля по перемещению заряда на однородном участке цепи целиком выделяется в виде теплоты.**

Количество теплоты  $Q$ , выделяемое за время  $t$ , можно рассчитать (учитывая закон Ома  $\mathbf{RI} = \mathbf{U}$  и определение силы тока  $\mathbf{I} = \mathbf{q}/t$ ) для постоянного тока:

$$Q = A = qU = IU t = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t$$

**Закон Джоуля – Ленца** выражает закон сохранения энергии

**Мощность электрического тока**

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Работа тока в СИ выражается в **джоулях (Дж)**, Мощность– в **ваттах (Вт)**

# Электродвижущая сила источника (ЭДС).

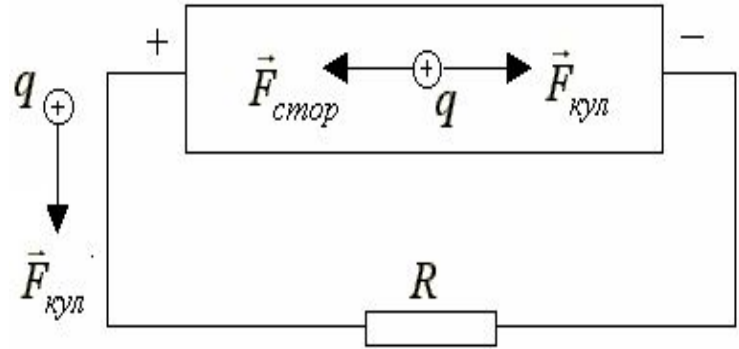
Для поддержания **постоянного замкнутого тока** нужно компенсировать зарядам потери энергии на торможение, совершая над ними работу.

Если траектория **замкнута**, то  $\phi_1 = \phi_2$

Работа электростатического поля по замкнутой траектории:

$$A_{12} = q (\phi_1 - \phi_2) = 0$$

Следовательно, эту работу должны совершать **сторонние силы**.



**Сторонние силы** - это силы некулоновского происхождения, совершающие работу по разделению разноименных зарядов и переносу заряда (+q) от отрицательного полюса **источника тока** к его положительному полюсу.

Участок цепи, в котором действуют сторонние силы - **источник тока**

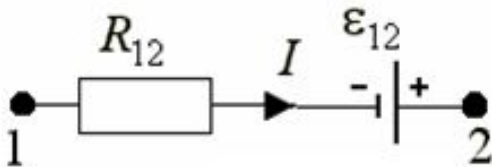
**Характеристики источника тока:** Внутреннее сопротивление  $r$

**Электродвижущая сила (ЭДС)  $\epsilon$**  - работа сторонних сил по перемещению «+» точечного единичного заряда от «-» к «+» полюсу

$$\epsilon \equiv A_{\text{ст. сил}} / q$$

Единица ЭДС - вольт.  $[\epsilon] = \text{Дж} / \text{Кл} = \text{В}$

**Закон Ома для неоднородного участка цепи:**

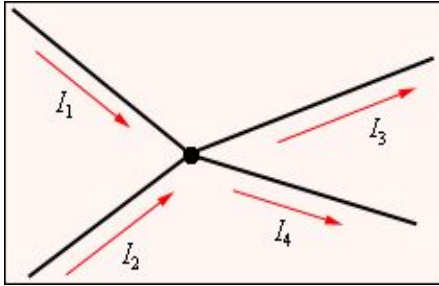


$$IR_{1.2} = U_{1.2}$$

$$\pm IR_{1.2} = \phi_{\text{нач}} - \phi_{\text{кон}} \pm \epsilon_{1,2}$$

# Правила Кирхгофа для разветвленных цепей (1847 год)

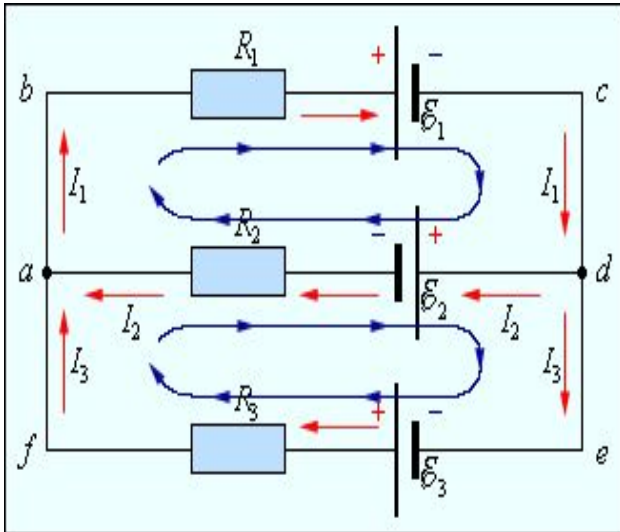
**Первое правило Кирхгофа:** Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю:  $I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$ .



Узлы – точки цепи, где сходятся не менее трех проводников

Входящие токи  $I_1, I_2 > 0$ ; Исходящие токи  $I_3, I_4 < 0$

**Первое правило Кирхгофа – следствие закона сохранения электрического заряда.**



Замкнутые пути в разветвленной цепи называются контурами.

**Второе правило Кирхгофа :**

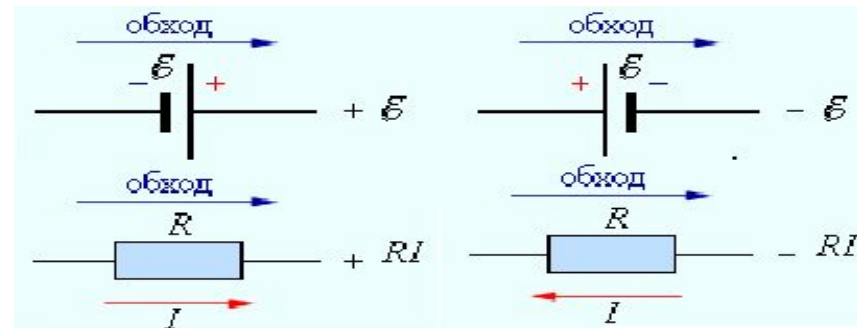
Алгебраическая сумма произведений сопротивления каждого из участков любого замкнутого контура на силу тока на этом участке равна алгебраической сумме ЭДС вдоль этого контура.

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_m$$

В цепи задают *положительные направления тока и обхода контура*.

При записи уравнений принято соблюдать «**правила знаков**»:

Уравнения позволяют рассчитать параметры электрической цепи.



Сравнительная характеристика электрического и магнитного полей

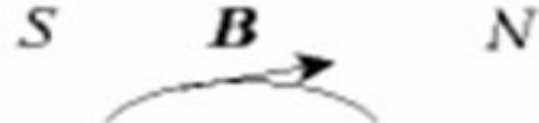
Электрическое поле	Магнитное поле
Источники поля	
Электрически заряженные тела	Движущиеся электрически заряженные тела (эл. токи)
Индикаторы поля	
Пробный заряд	Замкнутый контур с током $I \ell$ - элемент тока
Опытные факты	
Опыты Кулона по взаимодействию электрически заряженных тел	Опыты Ампера по взаимодействию проводников с током
Графическая характеристика	
Линии напряженности электрического поля: в случае неподвижных зарядов имеют начало и конец (потенциальное поле);	Линии индукции магнитного поля: замкнуты (вихревое поле); могут быть визуализированы (металлические опилки)

3-н Кулона

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

3-н Ампера

$$d\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{[I_1 d\vec{l}_1 [I_2 d\vec{l}_2 \vec{r}_{12}]]}{r_{12}^3}$$





# Сравнительная характеристика электрического и магнитного полей

Электрическое поле	Магнитное поле
Силовая характеристика	
<p>Вектор напряженности электрического поля <math>E</math>.</p> <p>Величина: <math>E = \frac{F}{q}</math>.</p> <p>Направление: <math>E \uparrow \uparrow F</math></p>	<p>Вектор индукции магнитного поля <math>\vec{B}</math>.</p> <p>Величина: <math>B = \frac{F}{I \cdot l}</math></p> <p>Направление: правило левой руки</p>
Энергетическая характеристика	
Работа электрического поля неподвижных зарядов (кулоновской силы) равна нулю при обходе по замкнутой траектории	Работа магнитного поля (силы Лоренца) всегда равна нулю ( $v \perp B$ )
Действие поля на заряженную частицу	
Сила всегда отлична от нуля: $F = qE$	Сила зависит от скорости движения частицы: $F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$ ; не действует на покоящуюся частицу (сила Лоренца)
Вещество и поле	
$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$ <p>Проводники: <math>\varepsilon \rightarrow \infty</math>.            Диэлектрики.            Электреты: <math>\varepsilon \gg 1</math>.            сегнетоэлектрики: <math>\varepsilon &gt; 1</math></p>	$\mu = \frac{B}{B_0}$ <p>Ферромагнетики: <math>\mu \gg 1</math>.            Диамагнетики: <math>\mu &lt; 1</math>.            Парамагнетики: <math>\mu &gt; 1</math></p>

# Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ – силовая характеристика магнитного поля

В СИ единица магнитной индукции - тесла .  $[B] = \text{Тл} = \text{Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$

Вспомогательный характер носит вектор  $\vec{H}$ , который не зависит от магнитных свойств среды.

Вектор  $\vec{H}$  называется **вектором напряженности магнитного поля**.

Связь магнитной индукции  $\vec{B}$  с напряженностью  $\vec{H}$  магнитного поля:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

где  $\mu$  - *магнитная проницаемость* изотропной среды.

В вакууме  $\mu=1$ .

Магнитная индукция в вакууме

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$$

$\mu_0$  - *магнитная постоянная*,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$$

$$[H] = \text{А/м}$$



## Закон Био-Савара-Лапласа (1820)

определяет магнитную индукцию, создаваемую элементом тока в точке пространства в вакууме.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

$Idl$  - элемент тока

*Принцип суперпозиции магнитных полей:*

*Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.*

Индукция магнитного поля прямого проводника с током в вакууме на расстоянии  $R$ :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Магнитное поле на оси кругового тока радиуса  $R$  в среде с магнитной проницаемостью  $\mu$ :

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{2R}$$

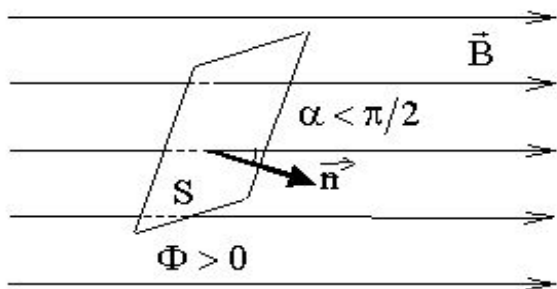
Магнитное поле бесконечного соленоида в веществе :

$$B = \mu \mu_0 n I$$

$n$  – число витков на единицу длины

## Поток вектора магнитной индукции $\vec{B}$ (магнитный поток)

Для однородного поля поток вектора  $\vec{B}$  через плоскую площадку, натянутую на контур  $L$ , равен скалярному произведению векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{S}$ , где вектор  $\vec{S}$  численно равен площади, а по направлению совпадает с вектором нормали к площадке.



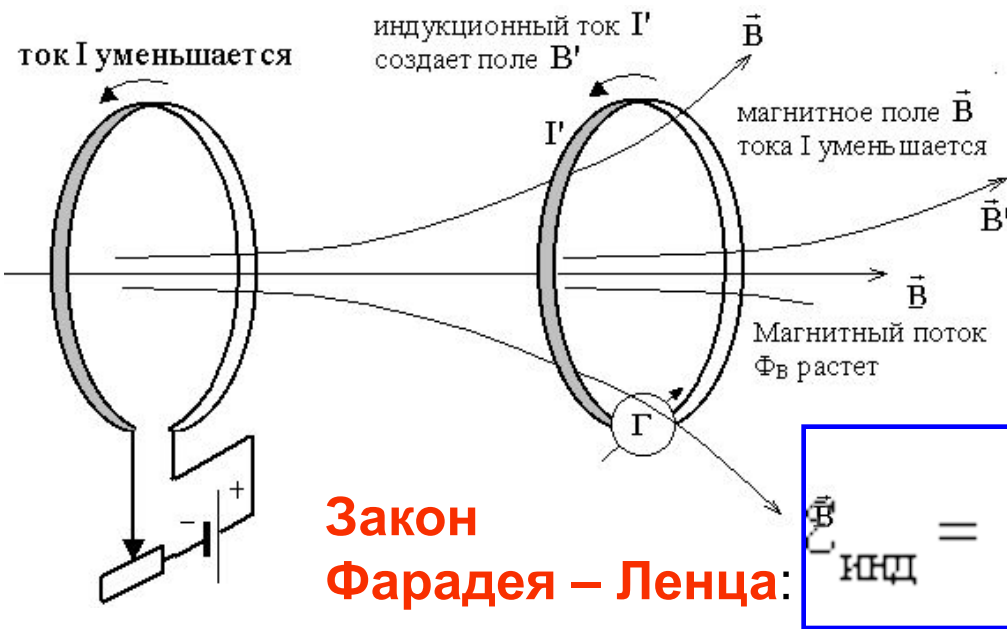
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\vec{n}\vec{B}) = B_n S,$$

$$B_n = B \cos(\vec{n}\vec{B})$$

Направление нормали и положительное направление обхода контура связаны правилом правого винта.

В СИ единица магнитного потока - **вебер**.  $1\text{Вб} = 1\text{Тл} \times 1\text{м}^2$

$\Phi$  через произвольную поверхность в магнитном поле  $\sim$  числу силовых линий, проходящих через поверхность  $S$  (охватываемых контуром  $L$ ).



**Закон Фарадея – Ленца:**

$$\mathcal{E}_{\text{Инд}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Явление электромагнитной индукции** состоит в том, что любое изменение магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего замкнутый проводящий контур, вызывает появление **тока** в контуре (М.Фарадей, 1831).

**ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока, взятой с обратным знаком.**

Правило Ленца (1833): *Индукционный ток имеет такое направление, чтобы создаваемое им магнитное поле препятствовало изменению магнитного потока.*

**Заряд, протекающий в контуре при изменении магнитного потока:**

$$\left. \begin{aligned} |\varepsilon_{\text{ИЭД}}| &= IR = \frac{\Delta Q}{\Delta t} R \\ |\varepsilon_{\text{ИЭД}}| &= \frac{\Delta \Psi}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$I = \frac{\Delta \Psi}{R \Delta t}$$

$$\Delta Q = \frac{|\Delta \Psi|}{R}$$

$R$  – сопротивление контура

**Самоиндукция** - частный случай электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре.

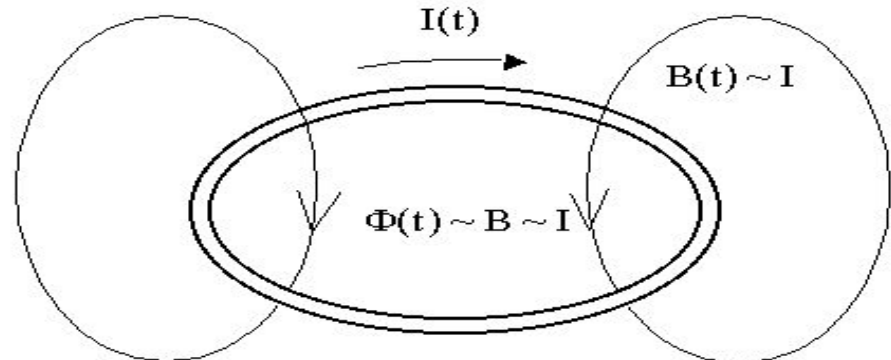
Контур с током  $I$  создает  $B \sim I$ , магнитный поток  $\Phi$  через контур пропорционален току  $I$ .

$$\Phi = LI$$

$L$  - **Коэффициент самоиндукции** или **индуктивность контура**

Если  $L = \text{const}$ , то

$$\varepsilon_{\text{сам}} = -L \frac{dI}{dt}$$



в СИ:  $[L] = \text{Гн (генри)}$ ,  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}$

Индуктивность соленоида в среде:

$$L = \mu \mu_0 n^2 V$$

$\mu$  - магнитная проницаемость среды  
 $n$  - число витков на единицу длины

## В катушке, по которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии

Запас энергии магнитного поля в соленоиде

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Для соленоида в вакууме:  $B = \mu_0 n I$ ,  $\Rightarrow I = B/(\mu_0 n)$ ,  $L = \mu_0 n^2 V$ .

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu_0 n^2 V}{2} \left( \frac{B}{\mu_0 n} \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} V$$

- энергия магнитного поля в вакууме.

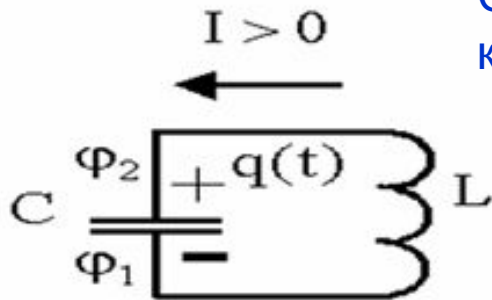
$B$  и  $V$  – индукция и объем магнитного поля.

**Плотность энергии** (энергия в единице объема) магнитного поля в вакууме (энергия, запасенная в единице объема поля):

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right)$$

# Свободные электромагнитные колебания

Свободные гармоническое колебания происходят в колебательном контуре по закону:



$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

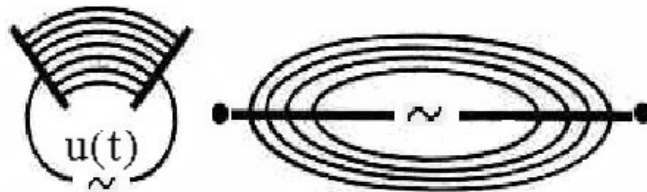
с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

Полная электромагнитная энергия в идеальном колебательном контуре в произвольный момент времени остается постоянной:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

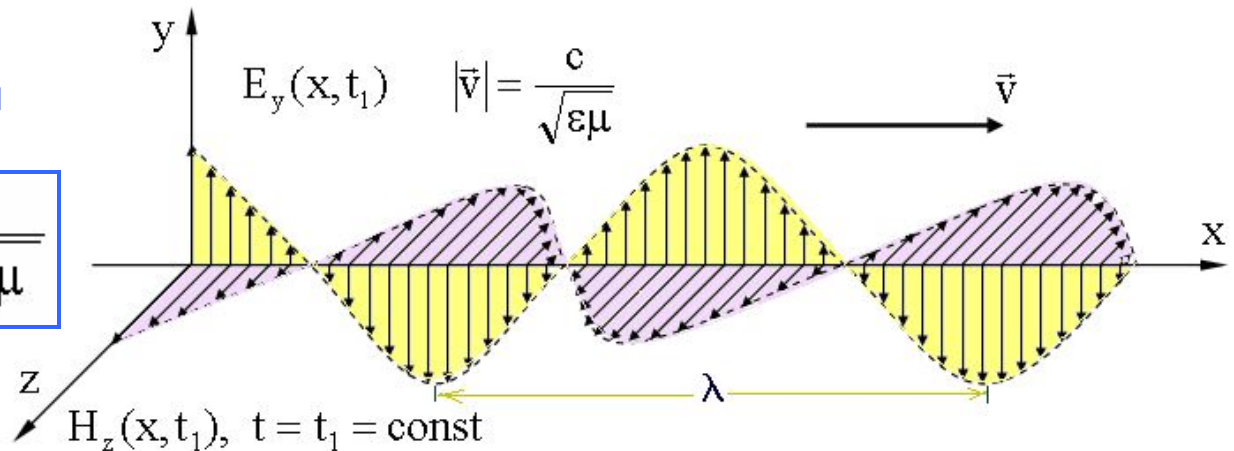
Если колебательный контур сделать открытым, то часть энергии колебаний будет излучаться в окружающее пространство в виде электромагнитных волн (в частности, радиоволн).



Пространственная структура поперечной электромагнитной волны

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu}}$$

в вакууме ( $\epsilon = \mu = 1$ ):  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$



# Шкала электромагнитных волн

Электромагнитные волны отличаются друг от друга по способам их генерации, регистрации и свойствам. Они условно делятся на несколько видов.

$$\lambda = c/\nu$$

Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц	Источник излучения
<u>Радиоволны</u>	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Колебательный контур Вибратор Герца Массовый излучатель Ламповый генератор
<u>Световые волны:</u>			
инфракрасное излучение	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$	Лампы Лазеры
<u>видимый свет</u>	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	
<u>Рентгеновское излучение</u>	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Трубки Рентгена
<u>γ-Излучение</u>	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Радиоактивный распад Ядерные процессы Космические процессы



возрастает



возрастает