

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

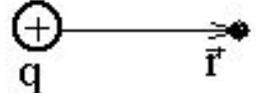
Напряженностью электрического поля называют векторную физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.

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

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:

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

Модуль напряженности:

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

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 ϵ раз

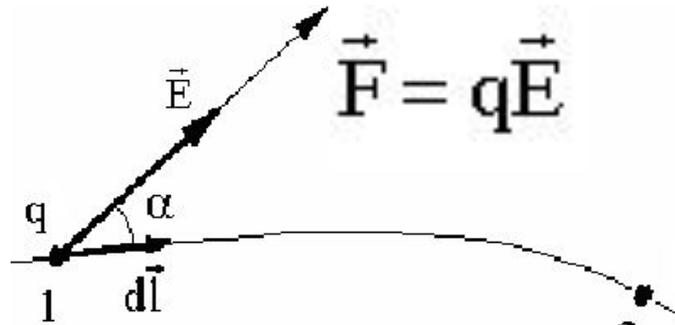
$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

ϵ - 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

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

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

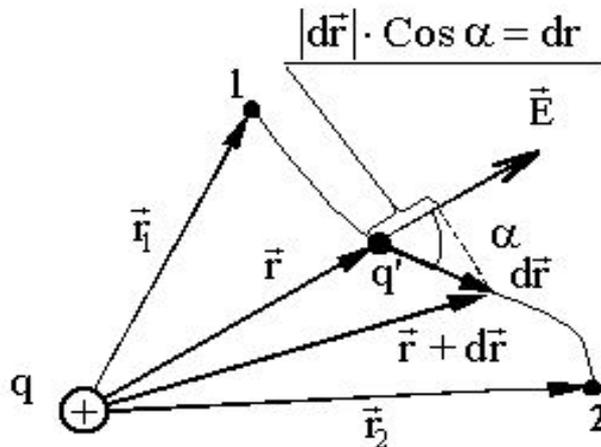
$$A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 q\vec{E} d\vec{l} =$$

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

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_{π} .

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

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' .

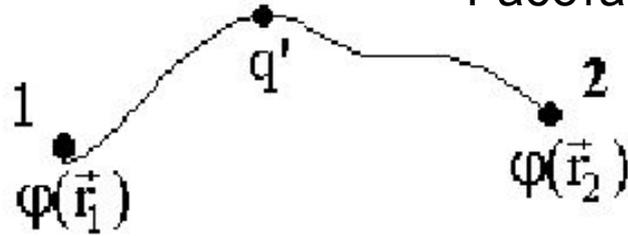
φ - не зависит от q' ,

φ - 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:

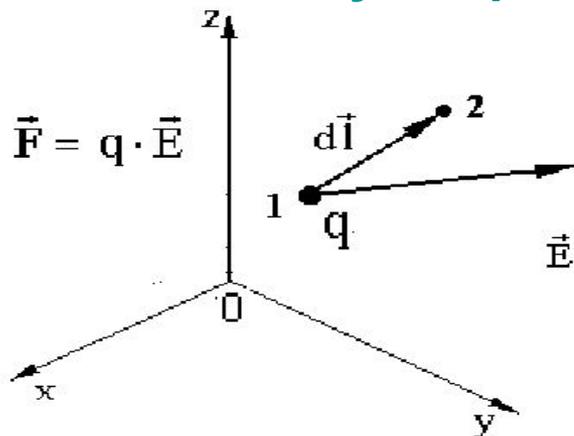
$$W_{\pi} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

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

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

$$\vec{E} \quad dA_{12} = \vec{F} \cdot d\vec{l} \cdot \cos \alpha = q \cdot E \cdot \cos \alpha \cdot dl = qE_l dl \quad E_l = E \cos \alpha$$

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:

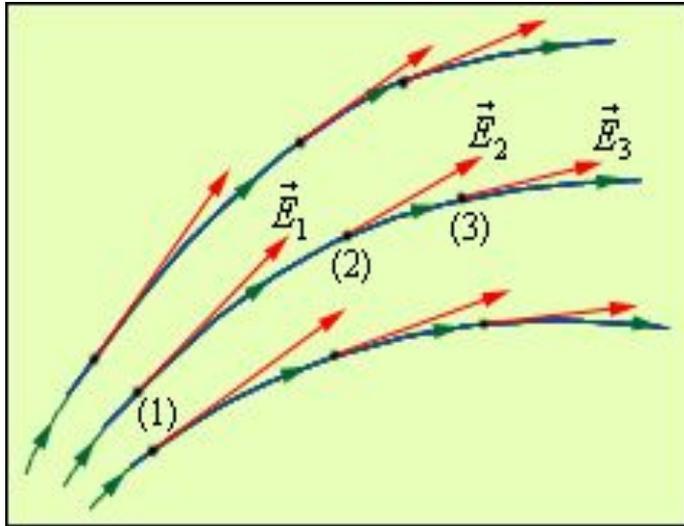
$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi$$

\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.*

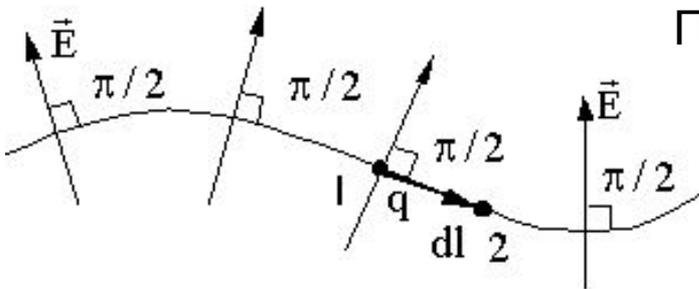
Эквипотенциальная поверхность - поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал

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

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

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

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

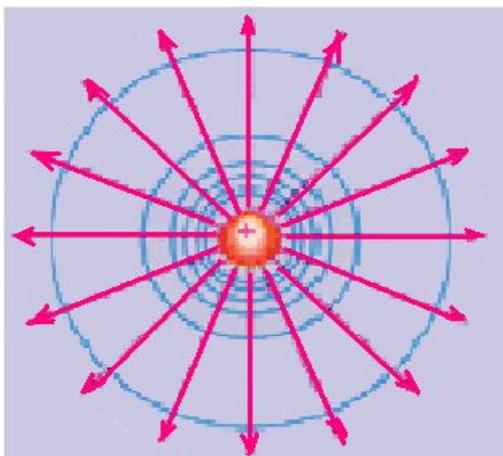


Правила построения эквипотенциальных поверхностей :

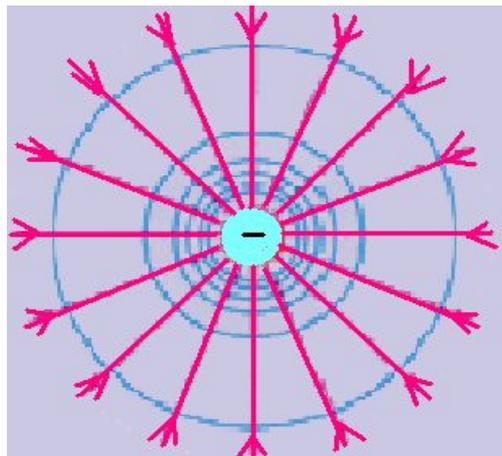
- ✦ Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны к линиям напряженности.
- ✦ Разность потенциалов для двух соседних эквипотенциальных поверхностей одинакова
- ✦ Эквипотенциальные поверхности расположены гуще там, где напряженность поля больше

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

1) Электрического поля точечного заряда

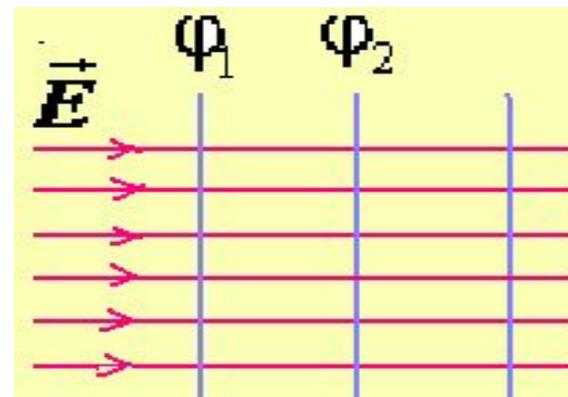


положительного
заряда



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

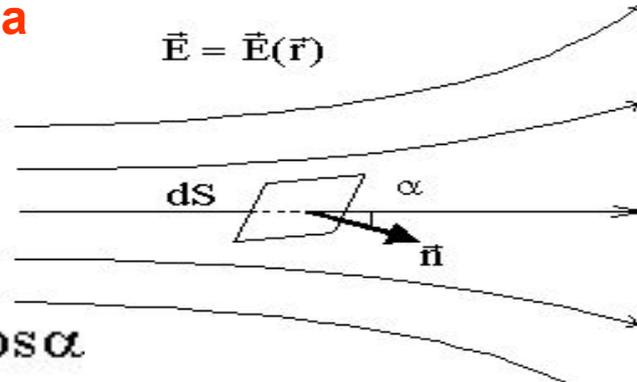
Поток вектора напряженности электрического поля

скалярная физическая величина

dΦ через

бесконечно малую площадку

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

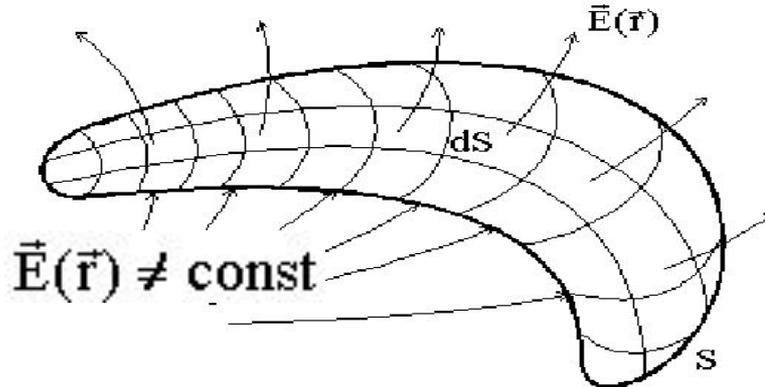


вектор
внешней
нормали к
поверхности
S.

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

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

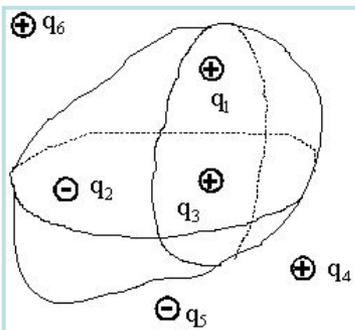
Теорема Остроградского-Гаусса:

Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность = алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности, деленной на ε₀ :

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

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

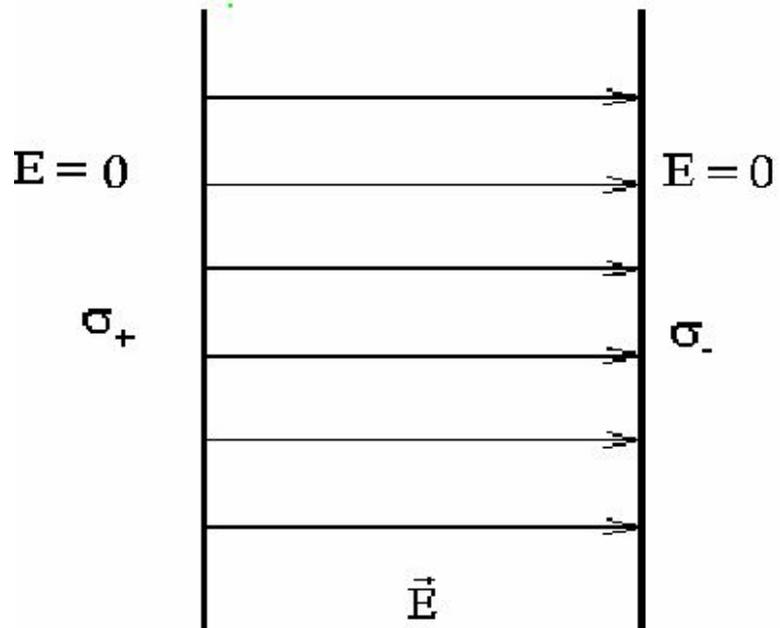
Для равномерно заряженной бесконечной плоскости в вакууме

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

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

σ - поверхностная плотность заряда

Для поля между разноименно заряженными пластинами в вакууме



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

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

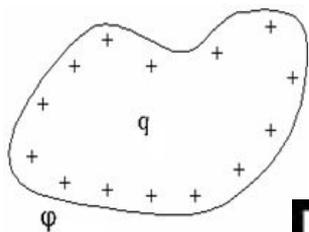
Проводники - вещества, проводящие электрический ток:

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.

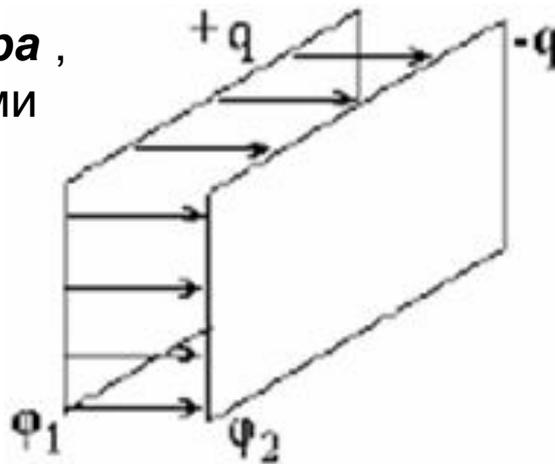
$$[C] = \text{Кл} / \text{В} = \text{Ф}$$

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:

$$q_+ = q_- = q$$



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 конденсатора:

Электроемкость 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: $\phi_1 - \phi_2 = Ed$,
 $E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$
 σ - 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 плотностью энергии**

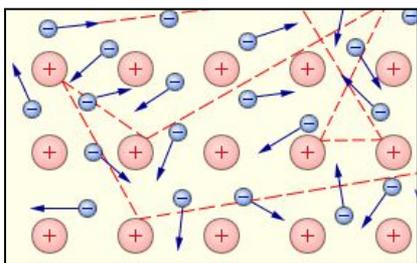
электростатического поля (энергия в единице объема).

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

Электрический ток. Сила и плотность тока.

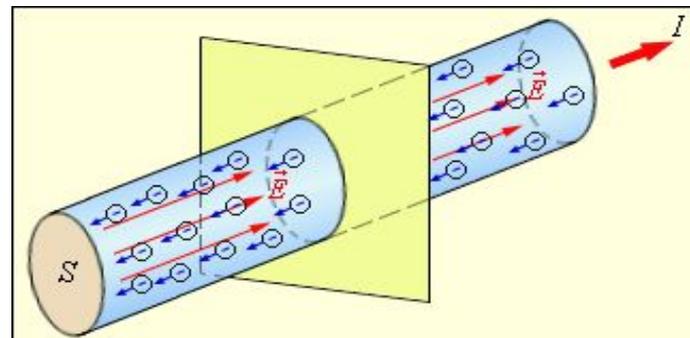
В металлах Электроны участвуют в **тепловом хаотическом движении** со средней скоростью

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



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

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



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**.

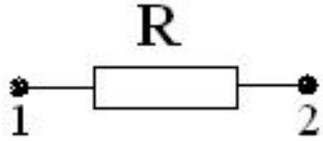
$$[I] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$$

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 $\varphi_1 - \varphi_2$ 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 :

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

ρ - удельное сопротивление

ρ проводника зависит только от его материала и температуры.

Для чистых металлов

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

ρ_0 - удельное сопротивление проводника при $t = 0^\circ\text{C}$
 t - температура проводника по шкале Цельсия.

α - 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: $j = I/S$.

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).

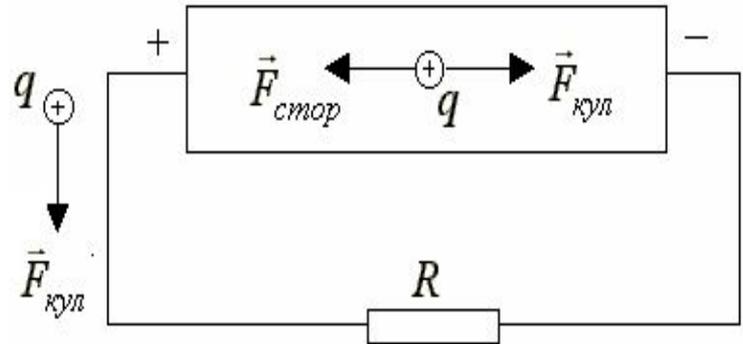
Для поддержания **постоянного замкнутого тока** нужно компенсировать зарядам потери энергии на торможение, совершая над ними работу.

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.

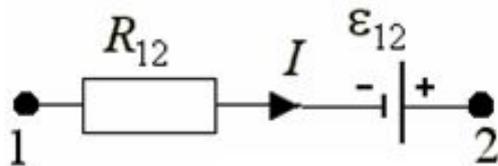
Участок цепи, в котором действуют сторонние силы - **источник тока**

Характеристики источника тока: Внутреннее сопротивление r

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

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

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



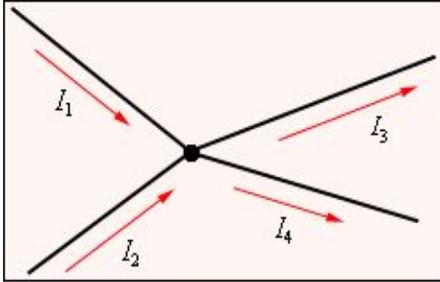
Закон Ома для неоднородного участка цепи:

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

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

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей (1847 год)

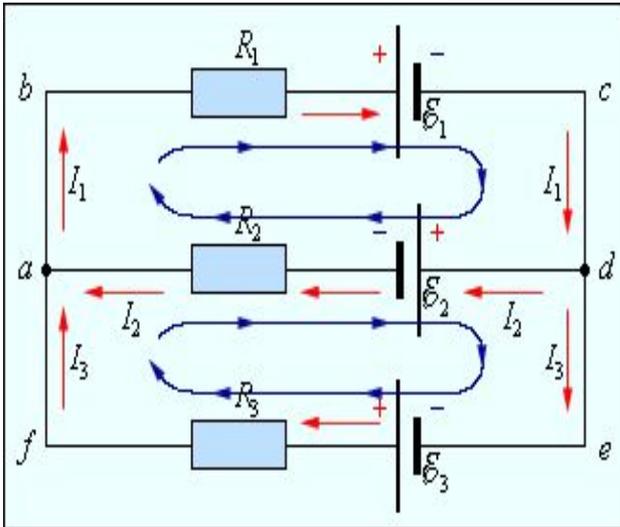
Первое правило Кирхгофа: Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю: $I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$.



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 :

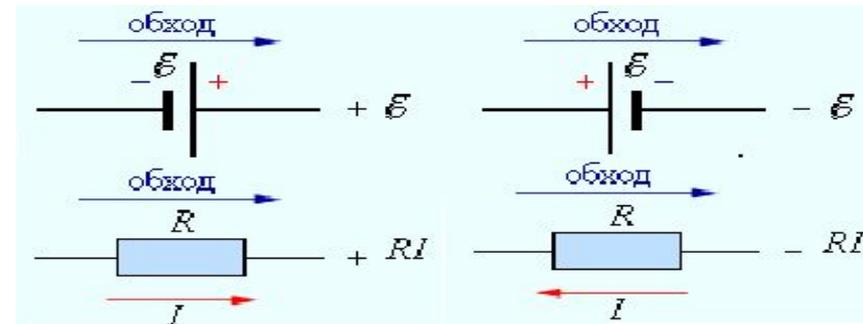
Алгебраическая сумма произведений сопротивления каждого из участков любого замкнутого контура на силу тока на этом участке равна алгебраической сумме ЭДС вдоль этого контура.

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

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

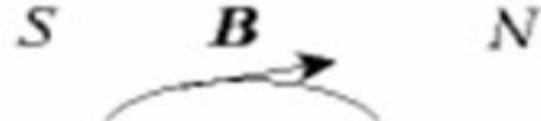
Электрическое поле	Магнитное поле
Источники поля	
Электрически заряженные тела	Движущиеся электрически заряженные тела (эл. токи)
Индикаторы поля	
Пробный заряд	Замкнутый контур с током $I \ell$ - элемент тока
Опытные факты	
Опыты Кулона по взаимодействию электрически заряженных тел	Опыты Ампера по взаимодействию 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)

З-н Кулона

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

З-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 E.</p> <p>Величина: $E = \frac{F}{q}$.</p> <p>Направление: $E \uparrow \uparrow F$</p>	<p>Вектор индукции магнитного поля \vec{B}.</p> <p>Величина: $B = \frac{F}{I \cdot l}$</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: $\varepsilon \rightarrow \infty$. Диэлектрики. Электреты: $\varepsilon \gg 1$. сегнетоэлектрики: $\varepsilon > 1$</p>	$\mu = \frac{B}{B_0}$ <p>Ферромагнетики: $\mu \gg 1$. Диамагнетики: $\mu < 1$. Парамагнетики: $\mu > 1$</p>

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

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

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 μ - магнитная проницаемость изотропной среды.

В вакууме $\mu=1$.

Магнитная индукция в вакууме

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

μ_0 - магнитная постоянная,

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

$$[\vec{H}] = \text{А/м}$$

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 μ :

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

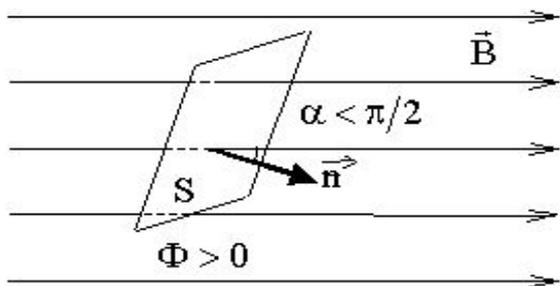
Магнитное поле бесконечного соленоида в веществе :

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

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.



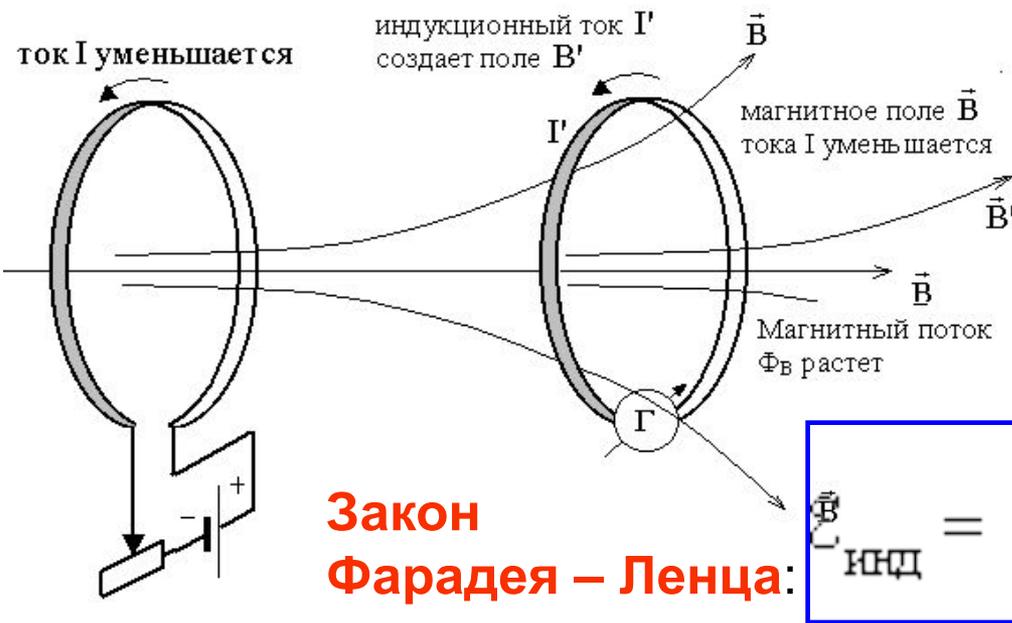
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\vec{n}\vec{B}) = B_n S,$$

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

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

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

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



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

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

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

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.

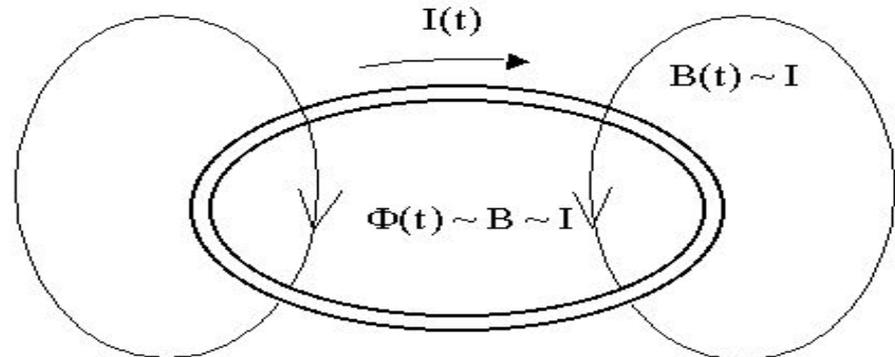
Контур с током I создает $B \sim I$, магнитный поток Φ через контур пропорционален току I .

$$\Phi = LI$$

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:

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

μ - 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.

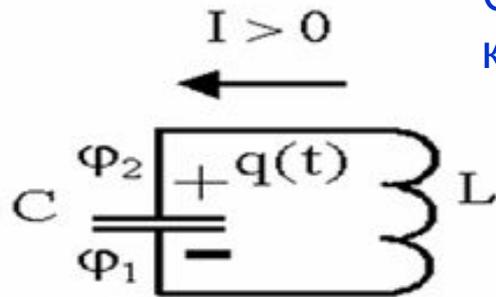
B и V – индукция и объем магнитного поля.

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:



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

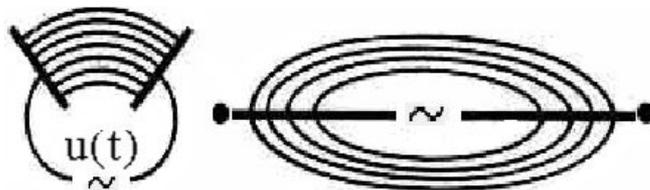
с периодом

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

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

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

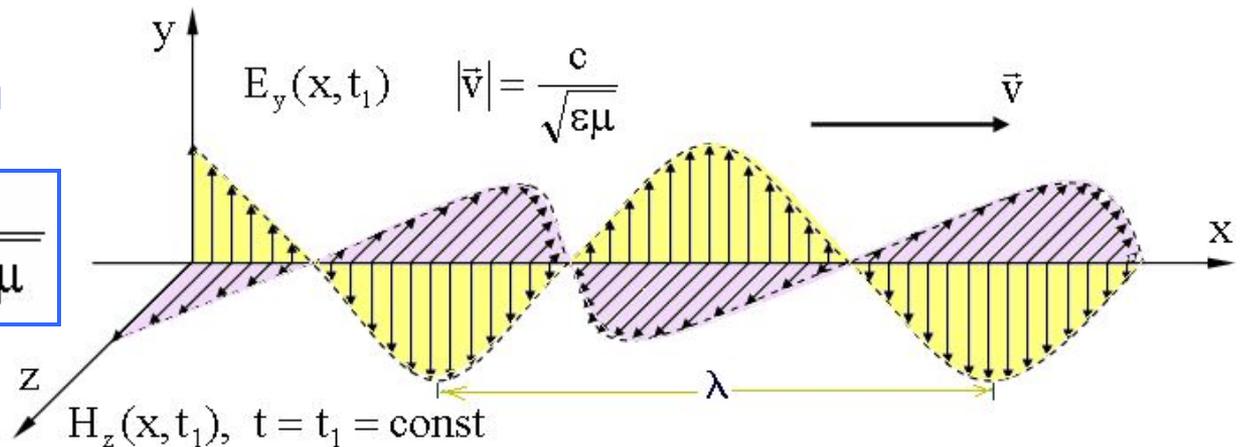
Если колебательный контур сделать открытым, то часть энергии колебаний будет излучаться в окружающее пространство в виде электромагнитных волн (в частности, радиоволн).



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