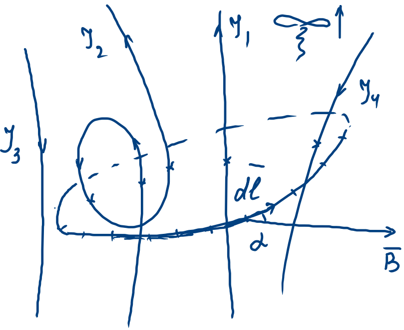
Закон полного тока

(Теорема о циркуляции вектора магнитной индукция)



$(\bar B d\bar l) = B \cdot dl \cos\alpha \qquad \alpha = (\widehat{d\bar l, \bar B}) \qquad \mu = 1$

$\sum\limits_L (\bar B_i d\bar l_i) \Rightarrow \oint (\bar B d\bar l) = \oint B_l dl$

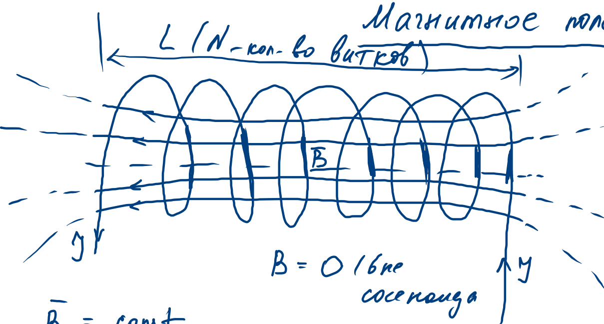
$B_l = B\cos\alpha$

$\oint\limits_L (\bar B d\bar l)$ – циркуляция вектора магнитной индукции

$$\oint\limits_L (\bar B d\bar l) = \mu_0 \sum J_i = +J_1 + J_2 + J_2 - J_2 - J_4 - \cancel{J_3}$$

Правило буравчика связывает направление обхода контура и направление тока

Магнитное поле в соленоиде



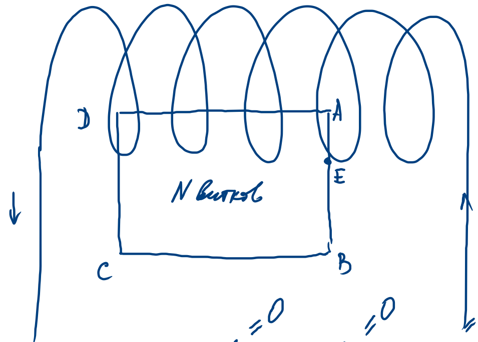
$\bar{B} = const$

$\bar{B} = ?$

$$\boxed{B = \mu_0 n Y}$$

$n = \frac{N_0}{L}$ - концентрация витков

N_0 - кол-во витков общее



$$\oint\limits_{ABCDA} (\bar{B} d\bar{l}) = \mu_0 N Y = \overset{=0}{\int\limits_{AB}(\bar{B} d\bar{l})} + \overset{=0}{\int\limits_{BC}(\bar{B} d\bar{l})} + \overset{=0}{\int\limits_{CD}(\bar{B} d\bar{l})} + \int\limits_{DA}(\bar{B} d\bar{l})$$

$$\underset{CD}{\underset{\equiv}{AB}} = AE + EB$$

$(\bar{B} d\bar{l})$ на $AE = 0$ $\quad \bar{B} \perp d\bar{l}$

$\alpha = 90°$

$(\bar{B} d\bar{l})$ на $EB = 0$; $\quad \bar{B} = 0$

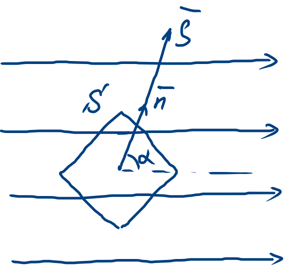
$\alpha = 0^\circ \qquad ДА = \ell$

$$\oint\limits_{ABCDA} (\bar{B} d\bar{\ell}) = \int\limits_{DA} (\bar{B} d\bar{\ell}) = B\,ДА \cos\alpha = B\ell = \mu_0 N \cdot I$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \; ; \qquad \frac{N}{\ell} = \frac{N_0}{L} = n$$

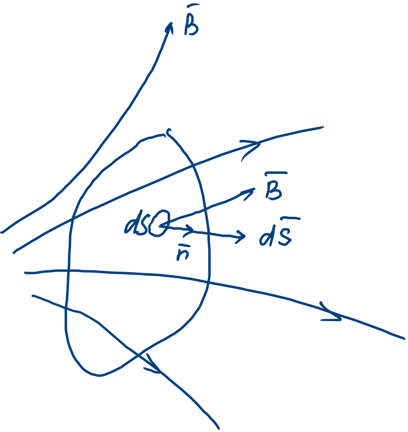
$$B = \mu_0 n I$$

Поток вектора магнитной индукции



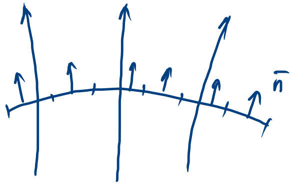
$\bar{B} = const \qquad \bar{S} = S \cdot \bar{n} \; ; \; |\bar{n}| = 1$

$\Phi_B = (\bar{B}\bar{S}) = BS\cos\alpha$ – поток вектора магнитной индукции



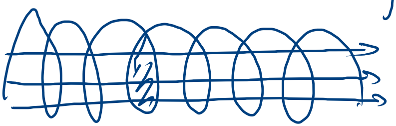
Магн. поле неоднородное, произвольная поверхность

$$d\Phi_B = (\bar B d\bar S) \Rightarrow \Phi_B = \int\limits_S (\bar B d\bar S)$$



нормали должны быть направлены в одну сторону "наружу"

соленоид

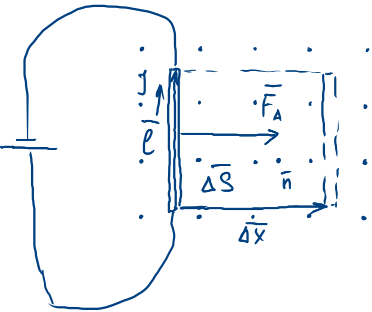


$$\Phi_B = BS = \mu_0 n J S; \quad n = \frac{N_0}{L} = \frac{N}{l}$$

Механическая работа в магнитном поле

(Механическая работа по перемещению проводника с током или контура с током в магнитном поле)

$$\alpha = (\widehat{d\bar{l}, \bar{B}}) = 90^\circ$$



$$\bar{B} = const \qquad \bar{F}_A = I[\bar{l}\,\bar{B}] = IlB\sin\alpha = IlB$$

$$dA = (\bar{F}_A \Delta\bar{x}) = F_A \Delta x \cos\beta = F \cdot \Delta x$$

$$\beta = (\widehat{F_A, \Delta x}) = 0$$

$$dA = IlB\Delta x = IBl\Delta x = IB\Delta S = I\Delta\Phi_B = IB\Delta S\cos\gamma$$

$$l\Delta x = \Delta S \qquad \gamma = (\widehat{\bar{B}\,\bar{n}}) = 0^\circ$$

$$dA = I\Delta\Phi_B$$

Электромагнитная индукция

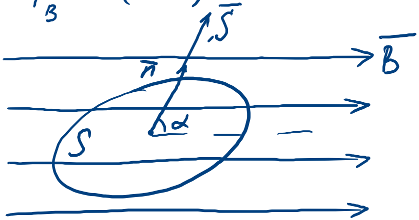
Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея

Электрический ток в проводнике создает вокруг проводника магнитное поле. Можно ли с помощью магнитного поля создать эл. ток в проводнике. Эта задача была решена в 1831 г. английским физиком М. Фарадеем. Он открыл <u>явление электромагнитной индукции</u>. Оно заключается в следующем.

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, охватываемую этим контуром, возникает электрический ток, который получил название <u>индукционного тока</u>.

Способ изменения магнитного потока может быть любым.

$\Phi_B = (\bar{B}\bar{S}) = BS\cos\alpha$ ← Согласно формуле Способа три!



$\bar{S} = S\bar{n}$; $|\bar{n}| = 1$

$\alpha = (\bar{B}, \hat{\bar{n}})$ или $(\bar{B}\hat{\bar{S}})$

магнитный поток можно менять: 1. Изменяя магн. поле B;

2. изменяя площадь контура S;

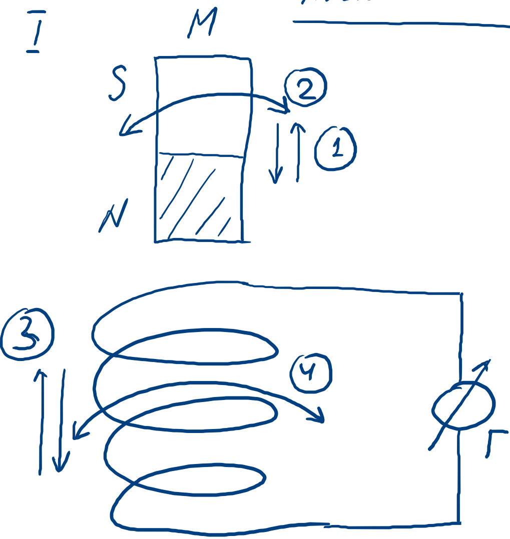
3. изменяя угол α, т. е. вращая контур.

Величина индукционного тока не зависит от способа изменения магнитного потока через контур.

Величина индукционного тока определяется скоростью изменения магнитного потока через проводящий контур.

Классические опыты М. Фарадея

I

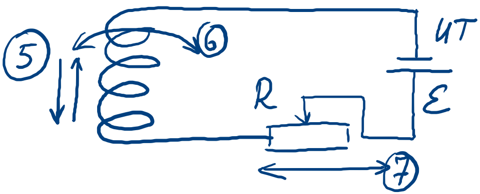


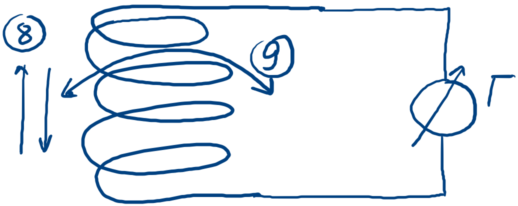
Магнитное поле создано магнитом М. Замкнутый контур - катушка из провода, подключен гальванометр.

1. Двигаем магнит вовнутрь катушки или обратно
2. Вращаем магнит
3. Двигаем катушку - контур
4. Вращаем катушку - контур

Всякий раз гальванометр показывает наличие электр. тока.

II





Источник ток ИТ создает ток в верхней катушке и вокруг катушке создано магнитное поле, в котором находится нижняя катушка.

5. Двигаем верхнюю катушку, источник магнитного поля
6. Вращаем верхнюю катушку
7. Меняем ток в верхней катушке с помощью реостата R. Меняется магнитное поле.
8. Двигаем нижнюю катушку.
9. Вращаем катушку

Из анализа результатов опытов. Величина индукционного тока в контуре - катушке тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток (быстрее движется или вращается катушка или магнит или меняется ток в катушке, создающей магнитное поле).
Явление электромагнитной индукции имеет большое теоретическое значение (взаимосвязь электрических и магнитных явлений) и экспериментальное значение (получение с помощью магнитного поля электрического тока).

Закон Фарадея

М. Фарадей, анализируя результаты опытов, установил количественный закон электромагнитной индукции. При изменении магнитного потока через контур в контуре возникает индукционный ток, возникновение которого указывает на наличие в контуре, электрической цепи, электродвижущей силы электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i$, величина которой определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

В системе единиц СИ коэффициент пропорциональности равен 1.

Знак "–" указывает на направление индукционного тока в контуре (знак Э.Д.С) при изменении магнитного потока.

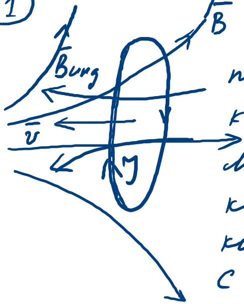
Знак "–" - математическое выражение правила Ленца, которое определяет направление индукционного тока в контуре, замкнутой электрической цепи.

Правило Ленца - индукционный электрический ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего этот индукционный ток.

Важно: внешнее магнитное поле $\overline{B}$ и магн. поле от индук. тока $\overline{B}_{инд}$ складываются согласно принципу суперпозиции

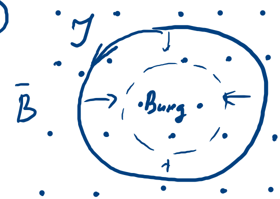
$$\overline{B}_{рез} = \overline{B} + \overline{B}_{инд}$$

① Рассмотрим пару примеров.



В неоднородном магн. поле $\bar{B}$ двигается контур, как показано на рисунке. Магнитный поток через контур растёт, т.к. контур двигается из области с меньшим $\bar{B}$ в область с большим $\bar{B}$: $\Phi_B = BS\cos\alpha$.

В контуре возникает индукционный ток J и вокруг контура ток создает дополнительное магнитное поле $\bar{B}_{инд}$. $\bar{B}_{рез} = \bar{B} + \bar{B}_{доп}$. Магнитный поток "не должен расти", значит $\bar{B}_{инд} \downarrow\uparrow \bar{B}$. Направления тока J и $\bar{B}_{инд}$ связаны правилом буравчика

② 

Внешнее магнитное поле $\bar{B} \perp$ плоскости экрана.

Контур, кольцо, сжимается.

Площадь контура уменьшается и уменьшается магн. поток через контур. Индукционный ток в контуре создает вокруг магн. поле $\bar{B}_{инд}$.

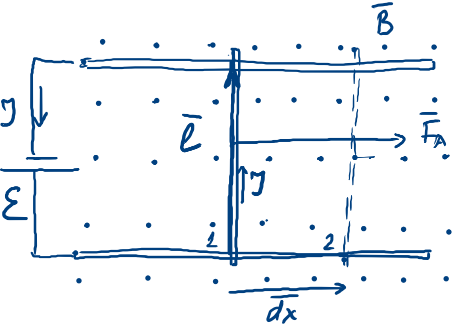
$\Phi_B = B_p \cdot S \cdot \cos\alpha$; $\bar{B}_p = \bar{B} + \bar{B}_{инд}$

Таким образом $\bar{B}_{инд} \uparrow\uparrow \bar{B}$. $\bar{B}_{инд}$ направлено к нам. Применяем правило буравчика и находим направление индук. тока J.

Вывод закона Фарадея

Воспользуемся законом сохранение энергии.

$\bar{B} = const$, внешнее магнитное поле, силовые линии перпендикулярны экрану.



Контур состоит ~~из двух~~ неподвижных параллельных проводников; подводящих проводов с источником тока с Э.Д.С. $\mathcal{E}$ и свободного прямолинейного проводника $\bar{l}$, который лежит на параллельных проводниках-рельсах и может передвигаться свободно, например, по действием сила Ампера $\bar{F}_A$.

Проводник $\bar{l}$ перемещается под действием силы Ампера $\bar{F}_A$ на $\bar{dx}$, площадь контура растет, изменяется магн. поток через контур, электрическую цепь, а сила Ампера совершает работу.

Сила Ампера совершает работу $dA = I\,d\Phi$, работа совершается за счет энергии источника тока. Кроме того, ток, протекающий по цепи, нагревает проводники согласно закону Джоуля - Ленца за счет энергии источника тока. dt - время перемещения.

Таким образом

$$\mathcal{E} I\,dt = I^2 R\,dt + I\,d\Phi$$

R - электрическое сопротивление контура

$$\mathcal{E}\,dt = IR\,dt + d\Phi$$

$$I = \frac{\mathcal{E}\,dt - d\Phi}{R\,dt} = \frac{\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R} \quad и \quad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Ток в цепи складывается из тока от источника тока и индукционного тока.

Закон Фарадея: $\mathcal{E}_i = -\dfrac{d\Phi}{dt}$

Э.Д.С. индукции, $\mathcal{E}_i$, в контуре численно равняется и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. $\mathcal{E}_i$ не зависит от способа изменения магнитного потока.

$$[\mathcal{E}_i] = В;\quad \left[\frac{d\Phi}{dt}\right] = \frac{Тл \cdot м^2}{с} = \frac{Н \cdot м^2}{А \cdot м \cdot с} = \frac{Дж}{А \cdot с} = \frac{А \cdot В \cdot с}{А \cdot с} = В$$

Природа Э.Д.С. индукции

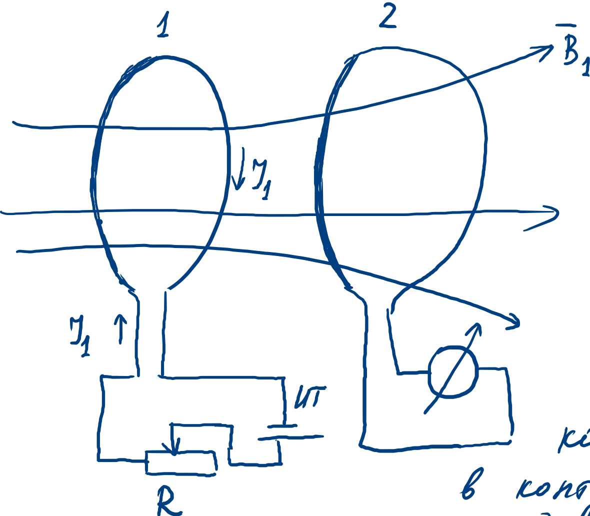
$$\Phi_B = (\bar{B}\bar{S}) = BS\cos\alpha \quad \text{или} \quad \Phi_B = \int_S (\bar{B}\, d\bar{S})$$

1. Если меняется площадь контура (S меняется) или контур вращается (α меняется), то при этом есть перемещение контура или частей контура.
Электрические заряды, положительные и отрицательные, двигаются также вместе с движущимися частями контура в магнитном поле и на заряды действует сила Лоренца, которая приводит их в движение (положит. и отриц. заряды двигаются в противоположные стороны) в контуре; происходит разделение эл. зарядов. Возникает Э.Д.С. индукции и индукционный ток.

2. Когда меняется магнитное поле, $\vec{B}$ меняется, а контур неподвижен, заряды в контуре не движаются с контуром и сила Лоренца не действует на заряды. Но индукционный ток возникает. Какова его природа, какова причина?

Максвелл предположил, что всякое изменение магнитного поля возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, оно является вихревым в отличие от потенциального электростатического поля вокруг зарядов. Силовые линии такого поля замкнуты. Электрическое поле вызывает движение зарядов в контуре и возникает индукционный ток.

Взаимная индукция



Имеется два контура 1 и 2. В контуре 1 протекает ток I_1, величину которого можно менять с помощью реостата R. ИТ, источник тока, создает ток в контуре 1. Ток в первом контуре создаёт магнитное поле $\bar{B}_1$, в котором находится контур 2. При изменении тока I_1 в контуре 1 меняется магнитное поле $\bar{B}_1$. И меняется магнитный поток через поверхность второго контура. Таким образом, в контуре 2 возникает э.д.с. индукции $\mathcal{E}_{i2}$.

Магнитный поток через второй контур 2 от магнитного поля $\bar{B}_1$, созданного током в первом контуре J_1, равен

$$\Phi_{21} = \int_{S_2} (\bar{B}_1 d\bar{S}_2) \sim \bar{B}_1, \text{ а } \bar{B}_1 \sim J_1.$$ Можно записать, что

$$\Phi_{21} = L_{21} J_1 \;;\; L_{21}$$ – коэффициент пропорциональности.

Э.Д.С. индукции во втором контуре $\mathcal{E}_{i2} = -\dfrac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21}\dfrac{dJ_1}{dt}$

L_{21} – коэффициент взаимной индукции или взаимная индуктивность контуров. Она определяется геометрией контуров и их взаимным расположением.

$$\boxed{\mathcal{E}_{i2} = -L_{21}\frac{dJ_1}{dt}}$$

Верно и обратное: ток I_2 во втором контуре при его изменении будет приводить к появлению тока I_1 в первом контуре и $\mathcal{E}_{i1} = -L_{12}\frac{dI_2}{dt}$

При этом $L_{21} = L_{12} = L$

$[L] = $ Гн Рассматриваемое явление носит название явления **взаимной индукции**.

Направление индукционного тока определяют по правилу Ленца.

При этом, например, в первом контуре

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_{i1}}{R_1} = -\frac{L}{R_1}\frac{dI_2}{dt} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}_{i2}}{R_2} = -\frac{L}{R_2}\frac{dI_1}{dt}$$

R_1 и R_2 – сопротивление контуров.

Самоиндукция, индуктивность контура

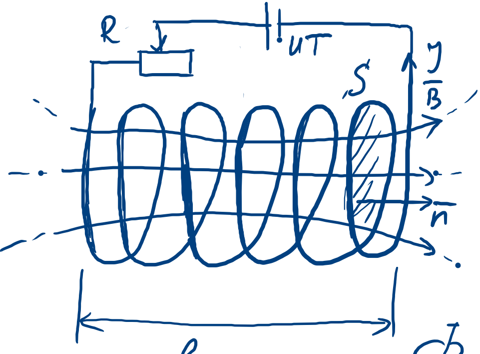
В контуре ток создает магн. поле, в котором и находится сам контур. Если менять ток в контуре, то будет меняться магнитный поток через контур и в контуре согласно закону эл. магн. индукции будет возникать индукционный ток. Это явление носит название "явление самоиндукции".

$\Phi = LJ$; L - индуктивность контура.

Э.Д.С. индукции в контуре $\mathcal{E}_i = -L\frac{dJ}{dt}$

L - зависит от формы контура и магнитной проницаемости среды. Направление индукционного тока определяют согласно правилу Ленца.

Индуктивность соленоида, L



$|\bar{n}| = 1$, $\bar{n}$ - вектор нормали

S – площадь поперечного сечения соленоида, площадь витка. N – общее число витков.

$n = \dfrac{N}{l}$ – число витков на единицу длины соленоида, концентрация витков

$\bar{B} = \text{const}$ внутри соленоида

Соленоид – многовитковый контур

Магнитный поток через соленоид

$$\Phi = BSN = \mu_0 \mu n J S N = L J$$

Здесь $B = \mu_0 \mu n J$ Таким образом,

$$L = \mu_0 \mu n S N = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l}.$$

Если $\mu = 1$ (нет сердечника магнитного в соленоиде), то

$$L = \mu_0 \frac{n^2 S}{l}$$

Электромагнитные поля. Теория Максвелла

1. Вихревое электрическое поле

Закон Фарадея $\quad \mathcal{E}_i = -\dfrac{d\Phi}{dt}$!

$\bar{B} = f(x, y, z, t)$ $\qquad \mathcal{E}_i = -\dfrac{\partial \Phi}{\partial t}$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L (\bar{E}_B d\bar{l}) = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad \Phi = \int_S (\bar{B} d\bar{s})$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L (\bar{E}_B d\bar{l}) = -\frac{d}{dt}\int_S (\bar{B} d\bar{s})$$

$$\underline{\oint_L (\bar{E}_B d\bar{l})} = -\int_S \left(\frac{d\bar{B}}{dt} \cdot d\bar{s}\right)$$

Электрическое поле:

Вихревое эл. поле $- \bar{E}_B$

Эл. поле, созданное зарядами $- \bar{E}_q$

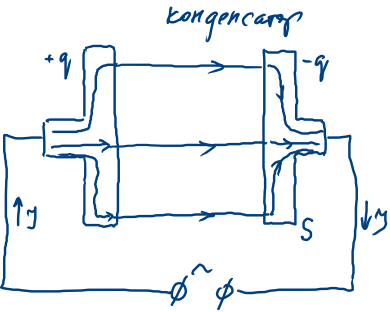
$$\bar{E} = \bar{E}_B + \bar{E}_q$$

$$\oint_L (\bar{E}_q d\bar{l}) = 0$$

$$\oint_L (\bar{E}_B d\bar{l}) + \oint_L (\bar{E}_q d\bar{l}) = -\int_S \left(\frac{d\bar{B}}{dt} \cdot d\bar{s}\right)$$

$$\oint_L (\bar{E} d\bar{l}) = -\int_S \left(\frac{d\bar{B}}{dt} d\bar{s}\right) \quad ; \quad \bar{E} = \bar{E}_B + \bar{E}_q$$

2. Ток смещения (меняющееся электрическое поле)



J – ток проводимости

σ – поверхностная плотность электрических зарядов

$J_{см}$ – ток смещения

$$J = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\int_S \sigma\, dS = \int_S \frac{d\sigma}{dt}\, dS = \int_S \frac{d\bar{D}}{dt}\, d\bar{S}$$

$\bar{D}$ – электрическая индукция $\quad \bar{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \bar{E}$

$D = \sigma$

$$J = \int_S \left(\frac{d\bar{D}}{dt}\, d\bar{S}\right) \qquad J = \int_S (\bar{j}\, d\bar{S}) \; ; \; J = J_{см}$$

$$\bar{j}_{см} = \frac{d\bar{D}}{dt} \Rightarrow \bar{j}_{см} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

Вектор плотности тока смещения $\bar{j}_{см}$ совпадает с вектором $\frac{d\bar{D}}{dt}$

$$\bar{j}_{полн} = \bar{j} + \bar{j}_{см} = \bar{j} + \frac{d\bar{D}}{dt}$$

Теорема о циркуляции вектора $\bar{B}$, будем рассматривать

напряженность $\bar{H}$ магн. поля $\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}$

$$\oint_L (\bar{H} d\bar{l}) = \iint_S \left(\bar{j} + \frac{d\bar{D}}{dt}\right) d\bar{S}$$

Второе ур-е Максвелла

Система ур-й Максвелла

1. $\oint\limits_L (\bar{E}\,d\bar{l}) = -\int\limits_S \left(\frac{d\bar{B}}{dt}\,d\bar{S}\right)$ $\qquad \bar{E} = \bar{E}_B + \bar{E}_q$

2. $\oint\limits_L (\bar{H}\,d\bar{l}) = \int\limits_S \left(\bar{j} + \frac{d\bar{D}}{dt}\right) dS$

j - плотность тока проводимости

ρ - объемная плотность эл. зарядов

3. $\oint\limits_S (\bar{D}\,d\bar{S}) = \sum q_i = \int\limits_V \rho\, dV$

4. $\oint\limits_S (\bar{B}\,d\bar{S}) = 0$ $\qquad$ нет магнитных зарядов

5. $\bar{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \bar{E}$

6. $\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}$

7. $\bar{j} = \gamma \bar{E}$

Система уравнений Максвелла для стационарных полей

Магнитное и электрическое поля не меняются во времени.
т.е. $\frac{d\bar{B}}{dt} = 0$ и $\frac{d\bar{D}}{dt} = 0$. Получаем следующую систему

1. $\oint_L (\bar{E}_q d\bar{l}) = 0$ 3. $\oint_L (\bar{H} d\bar{l}) = I$

2. $\oint_S (\bar{D} d\bar{S}) = \sum q_i$ 4. $\oint_S (\bar{B} d\bar{S}) = 0$

1 и 2 ур-я описывают стационарное эл. поле
3 и 4 ур-я описывают стационарное магн. поле
Две системы ур-й, каждая содержит два ур-я

Энергия магнитного поля

L - индуктивность контура

I - электрический ток

$\Phi = LI$

$d\Phi = L\,dI$

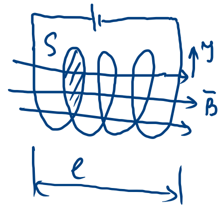
$dA = I\,d\Phi = L I\,dI$

$A = \int_0^I L I\,dI = L\int_0^I I\,dI$

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

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

$W_{\text{магн. поле}} = \frac{LI^2}{2}$



$\bar{B} = const$ $\quad n = \frac{N}{l}$

S - площадь сечения соленоида

l - длина соленоида

N - кол-во витков

$\Phi = BNS$ $\quad \underline{B = \mu_0 \mu n I}$ $\quad B = \mu_0\mu H$

$Sl = V$ - объем соленоида

$\Phi = \mu_0\mu n N S I = LI$

$L = \mu_0\mu n N S = \frac{\mu_0\mu n^2 S}{l}$

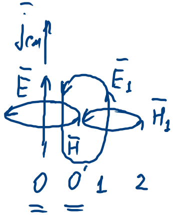
$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu_0\mu n^2 S}{l\cdot 2} I^2 \leftarrow I = \frac{B}{\mu_0\mu n}$

$W = \frac{B^2 S l}{\mu_0^2\mu^2 2} = \frac{H^2 S l}{2}$; $\omega = \frac{W}{Sl} = \frac{H^2}{2}$

$\omega = \frac{H^2}{2}$

объемная плотность магнитной энергии

Электромагнитные волны



распространяются эл. и магн. поля

$\longrightarrow \longrightarrow \bar v$

в т. О электрическое поле совершает колебания, то в пространстве будет происходить распространение электр. и магн. колебаний, т.е. возникает электромагнитная волна.

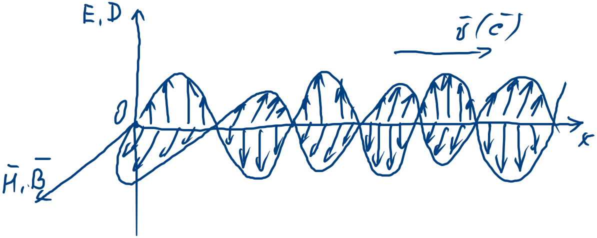
E - нарастает, увеличивается

$$\bar E \perp \bar H \perp \bar v$$

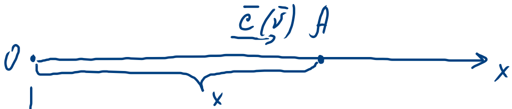
$$\bar v = \bar c = 3 \cdot 10^8 \ \frac{м}{с}$$

Эл. магн. волна — волна поперечная

В т. О вектор $\bar E$ совершает гармонические колебания



Уравнение электромагнитной волны



гармонические эл. магн. колебания

$$E = E_0 \cos \omega t$$

$$\varphi_0 = 0$$

ω – циклическая частота

E_0 – амплитуда

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

T – период колебаний

$$T \cdot c = \lambda$$

в т. A колебания придут с запозданием τ

$$\tau = \frac{x}{c}$$

$$E = E_0 \cos \omega (t - \tau) =$$

$$= E_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c}\right)$$

$\frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число

$$\frac{2\pi}{\lambda} = k$$

$$E = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{T} \frac{x}{c}\right)$$

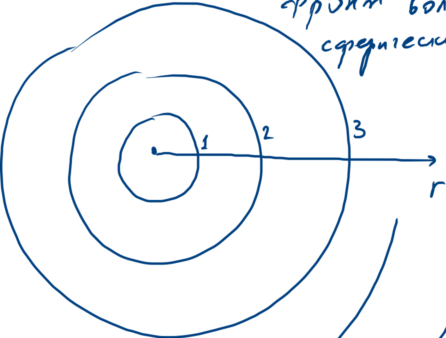
$$E = E_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx)$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kx)$$

Ур-я плоской электромагн. волны

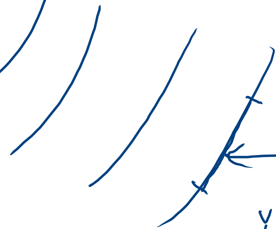
фронт волны сферический



$$E = \frac{E_0}{r}\cos(\omega t - kr)$$

$$H = \frac{H_0}{r}\cos(\omega t - kr)$$

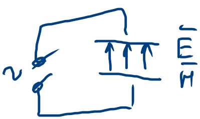
Сферическая волна

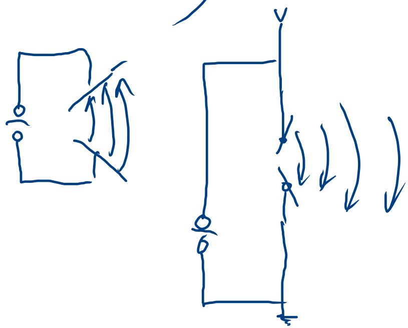


Плоская волна - фронт волны плоский

$$E = E_0 \cos(\omega t - kr)$$

$$H = H_0 \cos(\omega t - kr)$$





Шкала электромагнитных волн

λ - длина волны, $\lambda = 10^8 \div 10^{-15}$ м

$\nu = \frac{1}{T}$; $\lambda = cT$; c - скорость свет в вакууме

$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{c}$

$T = \frac{\lambda}{c}$; $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ν - частота колебаний

ν = единицы Гц - 10^{23} Гц

$$\nu_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} = 3 \text{ Гц}$$ - минимальная частота эл. магн. волн

$$\nu_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{10^{-15}} = 3 \cdot 10^{23} \text{ Гц}$$ - максимальная частота эл. магн. волн

Тип эл. магн. волны	λ - длина волны
Низкочастотные колебания (генераторы эл. тока)	$10^8 - 10^4$ м
Радиоволны	$10^8 - 10^{-5}$ м
Инфракрасное излучение	$10^{-5} - 8 \cdot 10^{-7}$ м
Видимое излучение	800 – 400 нм ($8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$ м)
Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$ м
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9}$ м $- 4 \cdot 10^{-12}$ м
γ - излучение	$4 \cdot 10^{-12} - 10^{-15}$ м

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Полезные формулы

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \qquad \varepsilon\mu > 1 \qquad v < c$$

v – скорость света в среде

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} \cdot E = \sqrt{\mu_0 \mu} \cdot H$$

Плотность электрической и магнитной энергии

$$\omega_{эл} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{E^2}{2} \quad ; \quad \omega_{м} = \mu_0 \mu \frac{H^2}{2}$$

$\omega_{эл} = \omega_{м}$ в каждый момент времени

$$\omega = \omega_{эл} + \omega_{м} = 2\omega_{эл} = 2\omega_{м} = \varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \mu_0 \mu H^2$$

ω – плотность эл. магн. энергии

$$\omega = \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} \cdot \sqrt{\mu_0 \mu} \cdot E \cdot H$$

$$S = \omega v = \frac{\omega c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \sqrt{\mu_0\mu} \cdot c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} EH = \frac{\cancel{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\ \cancel{\sqrt{\varepsilon\mu}}}{\cancel{\sqrt{\varepsilon\mu}}\ \cancel{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}} EH$$

$S = EH$ – плотность эл. магн. энергии, переносимой эл. магн. волной в направлении её распространения в единицу времени

$$\bar{E} \perp \bar{H} \qquad [\bar{E} \cdot \bar{H}] \parallel \bar{v}\ (\bar{c})$$

$\bar{S} = [\bar{E} \cdot \bar{H}]$ – <u>Вектор Умова – Пойнтинга</u>, он направлен вдоль направления распространения волны и равен плотности эл. магн. энергии, переносимой в единицу времени