Магнитное поле

Характеристики магнитного поля

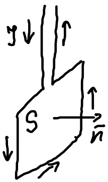
Магнитное поле существует вокруг движущихся электрических зарядов.

Эл. ток — направленное движение зарядов.

Вокруг проводников с электрич. током возникает магнитное поле.

М. поле оказывает воздействие на движущиеся электрические заряды и на проводники с электрич. током.

Рамка с током I используется для изучения магнитного поля



Плоская рамка

I должен быть малым

рамка с тока должна иметь малые размеры

S — площадь рамки

$\sqrt{S} << l$ — между эл. токами

Форма рамка любая

вектор нормали $\vec{n}$ к плоскости рамки $|\vec{n}| = 1$

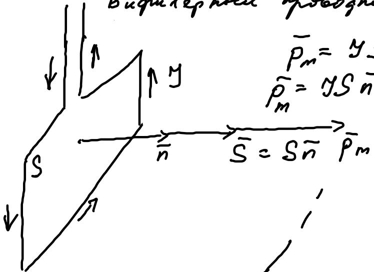
Направление тока I в рамке и направление нормали связано правилом буравчика

Магнитное поле оказывает ориентирующее действие на рамку с электрич. током

Рамка поворачивается,

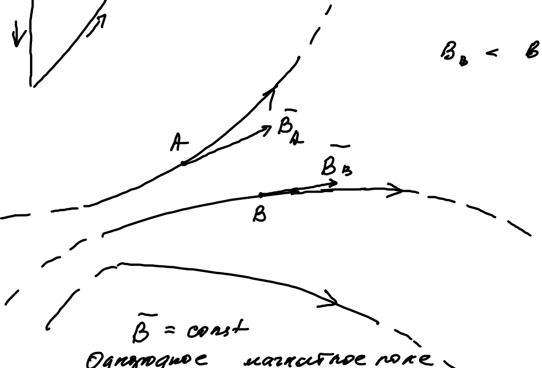
Действует момент сил $\vec{M}$

Бифилярный проводник



$\bar p_m = I\bar S$ - магнитный момент рамки с током

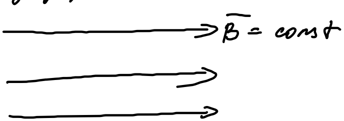
$\bar p_m = IS\bar n$



$B_B < B_A$

$\bar B = const$

Однородное магнитное поле



Момент сил на рамку с током

$M \sim I$; $M \sim S$; $M \sim$ величины магнитного поля, где находится рамка с током

$$\bar M = [\bar p_m \cdot \bar B]$$

$\bar B$ - характеристика магнитного поля

$\bar B$ - магнитная индукция, вектор

$M = p_m \cdot B \cdot \sin\alpha$ $\quad \alpha = (\bar p_m \,\widehat{,}\, \bar B)$

$\sin\alpha = 1$; $\alpha = 90^\circ$ $\quad M_{max} = p_m B$

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}$$

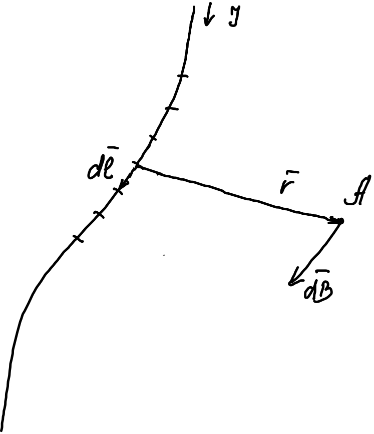
Магнитное поле - силовое поле

Графически м. поле изображают с помощью силовых линий (также как и в электростатике для электрич. поля)

Силовые линии магн. замкнуты

Магнитное поле - поле вихревое

Закон Био-Савара-Лапласа



$dl << r$

$I d\bar{l}$ – вектор, элемента тока

Магнитное поле в т. A, создаваемое током I в элементе проводника $d\bar{l}$, равно

$d\bar{B} \perp d\bar{l}$

$d\bar{B} \perp \bar{r}$

$$d\bar{B} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \cdot \frac{[d\bar{l}\,\bar{r}]}{r^3}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin\alpha}{r^2}, \quad \alpha = (\widehat{d\bar{l}, \bar{r}})$$

μ_0 – магнитная постоянная

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \ \frac{Гн}{м}$

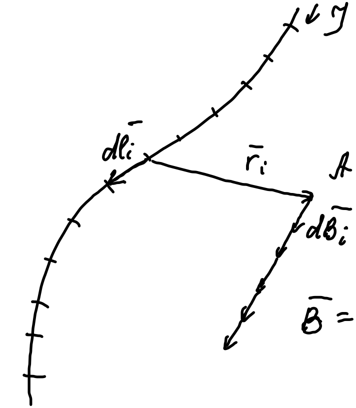
μ – магнитная проницаемость среды; $\mu < 1$; $\mu > 1$; $\mu >> 1$

$\mu = 1$ – вакуум

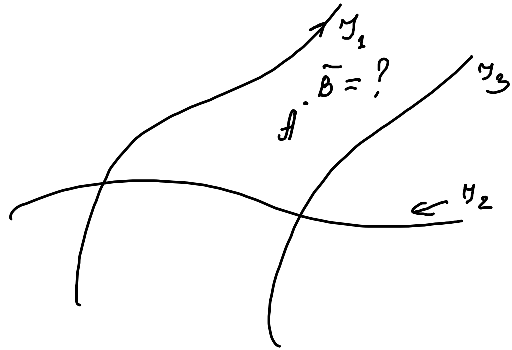
$d\bar{B} \perp (d\bar{l}, \bar{r})$; направление $d\bar{B}$ определяем по правилу буравчика

Принцип суперпозиции магнитных полей

1. $\bar{B} = \sum d\bar{B}_i$



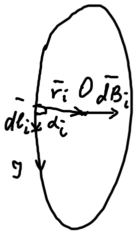
$\bar{B} = \sum d\bar{B}_i$



2. $\bar{B} = \sum \bar{B}_i$

Расчет магнитных полей

1. Магнитное поле в центре кругового тока



$r_i = R$ - радиус кольца $\qquad d\bar B_i \parallel \bar B$

$\alpha_i = 90°$

$d\bar B_i \perp$ плоскости кольца

$$d\bar B_i = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{[d\bar l_i \, \bar r_i]}{r_i^3}$$

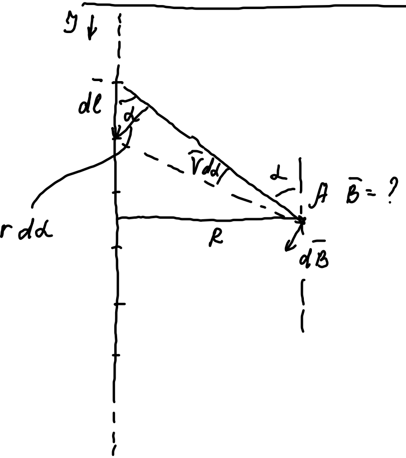
$$dB_i = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{dl_i r_i \sin\alpha_i}{r_i^3} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \cdot \frac{dl_i}{r_i^2}$$

$$\bar B = \sum d\bar B_i \rightarrow \quad B = \sum dB_i \qquad B = \int dB$$

$$B = \int \frac{\mu_0 \mu I \, dl}{4\pi \; r^2} = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} \int dl = \frac{\mu_0 \mu I \, \cancel{2\pi R}}{{}_2\cancel{4\pi} R^{\cancel{2}}} = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}$$

$$\boxed{\begin{gathered} B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R} \text{ в центре кольца} \\ \mu = 1 \\ B = \frac{\mu_0 I}{2R} \\ \bar B \perp \text{ плоскости кольца} \\ \text{Направление тока в кольце и направление } \bar B \\ \text{связаны правилом буравчика} \end{gathered}}$$

2. Магнитное поле от бесконечного прямолинейного проводника с током I



$$\bar{B} = \sum d\bar{B}_i \rightarrow B = \sum dB_i \Rightarrow B = \int dB$$

$$d\bar{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} I \frac{[d\bar{l}\,\bar{r}]}{r^3}$$

$$\frac{R}{r} = \sin\alpha \;; \quad r = \frac{R}{\sin\alpha}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I \, dl \sin\alpha}{4\pi r^2}$$

$$dl = \frac{r \cdot d\alpha}{\sin\alpha}$$

$d\bar{B} \perp (d\bar{l}, \bar{r})$ – плоскость листа

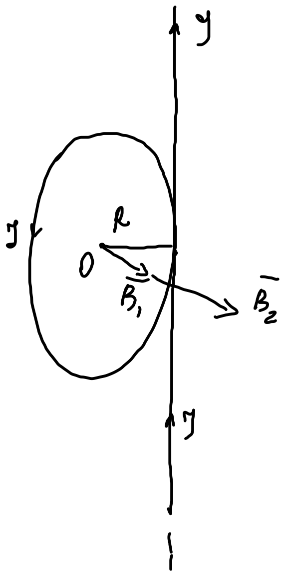
$d\bar{B}_i \uparrow\uparrow \bar{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \sin\alpha \cdot d\alpha$$

$$B = \int \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \sin\alpha \, d\alpha = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \int_0^{\pi} \sin\alpha \cdot d\alpha = -\frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \cos\alpha \Big|_0^{\pi}$$

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

3. Прямолинейный бесконечный проводник с током имеет кольцо



$\bar{B} = \bar{B}_1 + \bar{B}_2$

$\bar{B}_1$ – кольцо с током

$\mu = 1$

$\bar{B}$ – прямол. проводник с током

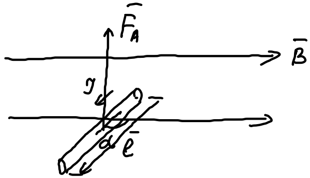
$B = B_1 + B_2$

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

Сила Ампера

Сила Ампера — сила, действующая на проводник с током в магнитном поле

$\bar{B} = const$, однородное магнитное поле



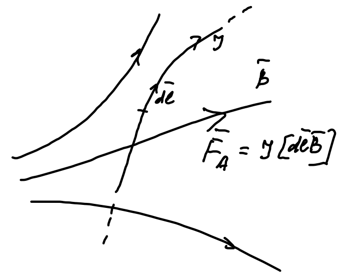
$\bar{l}$ — вектор

l — длина проводника, ⇒ проводник прямолинейный

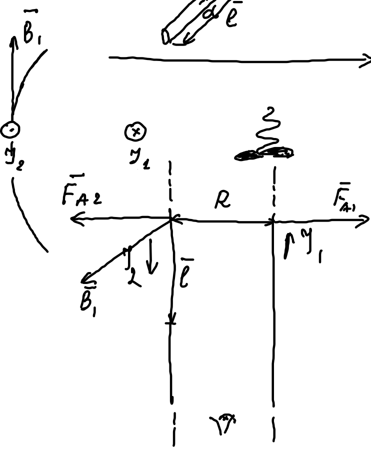
Ампер установил $\bar{F}_A = I[\bar{l}\bar{B}]$

$F_A = IlB\sin\alpha$

$\bar{F}_A \perp (\bar{l}, \bar{B})$



$\bar{F}_A = I[d\bar{l}\bar{B}]$

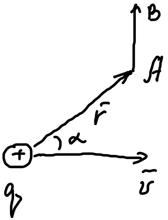


Взаимодействие параллельных проводников с токами

$B_1 = \frac{\mu_0\mu I_1}{2\pi R}$ $\quad \bar{F}_{A2} = I_2[\bar{l}\bar{B}_1]$ $\quad F_{A2} = I_2 l B_1 \sin\alpha = I_2 l \frac{\mu_0\mu I_1}{2\pi l}$; $\sin\alpha = 1$

$F_{A2} = \frac{\mu_0\mu I_1 I_2}{2\pi R} l$ $\quad \bar{F}_{A2} \perp (\bar{l}\bar{B}_1)$ $\quad F_{A1} = \frac{\mu_0\mu I_1 I_2}{2\pi R} l$; $\quad F_{A1} = F_{A2}$

$\bar{F}_{A1} \uparrow\downarrow \bar{F}_{A2}$



Магнитное поле движущегося электрического заряда

$$\bar B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot q \frac{[\bar v\ \bar r]}{r^3} \ ; \quad B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot q \cdot \frac{v \sin\alpha}{r^2} \qquad v << c$$

$$\alpha = (\widehat{\bar v, \bar r}) \qquad \bar B \perp (\bar v, \bar r)$$

$$\bar E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \frac{q\bar r}{r^3}$$ – электрическое поле в т. А.

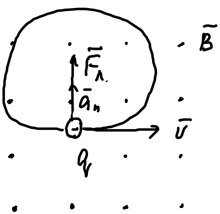
Сила Лоренца

Сила Лоренца действует на движущийся электрический заряд в магнитном поле

$$\bar F_л = q[\bar v\ \bar B] ; \qquad F_л = qvB\sin\alpha ; \qquad \alpha = (\widehat{\bar v\ \bar B}) \qquad \bar F_л \perp (\bar v\ \bar B)$$

Определяем направление $\bar F_л$ согласно правилу левой руки или правилу буравчика

1\. $\bar v \perp \bar B$ $\quad \bar B = const$ $\quad \alpha = 90°$



$$\bar F_л = q[\bar v\ \bar B]$$

$$F_л = qvB\sin\alpha = qvB$$

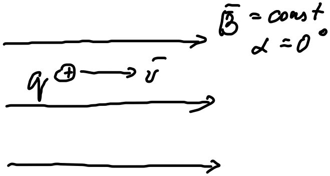
$$\bar F_л \perp (\bar v, \bar B) \ ; \quad q < 0$$

$$\bar a = \frac{\bar F_л}{m} \ ; \quad a_n = \frac{v^{\cancel{2}}}{R} = \frac{q\cancel{v}B}{m}$$

$$\bar a_n \perp \bar v$$

$$\frac{v}{R} = \frac{qB}{m}$$

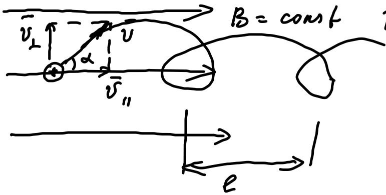
2. $\alpha = 0^\circ; 180^\circ$ $\quad \bar{B} \parallel \bar{v}$ движение вдоль силовой линии



$$\bar{F}_л = q[\bar{v}\bar{B}]$$

$$F_л = q v B \sin\alpha = 0$$

3.



$v_\parallel = v\cos\alpha$ – прямолинейное движение вдоль силовой линии

$v_\perp = v\sin\alpha$ – движение по окружности

Результирующее движение – движение по спирали

R – радиус окружности

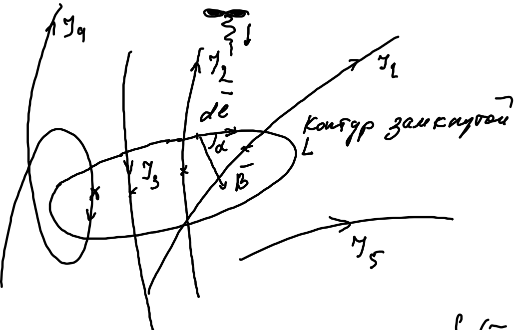
l – расстояние между витками (шаг спирали)

$\bar{E} + \bar{B}$ – движение заряда в электрическом и магнитном полях одновременно

$$\bar{F}_л = q\bar{E} + q[\bar{v}\bar{B}]$$

Циркуляция вектора магнитной индукции

М. поле создано системой эл. токов



$$\oint_L (\bar B \, d\bar l) \Leftarrow \sum_L (\bar B_i \, d\bar l_i)$$ – циркуляция вектора магнитной индукции

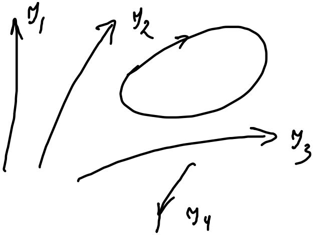
$$(\bar B \, d\bar l) = B \, dl \cos\alpha \qquad \alpha = (\widehat{\bar B \, d\bar l}) \qquad \mu = 1$$

$$\boxed{\oint_L (\bar B \, d\bar l) = \mu_0 \sum_i I_i}$$

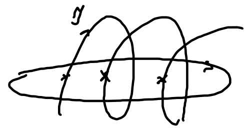
Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру равняется произведению μ_0 на алгебраическую сумму эл. токов, охватываемых контуром

$$\oint_L (\bar B \, d\bar l) = \mu_0 (-I_1 - I_2 + I_3 + I_4)$$

Направление тока и направление обхода контура связаны правилом буравчика

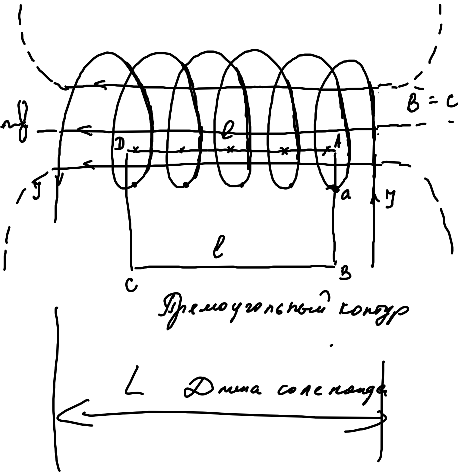


$$\oint_L (\bar B \, d\bar l) = 0$$



$$\oint (\bar B \, d\bar l) = \mu_0 3 I$$

Магнитное поле соленоида



$\vec B = const$ внутри соленоида - ? $\mu = 1$

$$\oint\limits_{ABCDA} (\vec B d\vec l) = \mu_0 N J = \overset{=0}{\int\limits_{AB}(\vec B d\vec l)} + \overset{=0,\ \text{т.к. } \vec B = 0}{\int\limits_{BC}(\vec B d\vec l)} + \overset{=0}{\int\limits_{CD}(\vec B d\vec l)} + \int\limits_{DA}(\vec B d\vec l) =$$

$AB \Rightarrow Aa + aB$

$\vec B \neq 0 \quad \vec B = 0$

$\alpha = 90^\circ$

$(\vec B d\vec l) = B\,dl\cos\alpha$

$\cos\alpha = 0$

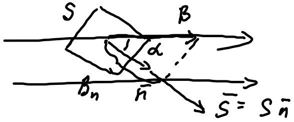
$$= Bl = \mu_0 N J = \mu_0 n l J$$

$n = \dfrac{N_0}{L}$ - концентрация

$$B\cancel{l} = \mu_0 n \cancel{l} J$$

$$B = \mu_0 n J$$

Поток вектора магнитной индукции



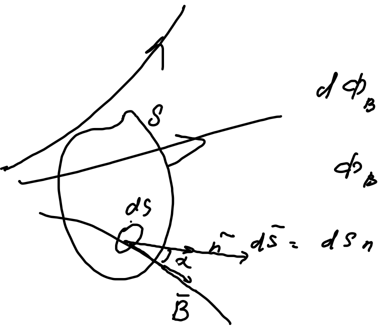
$\bar{B} = const$

$|\bar{n}| = 1$

$\alpha = (\bar{B} \wedge \bar{n})$

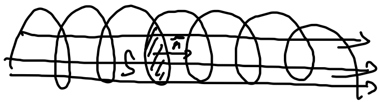
$$\Phi_B = (\bar{B}\bar{S}) = BS\cos\alpha = B_n S$$

$$B_n = B\cos\alpha$$



$$d\Phi_B = (\bar{B}\,d\bar{S}) = B\,dS\cos\alpha$$

$$\Phi_B = \sum_i d\Phi_{Bi} \to \Phi_B = \iint_S (\bar{B}\,d\bar{S})$$



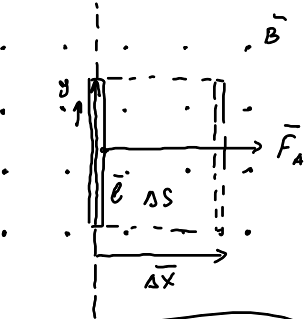
S – площадь витка

$\bar{B}$ Поток $\bar{B}$ через поперечное сечение соленоида

$$\Phi_B = BS\cos\alpha = BS = \mu_0 n I S = \Phi_B$$

Работа по перемещению проводника или контура с током в магнитном поле

$\bar{B} = const$



$\bar{F}_A = I[\bar{B}\bar{l}]$

$F_A = IBl\sin\alpha = IBl$

$\alpha = 90^\circ$

$\alpha = (\bar{l}\,\bar{B})$

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

$\beta = (\bar{F}_A \Delta\bar{x}) = 0^\circ$

$A = F\Delta x = IBl\Delta x = IB\Delta S = I\Delta\Phi_B$

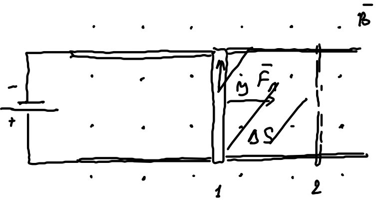
$\Delta\Phi_B = (\bar{B}\Delta\bar{S}) = B\Delta S\cos\gamma = B\Delta S$

$\gamma = (\bar{B}\,\bar{n}) = 0^\circ$

$d\bar{x}$

$dA = IBl\,dx$

$A = I\Delta\Phi_B$



Φ_{B1} $\qquad \Delta\Phi_B = \Phi_{2B} - \Phi_{1B}$

Φ_{B2}

$$A = I\Delta\Phi_B = I(\Phi_{2B} - \Phi_{21})$$

ΔS – изменение площадь контура

При этом магн. поток меняется на $\Delta\Phi_B$

$$A = I\Delta\Phi = I(\Phi_{2B} - \Phi_{1B})$$

Совершается механ. работа

$$\Phi_B = (\bar{B}\Delta\bar{S}) = B\Delta S\cos\alpha$$

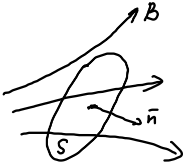
$\qquad B \downarrow 3, \quad \Delta S \downarrow 1, \quad \cos\alpha \downarrow 2$

1. Магнитный изменяется, т.к. меняется площадь контура
2. α – меняется, магн. поток меняется
3. $\bar{B}$ меняется, изменяет магн. поток

Электромагнитная индукция

Явление эл. магн. индукции (опыты Фарадея), 1831

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через контур возникает электрический ток, который получил название "индукционный ток". Явление называется эл. магн. индукцией. Магнитный поток меняется



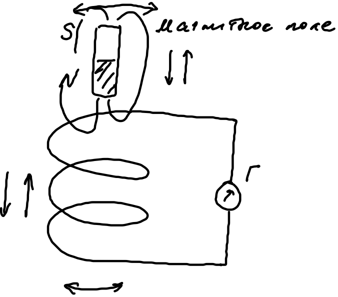
$$\Phi_B = \int_S (\bar{B}\, d\bar{S})$$

$$\Phi_B = B S \cos\alpha$$

по трем причинам:

1. Магн. поле меняется
2. Площадь контура
3. Контур поворачивается

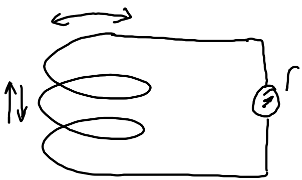
Величина индук. тока не зависит от способа изменения магн. потока через контур.

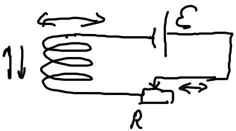


1. Перемещаем магнит или катушку
$\vec{B}$ меняется

2. Поворачиваем магнит или катушку
α – меняется

Величина индукционного тока зависит от скорости изменения магнитного потока через контур!





Меняем ток во втором контуре

Закон Фарадея (закон эл. магн. индукции)

$$I_{инд.} \sim \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

В контуре имеется ЭДС электрической индукции, $\mathcal{E}_i$

$$I_{инд} \sim \mathcal{E}_i$$

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

В СИ $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Знак (−) указывает на направление инд. тока $I_{инд.}$,

математическое выражение <u>правила Ленца.</u>

Индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока через контур.

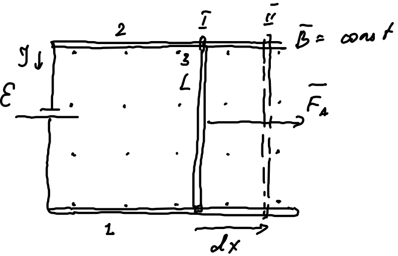
$\overline{B} = const$

Площадь контура уменьшается

$\Phi_B = B_p S \cos\alpha$ Φ_B − уменьшается за счет S

$\overline{B}_p = \overline{B} + \overline{B}_{инд.}$ $\overline{B}_{инд.} \uparrow\uparrow \overline{B}$

Вывод закона Фарадея



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

$$dA = F_A \cdot dx \cdot \cos\alpha \qquad \alpha = (\widehat{\bar{F}_A \cdot d\bar{x}}) = 0^\circ$$

$$\cos\alpha = 1$$

$$F_A = I B L \sin\beta$$

$$F_A = I B L$$

R – эл. сопротивление контура

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

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

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

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

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R' + r}$$

$$R = R' + r$$

$$I = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_i}{R}\,; \qquad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$[\mathcal{E}_i] = В$$

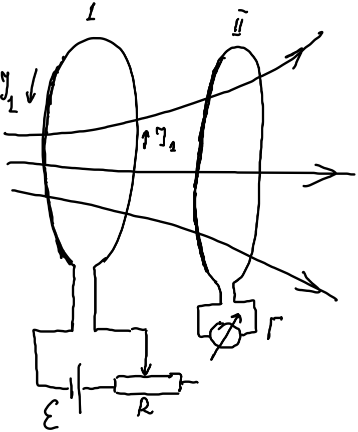
Какова природа эдс индукции?

$\Phi_B = BS\cos\alpha$

1. Меняется S или α. Сила Лоренца разделяет отриц. и положит. заряды и возникает эдс

2. $\vec{B}$ меняется Максвелл предположил, что при изменении магн. поля возникает электрическое поле, оно разделяет электр. заряды. Возникающее эл. поле является вихревым (силовые линии — замкнутые силовые линии)

Взаимная индукция



$$\Phi_{B\,II} = \int_S \left(\vec{B}_1 d\vec{S}_2\right) \qquad B_1 \sim I_1$$

Меняем I_1, меняется B_1, меняется $\Phi_{B\,II}$, возникает I_2

Явление взаимной индукции

$$\Phi_{B\,II} = L_{21} \cdot I_1$$

L_{21} - коэффициент пропорциональности, зависит от геометрии контуров

$$\mathcal{E}_{i\,II} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt}$$

Может быть обратное, изменяющийся ток во втором контуре приводит к появлению тока в первом контуре

$L = L_{21} = L_{12}$ - взаимная индуктивность контуров

$[L]$ = Гн

Самоиндукция. Индуктивность контура

Меняющийся ток в контуре создает магн. поле, контур находится в магн. поле, оно меняется, меняется магн. поток через контур, возник. индук. ток. Явление самоиндукции.

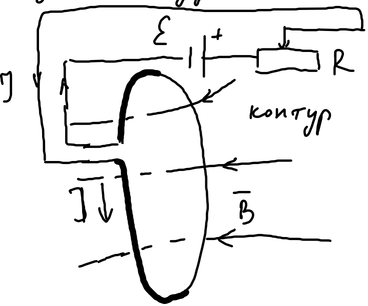
$$\Phi = L\,J \qquad B \sim J; \quad \Phi \sim B \qquad \Phi \sim J$$

L - индуктивность контура

Где самоиндукция

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dJ}{dt}$$

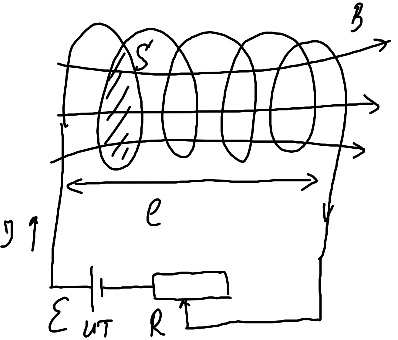
; L - индуктивность контура (коэффициент пропорциональности), зависит от геометрических параметров контура.



Ток в контуре меняем с помощью реостата. Направление индукц. тока определяем по правилу Ленца

Индуктивность соленоида

Контур в виде соленоида: N - количество витков, l - длина соленоида



S - площадь поперечного сечения

Магнитный поток через соленоид

$$\Phi = BSN = \mu_0 I n S N = LI.$$

$B = nI$; $n = \dfrac{N}{l}$ - концентрация витков

L - индуктивность контура

$$L = \mu_0 n S N = \mu_0 n S n \cdot l = \mu_0 n^2 S l \text{ или}$$

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

ИТ - источник тока,

ε - ЭДС ИТ.

Если в соленоиде находится магнитный сердечник, то $L = \mu_0 \mu \dfrac{N^2 S}{l}$

Энергия магнитного поля

Проводник с током окружен магнитным эл. полем, которое появляется и исчезает с появлением и исчезновением эл. тока. Часть энергии тока (энергии, запасенной в источнике тока) идет на создание магн. поля. Энергия магнитного поля = работе, затрачиваемой током на создание магнитного поля.

L - индуктивность контура

J - величина тока

$\Phi = LJ$ - сцепленный магнитный поток с контуром

$d\Phi = L\,dJ$ - При изменении тока на dJ магнитный поток через контур меняется на $d\Phi$, при этом необходимо совершать работу

$$dA = J\,d\Phi = LJ\,dJ$$

Работа по созданию магн. поля при изменении тока от 0 до J есть

$$A = \int_0^J LJ\,dJ = L\int_0^J J\,dJ = \frac{LJ^2}{2},$$ а энергия

магнитного поля, связанного с контуром, согласно закона сохранения энергии:

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

Энергия магнитного поля локализована в пространстве.

Для однородного поля

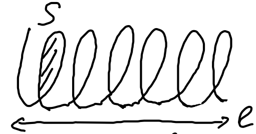
$$W = \frac{BH}{2}V.$$ Здесь B и H – характеристики магнитного поля; B – магнитная индукция и H – напряженность магнитного поля

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{BH}{2}$$

$$\omega = \frac{BH}{2}$$

Итак $\boxed{W = \frac{LI^2}{2}}$



$V = Sl$ - объем соленоида $\quad n = \frac{N}{l}$

Для соленоида магнитное поле в соленоиде однородное, а индуктивность соленоида $L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}$ или $L = \mu_0 \mu n^2 S l$

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2} n^2 \mu_0 \mu S l \quad \text{и} \quad \omega = \frac{W}{V} = \frac{I^2}{2} n^2 \mu_0 \mu$$

В соленоиде $H = In$; $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu I n$

Таким образом, $\omega = \frac{HB}{2}$ – объемная плотность электрической энергии

Магнитные свойства вещества

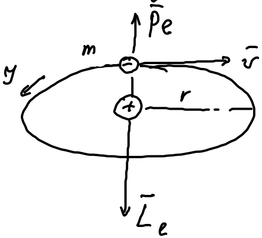
Все тела (вещества) в магнитном поле намагничиваются, т.е. создают собственное магнитное поле. Такие тела называют магнетиками.

1. Диамагнетики
   $\mu < 1$
2. Парамагнетики
   $\mu > 1$
3. Ферромагнетики
   $\mu >> 1$

$\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}$ $\bar{H}$ – вектор напряженности магнитного поля

μ_0 – магнитная постоянная

Магнитные моменты электронов и атомов



Движение электрона по орбите в атоме эквивалентно круговому микротоку: $I = e\nu$; e – заряд электрона

ν – частота вращения

$T = \frac{1}{\nu}$ – период вращения

Магнитный момент кругового тока

$\bar{P}_e = IS\bar{n}$ S – площадь орбиты $S = \pi r^2$ r – радиус орбиты

m – масса электрона

$m\bar{v}$ – импульс электрона

Орбитальный механический момент электрона

$L_e = m v r = m 2\pi r \nu r = 2 m \nu S$

$$\frac{P_e}{L_e} = \frac{IS}{2m\nu S} = \frac{e\nu S}{2m\nu S}$$

$$\frac{P_e}{L_e} = \frac{e}{2m}$$

$$\boxed{\bar{p}_e = -\frac{e}{2m}\bar{L}_e}$$

$\bar{p}_e = -g\bar{L}_e$; $g = \frac{e}{2m}$ - гиромагнитное отношение орбитальных момент. (магнитного к механическому)

Из эксперимента $\boxed{g = \frac{e}{m}}$

Эл-н обладает собственным механическим моментом — спином; спин - spin - вращ.

L_{es} - спин электрона

m_e - масса эл-на

e - заряд эл-на

L_{es} - спин эл-на

$\bar{L}_{es}$ - вектор, соответствующ. и собственный магнитный момент $\bar{p}_{es}$

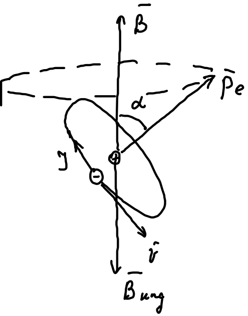
Магнитный момент эл-на складывается из орбитального магн. момента и собственного магнитного момента

Магнитный момент атома складывается из магнитных моментов электронов

Общий магн. момент атома равен векторной сумме магн. моментов (орбит. и собственных), входящих в состав атома электронов.

$$\bar{p}_a = \sum_i \bar{p}_e + \sum_i \bar{p}_{es}$$

Диамагнетики



Орбита эл-на во внешнем магнитном поле $\bar B$ будет совершать прецессию. Вектор $\bar p_e$ будет сохранять угол α постоянным; $\bar p_e$ вращается вокруг $\bar B$ с некоторой угловой скоростью

В результате прецессии орбиты каждого эл-на возникает индук. ток и $\bar B_{инд} \uparrow\downarrow \bar B$ согласно правилу Ленца.

Дополнительные магнитные поля $\bar B_{инд}$ от всех электронов (всех атомов) складываются и результ. магн. индукц. поле $\bar B_{инд} \uparrow\downarrow \bar B$

Внешнее магн. поле: $\bar B_p = \bar B + \bar B_{инд}$, $B_p = B - B_{инд}$ ослабляется. Это и есть явление <u>диамагнетизма</u> (диамагнитный эффект)

Вещества-диамагнетики: Bi; Ag; Au, Cu
органич. соединения
смолы, C и т.д.

Парамагнетики

$\bar{B}_0$ – внешнее магн. поле, магнитное

$\bar{B}_{доп}$ – индуцированное поле, магнитное

$\bar{B}_{доп} \uparrow\uparrow \bar{B}_0$

$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_{доп}$

$B = B_0 + B_{доп}$ – результирующее поле, магнитное

Атомы обладают магн. моментом, он складывается из орб. магн. и собственных магн. моментов электронов

$\bar{p}_a$ – магн. момент атома

$\bar{P} = \sum \bar{p}_{ai}$

$\bar{B}_0 = 0$; магн. моменты атомов ориентированы хаотично и $\bar{B}_{доп} = 0$

$\bar{B}_0 \neq 0$; оно оказывает ориентирующее действие на атом

$\bar{P} \neq 0$ возникает доп. магн. поле.

Для парамагнетиков $\bar{B}_{доп} \uparrow\uparrow \bar{B}_0$

Pt, Al

$\mu > 1$

Магнитное поле в веществе

$\bar{B}_0$ – внешнее магн. поле

$\bar{B}' = \bar{B}_{доп}$ – поле микротоков, связанное с орбит. магн. моментами и собственными магн. моментами электронов, т.е с магн. моментами атомов ($\bar{p}_a$)

V – объем магнетика

$\bar{P}$ – магнитный момент магнетика

$\bar{P} = \sum \bar{p}_{ai}$

$\bar{J} = \dfrac{\bar{P}}{V}$ намагниченность магнетика

$\bar{B}_0 = \mu_0 \bar{H}$ $\quad \bar{H}$ – напряженность магн. поля

μ_0 – магн. постоянная

$\bar{B}' = \mu_0 \bar{J}$

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}' = \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \bar{J}$$

$$\frac{\bar{B}}{\mu_0} = \bar{H} + \bar{J} \qquad \bar{J} = \varkappa \bar{H}$$

$\varkappa$ – магнитная восприимчивость вещества (безразмерная величина)

$\varkappa < 0$ – диамагнетики

$\varkappa > 0$ – парамагнетики

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \varkappa \bar{H} = \mu_0 (1+\varkappa) \bar{H}$$

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 (1+\varkappa)}$$

$\mu = 1 + \varkappa$ – магнитная проницаемость вещества

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

$\mu \sim 1$ $\quad \mu > 1$ – парамагнетики

$\mu < 1$ – диамагнетики

Ферромагнетики

Ферромагнетики – вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, собствен. магн. поле не равно нулю, когда $\bar{B}_0 = 0$

Co, Ni, Ga, Fe, сплавы

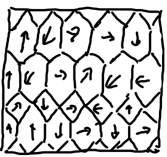
$J \sim H$ (линейная зависимость) $\mu \cong 5000$ – Fe

Микрообъемы вещества, когда $\bar{B}_0 = 0$, имеют собственное магн. поле

Магн. моменты атомов ориентированы одинаково

Такие объемы называют магнитными доменами

Результ. магн. моменты доменов ориентированы частично хаотично или полностью, тепловое явление

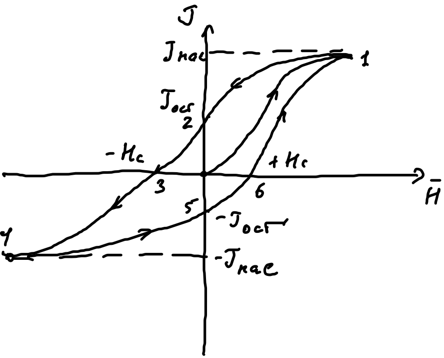


Если внешнее поле $\bar{B}_0 = 0$; то в доменах собственное магн. поле ориентировано хаотично и результирующее поле в ферромагнетике $\bar{B}' = 0$

При внеш. магн. поле $\bar{B}_0$ магн. моменты магн. доменов выстраиваются вдоль поля

$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}'$ $\quad B \gg B_0$

Магнитный гистерезис



H_c - коэрцитивная сила

1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 1 петля магнитного гистерезиса

точка Кюри - температура, при которой в вещ
пропадают магн. свойства