

# **Занятие 5. Движение заряженных частиц в магнитных и электрических полях. Электромагнитная индукция, энергия магнитного поля**

---



- **Отклонение от прямолинейной траектории движущейся заряженной нерелятивистской частицы однородными электрическим или магнитным полем**
- **Закон *Фарадея*. Правило *Ленца***
- **Индуктивность контура с током. Электродвижущая сила самоиндукции. Взаимная индуктивность и теорема взаимности связанных контуров с током**
- **Энергия магнитного поля проводника с током. Плотность энергии и энергия магнитного поля**
- **Магнитное давление**
- **Ауд.: *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике.  
- М.: Бином, 1998÷2010. №№ 2.417, 2.433, 2.325, 2.329, 2.374**

# Отклонение от прямолинейной траектории движущейся заряженной нерелятивистской частицы однородными электрическим или магнитным полем

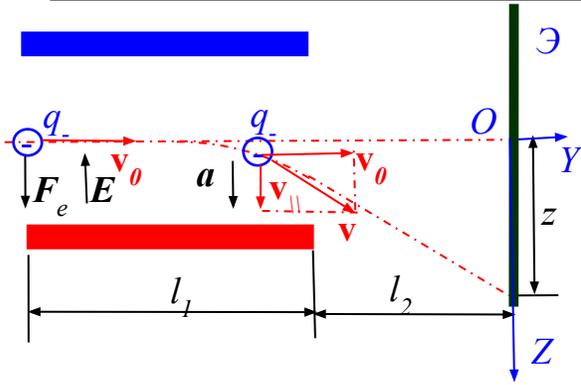


Рис.1

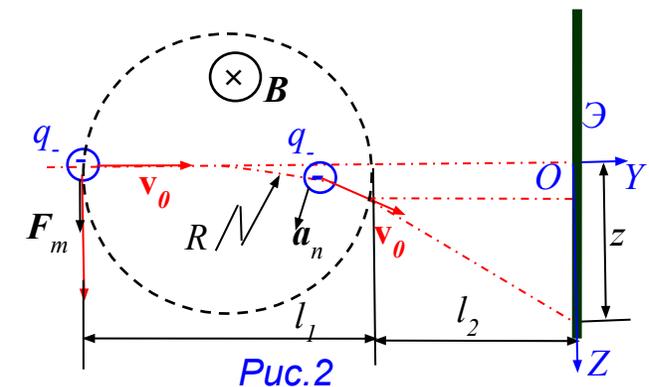
На нерелятивистскую частицу с  $q$  зарядом и  $m$  массой, движущуюся с вектором  $\mathbf{v}_0$  скорости в вакууме во внешнем однородном электрическом поле с вектором  $\mathbf{E}$  напряжённости действует вектор  $\mathbf{F}_e$  силы:

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}, \quad (1)$$

где  $q = -|q_-|$  и  $q = q_+$  - движущийся с вектором  $\mathbf{a}$  ускорения по направлению  $OZ$  оси неподвижной  $OYZ$  системы координат  $q_-$  отрицательный или  $q_+$  положительный заряд. Смещение  $z$  на  $\mathcal{E}$  экране  $q$  заряда:

$$z = \frac{q}{m} E \frac{l_1}{v_0^2} \left( \frac{l_1}{2} + l_2 \right), \quad (2)$$

где  $v_0$  - модуль вектора  $\mathbf{v}_0$  начальной скорости движения  $q$  заряда по направлению  $OY$  оси.



На нерелятивистскую частицу с  $q$  зарядом и  $m$  массой, движущуюся с вектором  $\mathbf{v}_0$  скорости в вакууме в магнитном поле с вектором  $\mathbf{B}$  его индукции, действует вектор  $\mathbf{F}_m$  силы *Лоренца*:

$$\mathbf{F}_m = q[\mathbf{v}_0, \mathbf{B}], \quad (3)$$

где  $q = -|q_-|$  и  $q = q_+$  - движущийся с вектором  $\mathbf{a}_n$  нормального ускорения по направлению  $OZ$  оси и окружности  $R$  радиусом неподвижной  $OYZ$  системы координат  $q_-$  отрицательный или  $q_+$  положительный заряд. Смещение  $z$  на  $\mathcal{E}$  экране  $q$  заряда:

$$z = \frac{q}{m} E \frac{l_1}{v_0} \left( \frac{l_1}{2} + l_2 \right), \quad (4)$$

где  $v_0$  - модуль вектора  $\mathbf{v}_0$  начальной скорости движения  $q$  заряда по направлению  $OY$  оси.

# Закон Фарадея. Правило Ленца

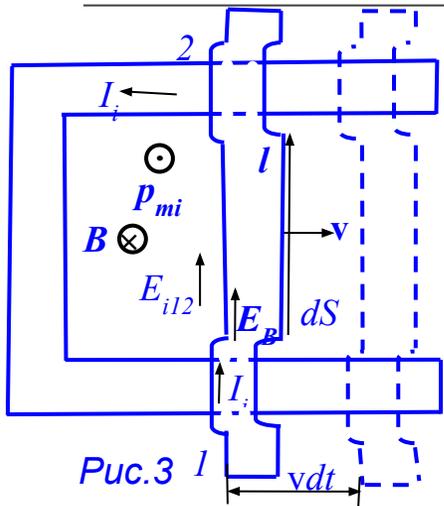


Рис.3

Вектор  $E_B$  напряжённости вихревого электрического поля:

$$E_B = [\mathbf{v}, \mathbf{B}],$$

где  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_+$ ;  $\mathbf{v} = -\mathbf{v}_-$  - векторы скорости соответственно

*положительных* и *отрицательных* зарядов,

двигающихся во внешнем магнитном поле с  $\mathbf{B}$  вектором индукции. Согласно закону *Фарадея ЭДС* индукции

$E_{i12}$  между 1-2 участками перемычки, движущейся с  $\mathbf{v}$  вектором скорости:

$$E_{i12} = -d\Phi_m/dt,$$

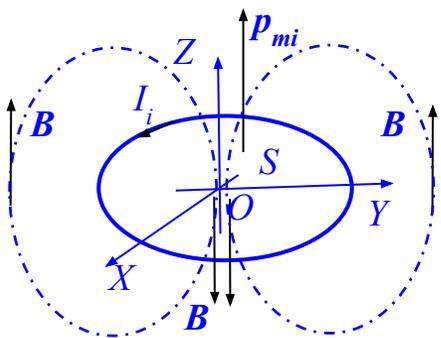
где поток  $\Phi_m$  магнитной индукции через элементарную поверхность  $dS$  площадью за  $dt$  интервал времени изменяется на  $d\Phi_m$

величину. *ЭДС* индукции  $E_{i12}$  вызывает в проводящем контуре появление индукционного тока  $I_i$  силой с

вектором  $\mathbf{p}_{mi}$  магнитного момента.

(5)

(6)



$$d\Phi_m/dt > 0; E_i < 0$$

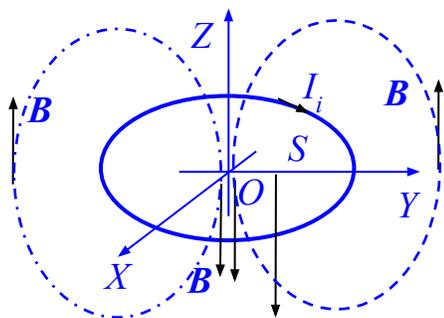


Рис.4  $d\Phi_m/dt < 0; E_i > 0$

Согласно правилу *Ленца* при постоянной или увеличивающейся во  $t$  времени поверхности  $S$  площадью, охватываемой проводящим контуром,

вектор  $\mathbf{p}_{mi}$  магнитного момента индукционного тока  $I_i$  силой противонаправлен вектору  $\mathbf{B}$  индукции внешнего магнитного поля, если  $\Phi_m$  поток индукции внешнего магнитного поля, пересекающего эту  $S$  площадь, увеличивается во времени, т.е. при  $d\Phi_m/dt > 0$  ЭДС индукции  $E_i < 0$ . Если  $d\Phi_m/dt < 0$ , то ЭДС индукции  $E_i > 0$ , т.е. вектор  $\mathbf{p}_{mi}$  магнитного момента индукционного тока  $I_i$  силой сонаправлен вектору  $\mathbf{B}$  индукции внешнего магнитного поля.



# **Индуктивность контура с током. Электродвижущая сила самоиндукции. Взаимная индуктивность и теорема взаимности связанных контуров с током**

Потокосцеплением  $\Psi$  контура, состоящего из  $N$  витков с током  $I_i$  силой в каждом витке, называют сумму потоков  $\Phi_{mi}$  индукции внешнего магнитного поля через каждый из этих  $N$  витков:  $\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_{mi}$ . (7)

Потокосцепление  $\Psi$  проводящего контура пропорционально току  $I$  силой в нём :

$$\Psi = LI, \quad (8)$$

где  $L$  - индуктивность контура. Согласно правилу **Ленца** при изменениях тока  $I$  силой контура в нём возникает ЭДС самоиндукции  $E_c$ , направленная противоположно току  $I$  силой, если он увеличивается во времени  $t$ , и по току  $I$  силой, если он уменьшается во времени  $t$  :  $E_c = -Ldl/dt$ . (9)

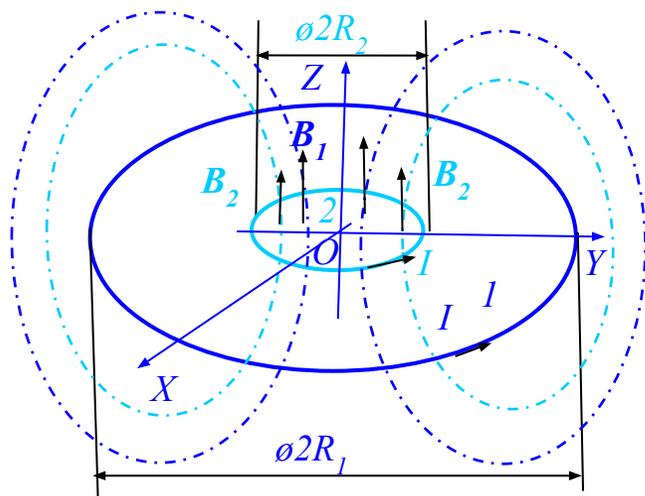
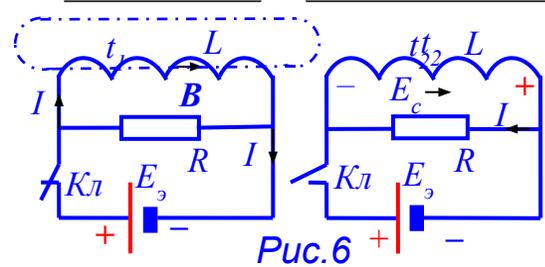


Рис.5

Магнитное поле **1 - го** контура  $R_1$  радиусом создаёт потокосцепление  $\Psi_{21}$  с поверхностью **2 - го** контура  $R_2$  радиусом, пропорциональное току  $I$  силой в **1-ом** контуре:  $\Psi_{21} = L_{21}I$ , (10) где  $L_{21}$  - коэффициент взаимной индуктивности **1 - го** контура со **2 - ым**.

Магнитное поле **2 - го** контура  $R_2$  радиусом создаёт потокосцепление  $\Psi_{12}$  с поверхностью **1 - го** контура  $R_1$  радиусом, пропорциональное току  $I$  силой во **2 - ом** контуре:  $\Psi_{12} = L_{12}I$ , (11) где  $L_{12}$  – коэффициент взаимной индуктивности **2 - го** контура с **1 - ым** контуром. Согласно теореме взаимности при отсутствии в среде между проводящими контурами ферромагнитных материалов:  $L_{21} = L_{12}$ . (12)

# Энергия магнитного поля проводника с током. Плотность энергии и энергия магнитного поля



Работа  $A$ , выполненная ЭДС самоиндукции  $E_c$  от значения тока  $I$  силой в момент  $t_2$  времени отключения

$E_3$  внешней ЭДС до времени  $t \rightarrow \infty$ , т.е.  $I_\infty = 0$ :

$$A = -L \int_I^{I_\infty=0} IdI = \frac{LI^2}{2} \quad (13)$$

Работа  $A$  выполнена магнитным полем проводника  $L$  индуктивностью с током  $I$  силой, поэтому его  $W_m$  энергия:  $W_m = LI^2/2$ . (14)

Плотность  $w_m$  энергии магнитного поля, выраженная через модули  $H$ ,  $B$  векторов  $H$  напряжённости  $B$  индукции магнитного поля с учётом  $H = B/\mu_0\mu$  в среде с  $\mu$  магнитной проницаемостью:

$$w_m = HB/2 = B^2/2\mu_0\mu. \quad (15)$$

Энергия  $W_m$  магнитного поля среды  $V$  объёмом кроме ферромагнетиков :

$$W_m = \iiint_V w_m dV = \iiint_V \frac{HB}{2} dV. \quad (16)$$

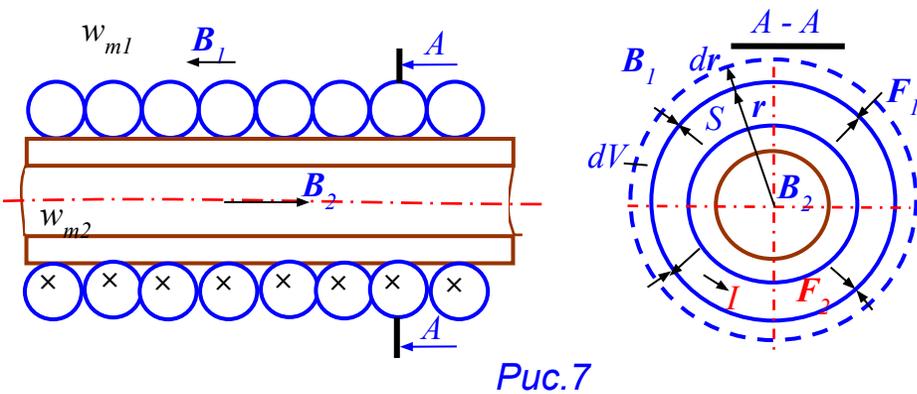


Рис.7

Суммарный  $dW_{m|l}$  дифференциал энергии магнитного поля вне и внутри соленоида с постоянным током  $I$  силой при элементарном  $dV$  приращении его объёма:

$$dW_{m|l} = dW_{m2|l} + dW_{m1|l} = Sdr(w_{m2} - w_{m1}) = Sdr[(H_2 B_2 / 2) - (H_1 B_1 / 2)] \leftrightarrow$$

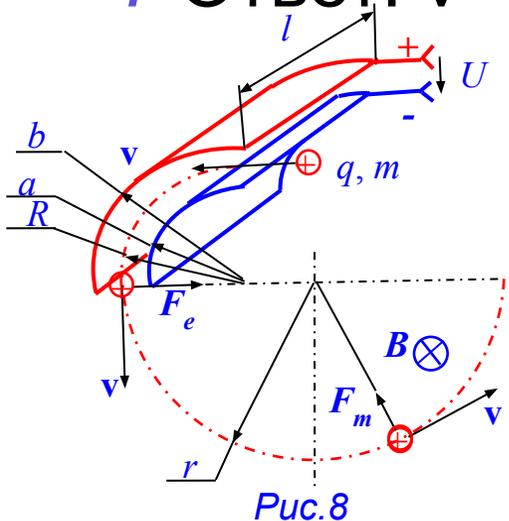
$$\leftrightarrow P = (H_2 B_2 / 2) - (H_1 B_1 / 2), \quad (17)$$

где  $Sdr$  - элементарное  $dV$  приращение объёма соленоида с его  $S$  площадью цилиндрической боковой поверхности при увеличении  $r$  радиуса на  $dr$  элементарное приращение;  $H_1$ ,  $H_2$  и  $B_1$ ,  $B_2$  - векторы напряжённости и индукции магнитного поля соответственно вне и внутри соленоида;  $P$  - магнитное давление на  $S$  площадь, вызванное равнодействующей силой от векторов  $F_2$  силы Ампера и  $F_1$  силы упругости.

## Задача №2.417



Нерелятивистская заряженная частица пролетает электрическое поле цилиндрического конденсатора и затем попадает в однородное поперечное магнитное поле с индукцией  $B$ . В конденсаторе частица движется по дуге окружности, в магнитном поле – по полуокружности радиуса  $r$ . Разность потенциалов на конденсаторе  $U$ , радиусы обкладок  $a$  и  $b$ , причём  $a < b$ . Найти скорость частицы и её удельный заряд  $q/m$ . Дано:  $B$ ,  $a < b$ ,  $U/v = ?$   $q/m = ?$  Ответ:  $v = U/rB \ln(b/a)$ ,  $q/m = U/r^2 B^2 \ln(b/a)$ . **Решение**



Согласно теореме *Гаусса*  $D_r$  проекция вектора  $D_r$  электрического смещения на направление  $r$  радиуса – вектора для цилиндрического поля  $D$  вектора между обкладками конденсатора:



$$D_r 2\pi R l = UC \leftrightarrow D_r 2\pi r l = U 2\pi \epsilon_0 \epsilon l / \ln(b/a) \leftrightarrow D_r = U \epsilon_0 \epsilon / r \ln(b/a), (18)$$

где  $S = 2\pi R l$  – площадь боковой поверхности воображаемого цилиндра, часть которого пролетает нерелятивистская заряженная

частица по окружности  $R$  радиусом;  $C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon l / \ln(b/a)$  - емкость цилиндрического конденсатора с  $l$  длиной обкладок, к которым

приложено постоянное  $U$  напряжение. В однородном изотропном

диэлектрике  $D = \epsilon \epsilon_0 E$ , поэтому:  $E_r = U \epsilon_0 \epsilon / \epsilon_0 R \ln(b/a) = U / R \ln(b/a)$ . (19)

Модуль  $F_e$  вектора  $F_e$  электрической силы, являющийся модулем  $F_{цс}$  центробежной силы при движении нерелятивистской частицы

с  $q$  зарядом,  $m$  массой по окружности  $R$  радиусом:  $F_e = F_{цс} \leftrightarrow$

$$\leftrightarrow q E_r = m v^2 / r \leftrightarrow q U / r \ln(b/a) = m v^2 / r \leftrightarrow v^2 = \frac{q U}{m \ln b/a}, (20)$$

где  $v$  – линейная скорость вращения этой частицы.

После попадания частицы  $q$  зарядом,  $m$  массой в

однородное магнитное поле, модуль которого равен  $B$ ,



а вектор направлен перпендикулярно  $\mathbf{v}$  вектору скорости, на эту частицу со стороны магнитного поля действует

вектор  $\mathbf{F}_m$  силы *Лоренца*, являющийся центростремительной силой при движении нерелятивистской частицы с  $q$  зарядом,  $m$  массой по окружности  $r$  радиусом: 
$$\mathbf{F}_m = F_{\text{цс}} \leftrightarrow Bvq = mv^2/r \leftrightarrow v = (q/m)Br. \quad (21)$$

Из двух уравнений, в которых неизвестны  $q/m$  удельный заряд нерелятивистской частицы  $q$  зарядом,  $m$  массой и её  $v$  скорость:

$$\frac{q}{m} = \frac{U}{B^2 r^2 \ln b/a}; v = \frac{U}{Br \ln b/a}. \quad (22)$$

## Задача №2.433



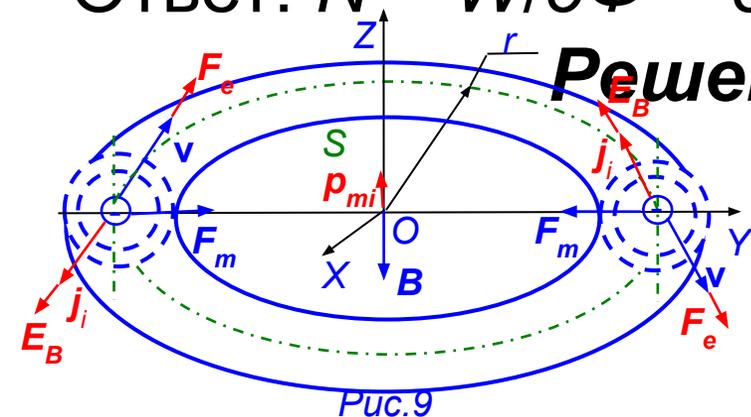
В бетатроне магнитный поток внутри равновесной орбиты радиуса  $r = 25 \text{ см}$  возрастает за время ускорения практически с постоянной скоростью  $d\Phi/dt = 5,0 \text{ Вб/с}$ . При этом электроны приобретают энергию  $W = 25 \text{ Мэв}$ . Найти число оборотов, совершенных электроном за время ускорения, и соответствующее значение пройденного пути.

Ответ:  $N = W/e\Phi = 5 \cdot 10^6$  оборотов,  $s = 2\pi rN = 8 \cdot 10^3 \text{ км}$ .

**Решение.** Дано:  $r$ ,  $d\Phi/dt$ ,  $W / N = ?$   $s = ?$

Согласно закону **Фарадея ЭДС** индукции  $E_i$  в проводящем контуре, образованном движущимися электронами, на который **"натянута"** поверхность

$S$  площадью при наличии изменяющегося со скоростью  $d\Phi_m/dt$  во  $t$  времени внешнего  $\Phi_m$  магнитного потока,



пронизывающего эту поверхность:

$$E_i = - d\Phi_m / dt. \quad (23)$$



ЭДС индукции  $E_i$  определяется циркуляцией вектора  $E_B$  напряжённости вихревого электрического поля по окружности  $2\pi r$  длиной, по которой движутся электроны, вследствие наличия вектора  $F_m$  силы Лоренца, являющейся центробежной силой:

$$E_i = \int_{2\pi r} E_B dl. \quad \circ \quad (24)$$

Модуль  $E_B$  вектора  $E_B$  напряжённости вихревого электрического поля из (23), (24):  $E_B 2\pi r = d\Phi_m / dt \leftrightarrow E_B = (d\Phi_m / dt) / 2\pi r. \quad (25)$

Модуль  $F_e$  вектора  $F_e$  силы, действующего на  $e$  электрон, вследствие наличия вихревого электрического поля с модулем  $E_B$  вектора  $E_B$  его напряжённости:

$$F_e = eE_B = e(d\Phi_m / dt) / 2\pi r. \quad (26)$$

Согласно уравнению изменения механической

энергии приращение  $\Delta W_k$  кинетической энергии  $e$  электрона



равно работе  $A_{cm}$  сторонней силы, которая равна работе вектора  $F_e$  силы на длине  $2\pi r N$  пути при ускоренном вращении  $e$  электрона с  $N$  количеством оборотов по окружности  $2\pi r$  длиной:  $\Delta W_k = F_e 2\pi r N \leftrightarrow$

$$\begin{aligned} \leftrightarrow \Delta W_k &= e(d\Phi_m/dt)2\pi r N/2\pi r \leftrightarrow N = \Delta W_k/e(d\Phi_m/dt) = \\ &= 25 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,0 \text{ [Дж} \cdot \text{с/Кл} \cdot \text{Вб]} = \\ &= 5 \cdot 10^6 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{А} / \text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}] = 5 \cdot 10^6 \text{ об.} \end{aligned} \quad (27)$$

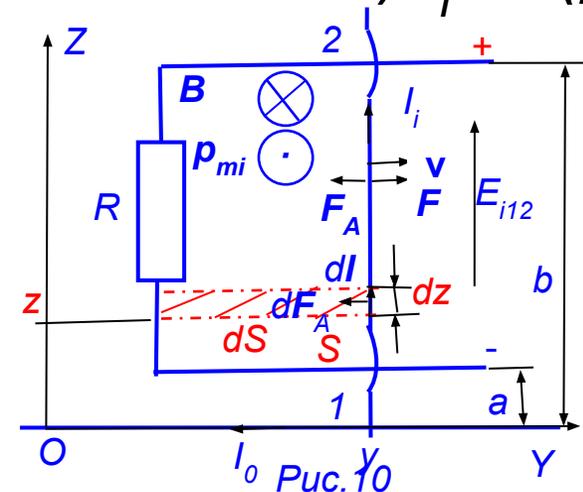
Пройденный  $s$  путь при ускоренном вращении  $e$  электрона с  $N$  количеством оборотов по окружности  $2\pi r$  длиной:

$$s = 2\pi r N = 6,28 \cdot 0,25 \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ [м]} \approx 8 \cdot 10^3 \text{ км.} \quad (28)$$

## Задача №2.325



На расстоянии  $a$  и  $b$  от длинного прямого проводника с постоянным током  $I_0$  расположены два параллельных ему провода, замкнутых на одном конце сопротивлением  $R$ . По проводам без трения перемещают с постоянной скоростью  $v$  стержень-перемычку. Пренебрегая сопротивлением проводов и стержня, а также магнитным полем индукционного тока, найти: а) индукционный ток в стержне; б) силу, нужную для поддержания постоянства скорости. Ответ: а)  $I_i = (\mu_0 I_0 v / 2\pi R) \ln(b/a)$ ; б)  $F = (\mu_0 I_0 / 2\pi)^2 \ln^2(b/a) \cdot v / R$ .



**Решение.** Дано:  $a, b, R, I_0 / I_i = ? F_A = ?$   
Согласно правилу **Ленца** при увеличивающейся во  $t$  времени поверхности  $S$  площадью, охватываемой проводящим контуром,



вектор  $\mathbf{p}_{mi}$  магнитного момента индукционного тока  $I_i$  силой противонаправлен вектору  $\mathbf{B}$  индукции внешнего магнитного поля, если  $\Phi_m$  поток индукции этого поля, пересекающего  $S$  площадь, увеличивается во времени, т.е. при  $d\Phi_m/dt > 0$  ЭДС индукции  $E_i < 0$ . Поэтому на *рис. 10* вектор  $\mathbf{p}_{mi}$  магнитного момента противонаправлен вектору  $\mathbf{B}$  индукции внешнего магнитного поля, индукционный ток  $I_i$  силой по правилу "буравчика" направлен против "часовой стрелки", а ЭДС индукции  $E_i$  направлена в проводящем контуре от нижнего к верхнему проводнику. Модуль  $B$  вектора  $\mathbf{B}$  магнитной индукции поля, пересекающего в вакууме охватываемой проводящим контуром поверхность  $S$  площадью и находящегося на  $z$  расстоянии от длинного прямого проводника с током  $I_0$  силой:  $B = \mu_0 I_0 / 2\pi z$ . (29)

Поток  $d\Phi_m$  магнитной индукции через элементарную поверхность  $dS$  площадью  $y$  длиной и  $dz$  шириной:

$$d\Phi_m = B y dz \leftrightarrow d\Phi_m = \mu_0 I_0 y dz / 2\pi z. \quad (30)$$



Поток  $\Phi_m$  магнитной индукции через поверхность  $S$  площадью, охватываемой проводящим контуром  $y$  длиной и  $b - a$  шириной:

$$\Phi_m = \int_a^b d\Phi_m \leftrightarrow \Phi_m = \int_a^b \frac{\mu_0 I_0 y dz}{2\pi z} = \frac{\mu_0 I_0 y}{2\pi} \ln b/a. \quad (31)$$

Согласно закону *Фарадея ЭДС* индукции  $E_{i12}$  между 1-2 участками стержня-перемычки, движущейся с  $v$  вектором скорости:

$$E_{i12} = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \frac{dy}{dt} \ln b/a = -\frac{\mu_0 I_0 v}{2\pi} \ln b/a, \quad (32)$$

где  $v = dy/dt$  – постоянная скорость перемещения стержня - перемычки по  $OY$  оси. Индукционный ток  $I_i$  силой в нём:

$$I_i = \frac{|E_{i12}|}{R} = \frac{\mu_0 I_0 v}{2\pi R} \ln b/a, \quad (33)$$

где  $R$  – сопротивление резистора, замыкающего два параллельных провода на левом конце контура.

Модуль  $dF_A$  элементарного вектора  $dF_A$  силы *Ампера*,



действующего на проводник с током  $I_i$  силой и малой  $dl$  шириной, направлен перпендикулярно к плоскости, образованной векторами  $dl$  и  $B$  индукции внешнего магнитного поля, так, что из конца этого элементарного вектора  $dF_A$  силы **Ампера** вращение по кратчайшему расстоянию от направления вектора  $dl$  к направлению вектора  $B$  индукции внешнего магнитного поля видно происходящим против **"часовой стрелки"**:

$$dF_A = I_i [dl B] \leftrightarrow dF_A = I_i B dz = \frac{(\mu_0 I_0)^2 v}{(2\pi)^2 R} \ln \frac{b}{a} \frac{dz}{z}. \quad (34)$$

Модуль  $F_A$  вектора  $F_A$  силы **Ампера**, действующего на проводник с током  $I_i$  силой и  $b - a$  шириной:

$$F_A = \int_a^b dF_A \leftrightarrow F_A = \int_a^b \frac{(\mu_0 I_0)^2 v}{(2\pi)^2 R} \ln \frac{b}{a} \frac{dz}{z} = \frac{(\mu_0 I_0)^2 v}{(2\pi)^2 R} (\ln \frac{b}{a})^2. \quad (35)$$

Вектор  $F$  уравновешивающей силы для постоянной скорости  $v$  движения стержня-перемычки, равен по модулю и противоположен по направлению вектору  $F_A$  силы **Ампера**.

## Задача №2.329



Плоская спираль с большим числом витков  $N$ , плотно прилегающих друг к другу, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости спирали. Наружный радиус витков спирали равен  $a$ . Индукция поля изменяется во времени по закону  $B = B_0 \sin \omega t$ , где  $B_0$  и  $\omega$  – постоянные. Найти амплитудное значение ЭДС индукции в спирали.

Ответ:  $E_{im} = \pi a^2 N \omega B_0 / 3$ . **Решение.** Дано:  $N, a, B = B_0 \sin \omega t / E_{im} = ?$

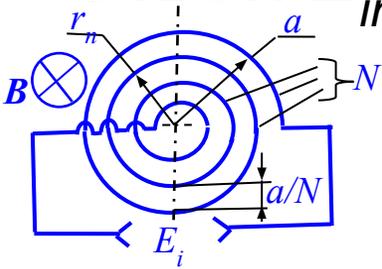


Рис.11

Радиус  $r_n$   $n$ -го витка  $a/N$  шириной с учётом их плотного прилегания друг к другу:  $r_n = (a/N)n$ , (36)

где  $n = 1, 2, \dots, N$  – номер витка.

Площадь  $S_n$  круга с  $r_n$  радиусом:  $S_n = \pi r_n^2 = \pi (an/N)^2$ . (37)

Поток  $\Phi_{mn}$  магнитной индукции через площадь  $S_n$  круга, охватываемой  $n$ -ым витком спирали:

$$\Phi_{mn} = B_0 \pi (an/N)^2 \sin \omega t. \quad (38)$$

Согласно закону *Фарадея* амплитуда  $E_{0n}$  ЭДС индукции, возникающей в  $n$ -ом витке спирали:

$$E_n = - d\Phi_m / dt = - B_0 \pi (an/N)^2 \omega \cos \omega t \leftrightarrow E_{0n} = B_0 \pi (an/N)^2 \omega. \quad (39)$$

Результирующая  $E_{0\Sigma}$  амплитуда ЭДС индукции, возникающая на выводах спирали, от сложения всех амплитуд в её  $N$  витках:

$$E_{0\Sigma} = E_{01} + E_{02} + \dots + E_{0n} + \dots + E_{0N} = B_0 \omega \frac{\pi a^2}{N^2} (1^2 + 2^2 + \dots + n^2 + \dots + N^2) \leftrightarrow \quad (40)$$

$$\leftrightarrow E_{0\Sigma} = B_0 \omega \frac{\pi a^2}{N^2} \frac{N(N+1)(2N+1)}{6} \approx B_0 \omega \frac{\pi a^2 N}{3},$$

где  $(1^2 + 2^2 + \dots + n^2 + \dots + N^2) = \frac{N(N+1)(2N+1)}{6} \approx \frac{N^3}{3} - \quad (41)$

- сумма конечного числового ряда при  $N \gg 1$ .

# Задача №2.374



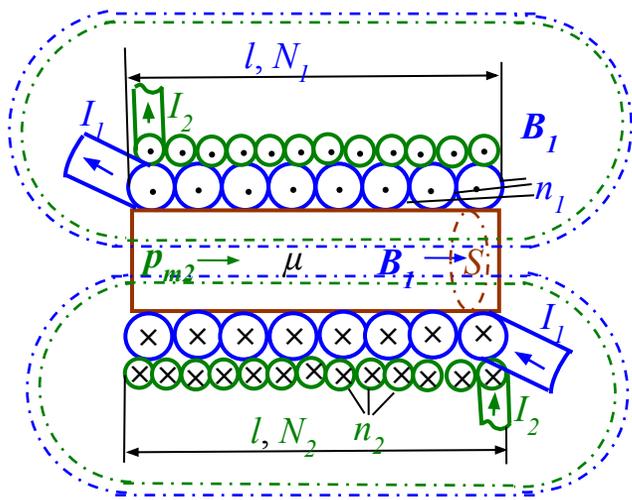
Два соленоида одинаковой длины и почти одинакового сечения вставлены один в другой. Найти их взаимную индуктивность, если их индуктивности равны  $L_1$  и  $L_2$ .

Ответ:  $L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$ .

**Решение.** Дано:  $L_1, L_2 / L_{12} = ? L_{21} = ?$

Внутренний и внешний соленоиды имеют одинаковый  $V = IS$  объём, количество  $n_1, n_2$  витков на единицу их равной  $l$  длины, заполнен магнетиком с  $\mu$  магнитной проницаемостью, поэтому обладают  $L_1, L_2$  индуктивностями:

$$L_1 = \mu_0 \mu n_1^2 V; L_2 = \mu_0 \mu n_2^2 V. \quad (42)$$



$dB_1/dt < 0$   
Рис.12

Модуль  $B_1$  вектора  $B_1$  индукции магнитного поля,

перпендикулярного поверхности  $S$  площадью поперечного сечения внутреннего соленоида с током  $I_1$  силой:  $B_1 = \mu\mu_0 n_1 I_1$ . (43)

Равные потоки  $\Phi_1 = \Phi_2$  магнитной индукции через поверхность  $S$  площадью поперечного сечения внутреннего и внешнего

соленоидов:  $\Phi_1 = \Phi_2 = B_1 S = \mu\mu_0 n_1 I_1 S$ . (44)

Потокосцепление  $\Psi_{21}$  внешнего соленоида:

$$\Psi_{21} = \Phi_2 N_2 = \mu\mu_0 n_1 I_1 S n_2 l, \quad (45)$$

где  $N_2 = n_2 l$  – количество витков на  $l$  длине этого соленоида.

Потокосцепление  $\Psi_{21}$  внешнего соленоида пропорционально току

$I_1$  силой во внутреннем соленоиде:  $\Psi_{21} = L_{21} I_1 \leftrightarrow$

$$\leftrightarrow \mu\mu_0 n_1 I_1 S n_2 l = L_{21} I_1 \leftrightarrow L_{21} = \mu\mu_0 n_1 S n_2 l \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow L_{21} = \mu\mu_0 n_1 S n_2 l \leftrightarrow L_{21} = n_1 (\mu\mu_0 S l)^{1/2} n_2 (\mu\mu_0 S l)^{1/2} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow L_{21} = n_1(\mu\mu_0 V)^{1/2} n_2(\mu\mu_0 V)^{1/2} \leftrightarrow L_{21} = L_{12} = (L_1 L_2)^{1/2}, \quad (46)$$

где  $L_{21}$  - коэффициент взаимной индуктивности **внутреннего** соленоида с **внешним**, равный согласно теореме взаимности  $L_{12}$  коэффициенту взаимной индуктивности **внешнего** соленоида с **внутренним**.

**Дома: Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Бином, 1998÷2010. №№ 2.377, 2.375**  
**Спасибо за внимание!**