# ФИЗИКА: ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

**МОДУЛЬ 4**

Рабочая тетрадь
для студентов, обучающихся по дистанционной технологии

Екатеринбург 2006

УДК 373:53

Составители М.Г. Валишев, Г.В. Сакун
Научный редактор проф., д-р. физ.-мат. наук А.А. Повзнер

**ФИЗИКА: ЭЛЕКТРОМАГНТИЗМ: Рабочая тетрадь.** / Ф.А. Сидоренко, З.А. Истомина, Т.И. Папушина. Екатеринбург: ООО «Изд-во УМЦ УПИ», 2006. 32 с.

Данная рабочая тетрадь по разделу «Электромагнетизм» предназначена для оказания помощи студентам, обучающимся по дистанционной технологии в изучении курса «Общая физика»; составлена в соответствии с рабочей программой курса «Общая физика» и образовательными стандартами. Изучение материала конспекта лекций следует вести параллельно с решением задач из рабочей тетради.

Библиогр.: 2 назв.

Подготовлено кафедрой физики ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.

## Список основных формул

1. Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0\left[Id\vec{l} \times \vec{r}\right]}{4\pi r^3}, \quad dB = \frac{\mu\mu_0 Idl\sin\alpha}{4\pi r^2}$$

$d\vec{B}$ - индукция магнитного поля, создаваемого элементом тока $Id\vec{l}$;

$\vec{r}$ - радиус-вектор, проведенный от элемента тока в рассматриваемую точку пространства;

$\alpha$ - угол между векторами $Id\vec{l}$ и $\vec{r}$;

$\mu$ - относительная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

2. Принцип суперпозиции для магнитных полей

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{N}\vec{B}_i, \qquad \vec{B} = \int d\vec{B}.$$

3. Модуль вектора магнитной индукции на оси (B) и в центре ($B_0$) кольцевого тока

$$B = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2\left(R^2 + a^2\right)^{3/2}}, \qquad B_0 = \frac{\mu\mu_0 I}{2R},$$

где R – радиус кольца;

a – расстояние от центра кольца до рассматриваемой точки, находящейся на оси кольцевого тока.

4. Модуль вектора магнитной индукции, создаваемого прямолинейным отрезком проводника конечной длины с током

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right),$$

где r – длина перпендикуляра, опущенного из рассматриваемой точки на проводник или его продолжение;

$\alpha_1$, $\alpha_2$ – углы между первым и последним элементами тока и радиус-векторами, проведенных от них в рассматриваемую точку.

Для бесконечно длинного проводника с током

$$\alpha_1 \to 0, \;\; \alpha_2 \to 180^0 \qquad B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}.$$

5. Теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$.

$$\oint\limits_{(r)} Bdl\cos\alpha = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^{N} I_i.$$

6. Модуль вектора магнитной индукции поля, создаваемого бесконечно длинным соленоидом или длинным соленоидом (длина соленоида значительно больше диаметра витков)

   $B = \mu\mu_0 In$,

   где $n = N/l$ – число витков на единицу длины соленоида.

7. Закон Ампера, определяющий силу $d\vec{F}$, действующую на элемент тока со стороны магнитного поля

   $$d\vec{F} = \left[Id\vec{l} \times \vec{B}\right], \qquad dF = IBdl\sin\alpha, \qquad \alpha = \left(Id\vec{l}\ \widehat{,}\ \vec{B}\right)$$

   Для прямолинейного проводника длины l с током I, находящимся в однородном магнитном поле

   $F_A = IBl\sin\alpha$.

8. Магнитный момент $\vec{p}_m$ контура площади S с током I

   $$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad p_m = IS,$$

   где $\vec{n}$ - вектор единичной длины, перпендикулярный к плоскости контура, его направление связано с направлением тока правилом правого буравчика.

9. Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле

   $$W = -\left(\vec{p}_m\vec{B}\right) = -p_m B\cos\alpha, \qquad \alpha = \left(\vec{p}_m\ \widehat{,}\ \vec{B}\right).$$

10. Сила Лоренца, действующая на заряд q, движущийся со скоростью $\vec{V}$ в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$.

    $$\vec{F}_л = q\left[\vec{V} \times \vec{B}\right], \qquad F = |q|VB\sin\alpha, \qquad \alpha = \left(\vec{V}\ \widehat{,}\ \vec{B}\right).$$

11. Параметры винтовой траектории (радиус R, период T обращения, шаг h), описываемой частицей в общем случае в магнитном поле.

    $$R = \frac{mV\sin\alpha}{|q|B}, \qquad T = \frac{2\pi m}{|q|B}, \qquad h = VT\cos\alpha.$$

12. Магнитный поток $\Phi$ через плоский контур пощади S
   а) однородное поле $\Phi = BS\cos\alpha$
   б) неоднородное поле $\Phi = \int\limits_S BdS\cos\alpha$,
   где $\alpha$ - угол между вектором нормали $\vec{n}$ к плоскости контура и вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

13. Потокосцепление $\Psi$ катушки (соленоида, тороида)
   $\Psi = N\Phi$,
   где N – число витков,
   $\Phi$- магнитный поток, пронизывающий один виток.

14. Работа сил магнитного поля по перемещению контура с током I в магнитном поле
   $A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi$,
   где $\Phi_1$, $\Phi_2$ – магнитные потоки, пронизывающие плоскость контура в конечном ($\Phi_2$) и начальном ($\Phi_1$) состояниях.

15. Закон Фарадея для электромагнитной индукции
   $$\varepsilon_i = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$
   где $\varepsilon_i$ – электродвижущая сила (ЭДС) индукции, возникающая в проводящем контуре.

16. ЭДС индукции, возникающая в рамке, содержащей N витков, площадью S каждый, вращающейся с угловой скоростью $\omega$ в однородном магнитном поле с индукцией B (ось вращения перпендикулярна вектору $\vec{B}$)
   $\varepsilon_i = NBS\omega \sin\omega t$.

17. ЭДС индукции (разность потенциалов U) на концах проводника длины l, движущегося со скоростью V в однородном магнитнои поле
   $U = BlV \sin\alpha$, $\alpha = \left(\vec{V} \,\hat{,}\, \vec{B}\right)$.

18. Заряд q, протекающий в контуре при изменении потокосцепления $\Psi$ в контуре
   $$q = -\frac{\Delta\psi}{R} = \frac{\psi_1 - \psi_2}{R},$$
   где R – сопротивление контура.

19. Потокосцепление $\Psi_S$ самоиндукции для контура индуктивности L, по которому протекает ток силой I
$\Psi_S = LI.$

20. Индуктивность длинного соленоида
$L = \mu\mu_0 n^2 V,$
где V – объем, занимаемый соленоидом;
$n = N/l$ – число витков на единицу длины соленоида.

21. Энергия магнитного поля контура индуктивности L с током I
$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

22. Объемная плотность энергии магнитного поля
$$\varpi = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

23. ЭДС самоиндукции
$$\varepsilon_S = -\frac{d\Psi_S}{dt} = -L\frac{dI}{dt}.$$

24. Зависимость силы тока I, протекающего по цепи, содержащей сопротивление R и индуктивность L, от времени t при ее замыкании (а) и размыкании (б).

а) $I = I_0\left(1 - e^{-\beta t}\right), \quad \beta = \frac{R}{L}.$

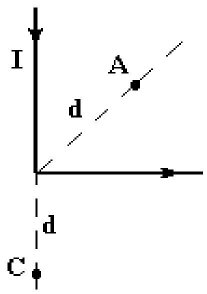
б) $I = I_0 e^{-\beta t}, \quad \beta = \frac{R}{L},$

где $I_0$ – сила постоянного тока, протекающего по цепи.

25. Потокосцепление взаимной индукции контура 2 при протекании по контуру 1 тока силой $I_1$.
$\psi_{21} = M_{21} I_1,$
где $M_{21}$ – взаимная индуктивность двух контуров.

## Примеры решения задач

Пример 1.




Бесконечно длинный прямой проводник, по которому течет ток I = 5,0 А согнут под прямым углом. Найти индукцию магнитного поля на расстоянии d = 10см от вершины угла в точках, лежащих на биссектрисе прямого угла (точка А) и на продолжении одной из сторон (точка С).

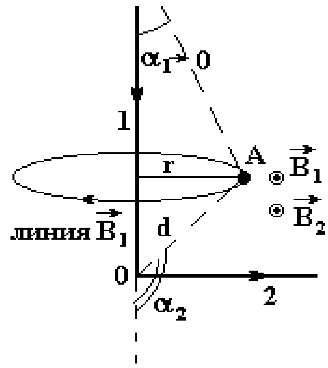
Дано

I = 5,0 А

d = 10 см = 0,10 м

$B_A$ - ?

$B_C$ - ?




Решение . 1) Точка А. Согнутый под прямым углом проводник можно разбить на два длинных прямолинейных проводника 1 и 2, соединенных в точке О. Тогда, в соответствии с принципом суперпозиции магнитных полей, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в точке А равен векторной сумме векторов магнитной индукции $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ полей, создаваемых проводниками 1 и 2 с током, т.е.

$$\vec{B}_A = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 .$$

Для определения направления вектора $\vec{B}_1$ в точке А нужно провести линию магнитной индукции проводника 1 с током, проходящую через точку А – это окружность радиуса r, лежащая в плоскости перпендикулярной к проводнику 1. Направление линии $\vec{B}_1$ связано правилом правого буравчика с направлением тока в проводнике. Вектор $\vec{B}_1$ будет направлен по касательной к линии, т.е. направлен в точке А перпендикулярно к плоскости чертежа, к нам. Также будет направлен и вектор $\vec{B}_2$. Следовательно, для модуля вектора $\vec{B}_A$ можно записать

$$B_A = B_1 + B_2 .$$

Модуль вектора $B_1$ найдем, воспользовавшись формулой

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right).$$

В данном случае $\alpha_1 \to 0$ (проводник бесконечно длинный), $\alpha_2 = 135^0$.

$r = d\cos45^0 = \dfrac{d\sqrt{2}}{2}$, $\mu=1$.

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi\frac{d\sqrt{2}}{2}}\left(\cos0^0 - \cos135^0\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi d\sqrt{2}}\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right).$$

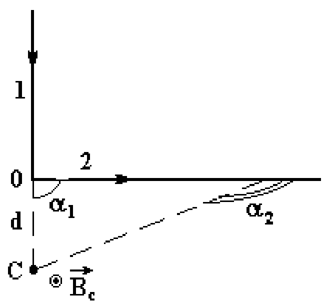
Проводя аналогичные расчеты для модуля вектора $B_2$ получим.

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi\frac{d\sqrt{2}}{2}}\left(\cos45^0 - \cos180^0\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi d\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}+1\right).$$

$$B_A = B_1 + B_2 = 2\frac{\mu_0 I}{2\pi d\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}+1\right) = \frac{\mu_0 I}{\pi d\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}+1\right).$$

$$B_A = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot5}{\pi\cdot0{,}1\cdot\sqrt{2}}\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 2{,}4\cdot10^{-5}\,\text{Тл}.$$

<u>2) Точка С.</u> Рассмотрим вектор магнитной индукции в точке С.




Можно показать, что в точках, лежащих на продолжении прямолинейного проводника с током магнитное поле отсутствует. Поэтому проводник 1 в точке С магнитного поля не создает. Действительно, согласно закону Био-Савара-Лапласа (формула 1) все элементы тока проводника 1 создают в точке С магнитное поле, равное нулю ($dB = 0$), так как угол $\alpha$ для них равен нулю и суммарное магнитное поле проводника 1 в точке С равно нулю.

Следовательно

$$\vec{B}_C = \vec{B}_2, \quad B_C = B_2.$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \; r = d, \; \alpha_1 = 90^0, \; \alpha_2 = 180^0.$$

$$B_C = B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi d} = 5{,}0 \cdot 10^{-6}\,\text{Тл}.$$

Ответ: $B_A = 2{,}4 \cdot 10^{-5}\,\text{Тл}, \; B_C = 5{,}0 \cdot 10^{-6}\,\text{Тл}$.

Пример 2.

Два прямолинейных бесконечно длинных проводника скрещены под прямым углом (см. рисунок). По проводниккам текут токи $I_1 = 4{,}0\text{А}, \; I_2 = 3{,}0\text{А}$. Расстояния $OA = AC = r = 10\text{см}$. Найдите модуль вектора магнитной индукции поля проводников в точке А.

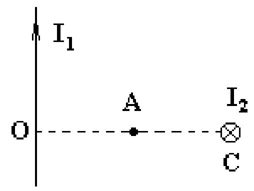
Дано:

$I_1 = 4{,}0\text{А}$

$I_2 = 3{,}0\text{А}$

$OA = AC = r = 0{,}01\text{м}$

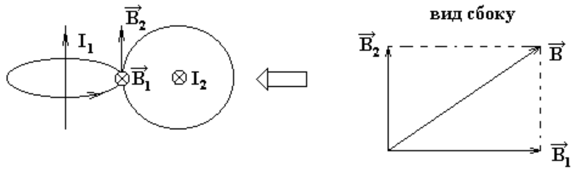
B - ?




Решение. По принципу суперпозиции полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

где $\vec{B}_1, \vec{B}_2$ - вектора индукций магнитных полей, создаваемых проводниками с током $I_1$ и $I_2$ соответственно.




Для определения направлений векторов $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ проводим линии индукции для проводников 1 и 2, определяем их направления по правилу правого буравчика, тогда вектора $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ будут направлены по касательной к линиям индукции (см. рисунок) – вектор $\vec{B}_1$ направлен перпендикулярно к плоскости рисунка, от нас, а вектор $\vec{B}_2$ располагается в плоскости рисунка и направлен вверх.

Модуль вектора $\vec{B}$ найдем по формуле

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2},\ B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r},\ B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}.$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r}\sqrt{I_1^2 + I_2^2}$$

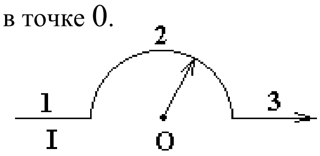
$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 10^{-2}}\sqrt{16+9} = 5 \cdot 10^{-5}\,\text{Тл}.$$

Ответ : $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл .

Пример 3.

Бесконечно длинный проводник с током $I = 10A$ имеет изгиб радиусом $R = 10$см . Найти индукцию магнитного поля в точке 0.

| Дано : |
|---|
| $I = 10A$ |
| $R = 0{,}1м$ |
| B - ? |




Решение . Разбиваем проводник на три части – два прямолинейных проводника 1 и 3 и полукольцо 2. Так как точка 0 находится на продолжении прямолинейных проводников 1 и 3, то они вклада в вектор индукции не дают (см. пример 1). Вектор $\vec{B}$ в точке 0 определяется частью кольцевого тока, а именно его половиной.

$$B = \frac{1}{2}\frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu_0 I}{4R}$$

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{4 \cdot 0{,}1} = 3{,}1 \cdot 10^{-5}\,\text{Тл}.$$

Направление вектора $\vec{B}$ связано правилом правого буравчика с направлением части кольцевого тока – он направлен в плоскость рисунка, от нас.

Ответ : $B = 3{,}1 \cdot 10^{-5}$ Тл .

Пример 4.

По бесконечно длинному прямому проводнику радиусом R=2,0см течет ток силой I=10A. Найти индукцию магнитного поля в точках на расстояниях $r_1$ = 1,0 см и $r_2$ = 3,0 см от оси провода. Плотность тока по сечению проводника постоянная.

Дано

$I = 10$ А

$R = 2$ см $= 0{,}02$ м

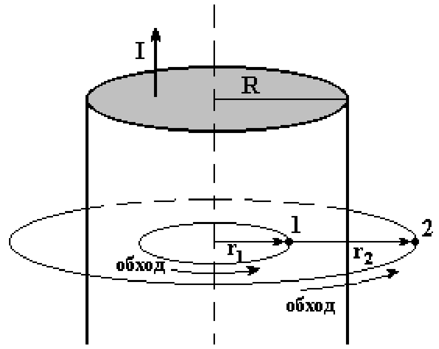
$r_1 = 1{,}0$ см $= 0{,}01$м

$r_2 = 3{,}0$ см $= 0{,}03$ м

---

$B_1$ - ?

$B_2$ - ?




<u>Решение .</u> Для определения вектора магнитной индукции воспользуемся теоремой о циркуляции вектора $\vec{B}$ (формула 5):

$$\oint\limits_{(\Gamma)} B dl \cos\alpha = \mu\mu_0 \sum_{i=1}^{N} I_i .$$

Рассмотрим сначала точку 1, находящуюся внутри проводника. На первом этапе из симметрии задачи можно установить, что линии $\vec{B}$ магнитного поля представляют собой окружности, лежащие в плоскости перпендикулярной к проводнику, с центром на оси проводника. Их направление связано правилом правого буравчика с направлением тока в проводнике. Вектор $\vec{B}$ будет направлен по касательной в каждой точке линии магнитной индукции. Следовательно, мы знаем направление вектора $\vec{B}$ в каждой точке пространства. Из симметрии задачи (осевая симметрия) также следует, что на одинаковом расстоянии от оси проводника (на цилиндрических поверхностях) модуль вектора $\vec{B}$ будет постоянным. Остается найти его модуль.

На втором этапе выбираем контур (Г), совпадающим с линией $\vec{B}$, проходящей через точку 1, т.е. в виде окружности радиуса $r_1$. Направление обхода контура Г выбираем совпадающим с направлением линии $\vec{B}$. Рассчитаем циркуляцию вектора $\vec{B}$ по данному контуру.

$$\oint\limits_{(\Gamma)} B dl \cos\alpha = \oint\limits_{(\Gamma)} B_1 dl = B_1 \cdot 2\pi r_1 ,$$

где мы учли, что вектор $\vec{B}$ и $d\vec{l}$ параллельны в каждой точке контура и постоянство модуля $\vec{B}$ в каждой точке контура.

На третьем этапе рассчитаем сумму токов, охватываемых контуром Г

$$\sum_{i=1}^{N} I_i = \int\limits_{S} j dS \cos 0^0 = jS = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r_1^2 .$$

Для силы тока выбирается знак «плюс», так как его направление связано с направлением обхода правилом правого буравчика. Поверхность S – это поверхность, опирающаяся на контур (Г). В нашем случае – это площадь круга радиуса $r_1$.

На четвертом этапе по теореме о циркуляции вектора $\vec{B}$ рассчитываем модуль вектора $B_1$.

$$B_1 \cdot 2\pi r_1 = \mu_0 \cdot \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r_1^2$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I \pi r_1^2}{\pi R^2 \cdot 2\pi r_1} = \frac{\mu_0 I r_1}{2\pi R^2}$$

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 0{,}01}{2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 5{,}0 \cdot 10^{-7}\,\text{Тл.}$$

Рассмотрим теперь точку 2, находящуюся вне проводника. Проводя аналогичные расчеты можно записать

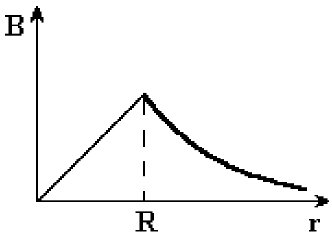
$$\oint_{(\Gamma)} B\,dl \cos\alpha = B_2 \cdot 2\pi r_2$$

$$\sum_{i=1}^{N} I_i = I, \qquad B_2 \cdot 2\pi r_2 = \mu_0 I,$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi \cdot 0{,}03} = 6{,}7 \cdot 10^{-5}\,\text{Тл.}$$

Здесь, на третьем этапе мы учли, что контур (Г) охватывает весь ток I, текущий по контуру.

Итак, внутри проводника модуль вектора B возрастает по линейному закону в зависимости от расстояния r до оси провода, а за его пределами убывает обратно пропорционально r. (см. рисунок).




Ответ: $B_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-7}$ Тл.

$B_2 = 6{,}7 \cdot 10^{-5}$ Тл.

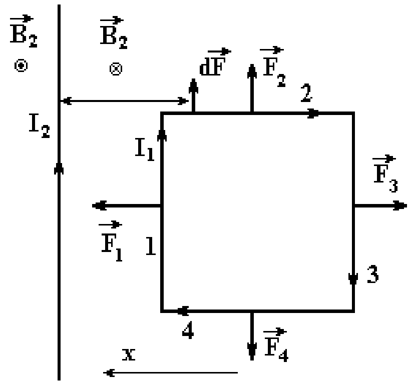
Пример 5.

Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке течет ток $I_1$ = 2,0 А, по проводу – ток $I_2$ = 10 А. Найти силы, действующие на каждую сторону рамки и на рамку в целом, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном l = 2,0 см, сторона рамки a = 2,0 см.

Дано

$I_1$ = 2,0 А
$I_2$ = 10 А
l = 2,0 см
a = 2,0 см

$F_1$-? $F_2$-? $F_3$-? $F_4$-? F-?




Решение . 1) Сила, действующая на рамку с током, равна векторной сумме сил, действующих на каждую сторону:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4.$$

Сила, с которой магнитное поле действует на каждую из сторон рамки, может быть найдена суммированием элементарных сил Ампера, действующих на элементы тока :

$$\vec{F}_i = \int d\vec{F}.$$

Стороны 1 и 3 параллельны прямому проводу и находятся от него на расстояниях l и (l+a), поэтому для них модуль вектора B постоянен по модулю и равен

$$B_{21} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi l}, B_{23} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi(l+a)}$$

Тогда

$$F_1 = \int I_1 B_{21} \sin 90^0 dl = \int I_1 \frac{\mu_0 I_2}{2\pi l} \cdot dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi l} a$$

$$F_3 = \int I_1 B_{23} \sin 90^0 dl = \int I_1 \frac{\mu_0 I_2}{2\pi(l+a)} \cdot dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi(l+a)} a .$$

Силы, действующие на стороны 2 и 4 рамки, противоположны по направлению и равны по модулю. Вдоль каждой из этих сторон вектор $\vec{B}$ непрерывно изменяется по модулю и поэтому.

$$F_2 = F_4 = \int_l^{l+a} I_1 \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} \cdot dr = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \int_l^{l+a} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{l+a}{l}$$

где r – расстояние от проводника до рассматриваемой точки.
Проведем расчет модулей сил, действующих на каждую сторону рамки.

$$F_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0{,}02}{2\pi \cdot 0{,}02} = 4 \cdot 10^{-6} \text{Н}$$

$$F_3 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0{,}02}{2\pi \cdot 0{,}04} = 2 \cdot 10^{-6} \text{Н}$$

$$F_2 = F_4 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10}{2\pi} \cdot \ln \frac{0{,}04}{0{,}02} = 2{,}8 \cdot 10^{-6} \text{Н}$$

Как видно из рисунка, равнодействующая всех сил, приложенных к рамке, направлена к прямому проводнику с током и равна по модулю

$$F = F_1 – F_2 = 4 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Ответ: $F_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ Н, $F_3 = 2 \cdot 10^{-6}$ Н, $F_2 = F_4 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ Н, $F = 2 \cdot 10^{-6}$ Н.

Пример 6.

Круговой контур радиуса R=1,0см, по которому течет ток I=2,0А, находится в однородном магнитном поле с индукцией B=0,1Тл так, что вектор $\vec{p}_м$ магнитного момента контура с током составляет угол $\alpha_1 = 60^0$ с вектором $\vec{B}$. Какую работу A` надо совершить внешним силам, чтобы повернуть контур до угла $\alpha_2 = 90^0$ вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

Дано :

$R = 0{,}01$м

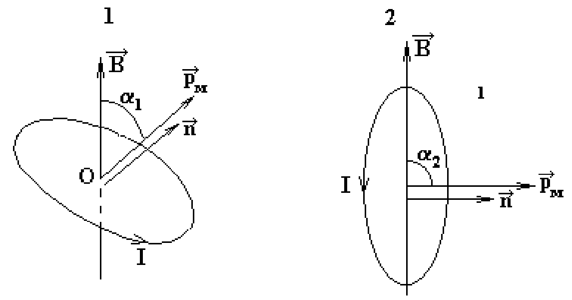
$I = 2{,}0$А

$B = 0{,}1$Тл

$\alpha_1 = 60^0$

$\alpha_2 = 90^0$

A`- ?




Решение. 1 способ: Работа сил магнитного поля по перемещению контура с током определяется следующим таким образом (формула 14)

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1),$$

где $\Phi_1, \Phi_2$ - магнитные потоки, пронизывающие плоскость контура в начальном и в конечном состоянии соотвтственно. Для расчета $\Phi_1$ и $\Phi_2$ воспользуемся формулой 12

$$\Phi = \int_S BdS\cos\alpha = BS\cos\alpha\ ,$$

где учтено, что магнитное поле является однородным, а угол $\alpha$ - это угол между вектором $\vec{B}$ и вектором $\vec{n}$ нормали к плоскости контура (его направление связано с направлением тока правилом правого буравчика).
Тогда

$$\Phi_1 = BS\cos 60^0 = \frac{1}{2}B\pi R^2, \quad \Phi_2 = BS\cos 90^0 = 0$$

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = -\frac{\pi}{2}IBR^2$$

Работа $A`$ внешних сил связана с работой $A$ сил магнитного поля формулой

$$A' = -A = \frac{\pi}{2}IBR^2$$

$$A' = \frac{3{,}14}{2}\cdot 2\cdot 0{,}1\cdot 10^{-2} = 3{,}2\cdot 10^{-3}\ Дж\ .$$

<u>2 способ :</u> Работа внешних сил равна приращению потенциальной энергии контура с током в магнитном поле

$$A' = W_2 - W_1 = \left(-p_м B\cos 90^0\right) - \left(-p_м \cos 60^0\right) =$$

$$= \frac{1}{2}p_м B = \frac{1}{2}ISB = \frac{\pi}{2}IBR^2 = 3{,}2\cdot 10^{-3}\ Дж$$

где мы использовали формулы для потенциальной энергии контура с током в магнитном поле (формула 9), и магнитного момента $\vec{p}_м$ контура с током (формула 8). Вектор $\vec{p}_м$ перпендикулярен плоскости контура, его направление связано с напралением тока правлилом правого буравчика.
<u>Ответ :</u> $A' = 3{,}2\cdot 10^{-3}\ Дж$ .

<u>Пример 7.</u>
В однородном магнитном поле с индукцией B = 2,0 Тл, движется протон. Траектория его движения представляет собой винтовую линию радиуса R = 1,0 мм и шагом h = 6,0 мм. Вычислить кинетическую энергию $W_K$ протона.

Дано

$B = 2{,}0$ Тл

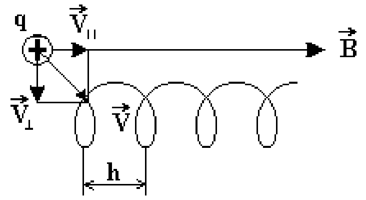
$R = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м

$h = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ м

$m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$W_К$ - ?




Решение. Протон участвует в двух независимых движениях: равномерном и прямолинейном со скоростью $\vec{V}_{\|}$ параллельно линиям индукции магнитного поля и по окружности со скоростью $\vec{V}_{\perp}$ (постоянной по модулю, но непрерывно изменяющейся по направлению) в плоскости перпендикулярной к вектору $\vec{B}$.

Кинетическая энергия протона определяется формулой

$$W_К = \frac{mV^2}{2}, \qquad \text{где } V^2 = V_{\|}^2 + V_{\perp}^2.$$

Для расчета $V_{\|}$ и $V_{\perp}$ воспользуемся формулами для радиуса R, шага h винтовой линии и периода T обращения частицы в магнитном поле (формулы 11):

$$h = V_{\|} \cdot T, \qquad T = \frac{2\pi m}{|q|B}, \qquad R = \frac{mV_{\perp}}{|q|B}$$

$$V_{\|} = \frac{h}{T} = \frac{|q|Bh}{2\pi m}, \qquad V_{\perp} = \frac{|q|BR}{m}$$

Тогда

$$W_К = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2}\left(V_{\|}^2 + V_{\perp}^2\right) = \frac{q^2B^2}{2m}\left(R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}\right).$$

$$W_К = \frac{\left(1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2\right)^2}{2 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}}\left(1{,}0 \cdot 10^{-6} + \frac{36{,}0 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3{,}14^2}\right) = 5{,}9 \cdot 10^{-17} \text{ Дж.}$$

Ответ: $W_К = 5{,}9 \cdot 10^{-17}$ Дж

Пример 8.

Положительно заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов U=104 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое (E=10 кВ/м) и магнитное (B=0,1 Тл) поля. Найти отношение заряда частицы к её массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. Силой тяжести при движении частицы пренебречь.

Дано :

$U = 104 В$

$E = 10 \frac{кВ}{м} = 1{,}0 \cdot 10^4 \frac{В}{м}$

$B = 0{,}1 Тл$

---

$\frac{q}{m}$ - ?

Решение . Отношение заряда частицы к её массе, $\frac{q}{m}$, называется удельным зарядом частицы. Проходя ускоряющую разность потенциалов U, частица прибретает кинетическую энергию. Согласно теореме о кинетической энергии

$$A = \Delta W_k ,$$

где A=qU – работа сил электрического поля, $\Delta W_k = W_{k2} - W_{k1} = \frac{mV^2}{2}$ - изменение кинетической энергии частицы.

Подставляя выражение для A и $\Delta W_k$ получаем :

$$qU = \frac{mV^2}{2} .$$

Отсюда

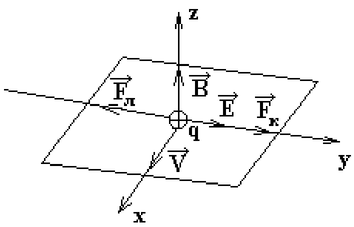
$$\frac{q}{m} = \frac{V^2}{2U} .$$

Скорость частицы найдем, рассматривая её движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. На движущуюся заряженную частицу действуют две силы :

1) Сила Лоренца $\vec{F}_л = q\left[\vec{V} \hat{,} \vec{B}\right]$, направленная перпендикулярно вектору скорости $\vec{V}$ и вектору магнитной индукции $\vec{B}$ ;

2) Кулоновская сила $\vec{F}_k = q\vec{E}$, сонаправленная с вектором напряженности $\vec{E}$ электростатического поля (т.к. частица имеет положительный заряд).

Изобразим направление векторов $\vec{B}, \vec{E}, \vec{V}$ и сил $\vec{F}_Л$ и $\vec{F}_k$ на рисунке.




Частица будет двигаться прямолинейно равномерно в скрещенных полях, если векторная сумма сил, действующих на неё, будет равна нулю,

$$\vec{F}_Л + \vec{F}_k = 0,$$

т.е. $\vec{F}_Л$ и $\vec{F}_k$ должны быть равны по модулю и противоположны по направлению.

В проекции на ось Оу это равенство приобретает вид

$$F_Л - F_k = 0, \quad qE = qVB, \quad V = \frac{E}{B}.$$

Подставим выражение для скорости частицы в полученную выше формулу для удельного заряда частицы

$$\frac{q}{m} = \frac{V^2}{2U} = \frac{E^2}{2B^2U}.$$

Рассчитаем удельный заряд частицы

$$\frac{q}{m} = \frac{10^8}{2 \cdot 0{,}01 \cdot 104} = 4{,}8 \cdot 10^7 \ \frac{Кл}{кг}.$$

Ответ : $\frac{q}{m} = 4{,}8 \cdot 10^7 \ \frac{Кл}{кг}$.

Пример 9.

В однородном магнитном поле с индукцией B=0,4 Тл в плоскости, перпендикулярной линиям индукции поля, вращается стержень длиной l=10см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов U на концах стержня при частоте вращения $n = 16\ c^{-1}$.

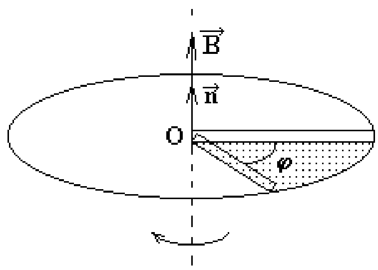
Дано :

$B = 0{,}4Тл$

$l = 10см = 0{,}1м$

$n = 16\ c^{-1}$

$\varphi_1 - \varphi_2$ - ?



Решение . При движении стержня в магнитном поле с течением времени изменяется площадь, захватываемая стержнем :

$$S = \frac{\varphi l^2}{2},$$ где $\varphi$ - угол поворота стержня.

При равномерном вращении угол поворота зависит от времени по следующему соотношению :

$$\varphi = \omega t = 2\pi n \cdot t,$$ где $n$ - частота вращения.

Тогда

$$S = \frac{\cancel{2}\pi n t l^2}{\cancel{2}} = \pi n l t^2.$$

Как видно из полученного соотношения, площадь, захвачиваемая стержнем при вращении, линейно возрастает с течением времени. Следовательно, изменяется поток вектора магнитной индукции через эту поверхность.

$$\Phi = BS\cos\alpha = B \cdot \pi n l t^2,\ \alpha = \left(\vec{B}\,\hat{,}\,\vec{n}\right) = 0\ ,$$

где $\vec{n}$ - вектор нормали к поверхности, захватываемой стержнем при его вращении.

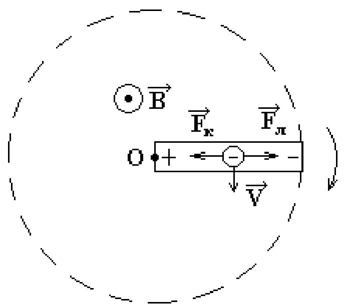
По закону Фарадея для электромагнитной индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(B\pi n l^2 t\right) = -B\pi n l^2.$$

Разность потенциалов, возникающая на концах стержня, численно равна ЭДС индукции $\varepsilon_i$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = B\pi n l^2$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0{,}4 \cdot 3{,}14 \cdot 16 \cdot 0{,}01 = 0{,}2В$$




Возникновение разности потенциалов на концах вращающегося стержня связано с перераспределением заряда в стержне под действием силы Лоренца, являющейся в данном случае сторонней силой. На движущиеся вместе со стержнем свободные электроны будет действовать сила Лоренца, которая вызывает их перемещение вдоль стержня, что приводит к возникновению ЭДС индукции и разности потенциалов на концах стержня. Разделение зарядов происходит до тех пор, пока сила Лоренца не уравновесится кулоновской силой $\vec{F}_k$, действующей на заряды со стороны электрического поля, возникающего внутри проводника.

Ответ : $\varphi_1 - \varphi_2 = 0{,}2В$

Пример 10.

В однородном магнитном поле с индуцией B=1,0Тл находится прмой провод длиной l=20см, концы которого замкнуты вне поля. Сопротивление всей цепи равно R=0,1Ом. Найти силу F, которую нужно приложить к проводу, чтобы перемещать его перпендикулярно линиям индукции со скоростью V=2,5м/с.

Дано :

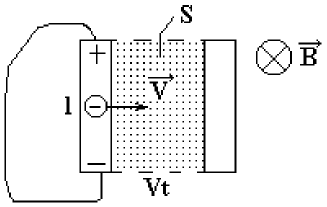
$B = 1{,}0Тл$

$l = 20см = 0{,}2м$

R=0,10 Ом

V=2,5 м/с

F - ?




Решение . При движении проводника в магнитном поле в нем возникает ЭДС индукции $\varepsilon_i$, которую можно определить следующим образом

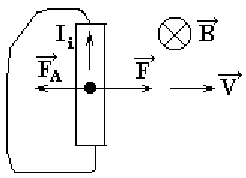
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(BS\cos 0^0\right) = -\frac{d}{dt}\left(BlVt\right) = -BlV,$$

где $S$ - площадь поверхности, которую охватывает проводник при своём движении (см. рисунок).

Так как концы проводника замкнуты гибким проводом, находящимся вне поля, то в контуре возникает электрический ток

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{BlV}{R}.$$

В дальнейшем, знак «—» в формуле, связанный с правилом Ленца, будем опускать.




Направление индукционного тока определяется по направлению движения положительного заряда в замкнутой цепи. На проводник с током со стороны магнитного поля будет действовать сила Ампера, направление которой определяется по правилу левой руки (см. рисунок). Как видно из него, эта сила тормозит движение проводника – она направлена противоположно скорости его движения.

Для равномерного прямолинейного движения проводника необходимо приложить к нему внешнюю силу $\vec{F}$, равную по модулю силе Ампера и противоположно направленную к ней.

$$\vec{F}+\vec{F}_A=0, \quad F=F_A=I_iBl=\frac{BlV}{R}Bl=\frac{B^2l^2V}{R}.$$

Здесь мы использовали формулу (7) для силы Ампера и учли, что угол $\alpha=90^0$.

Рассчитаем модуль силы $F$

$$F=\frac{1\cdot 0{,}04\cdot 2{,}5}{0{,}1}=1\ \text{Н}.$$

<u>Ответ :</u> $F=1$ Н.

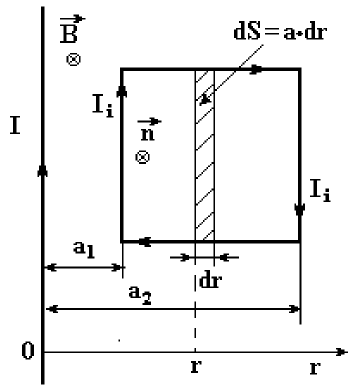
<u>Пример 11.</u>

По длинному прямому проводу течет ток. Вблизи провода расположена рамка из тонкого провода сопротивлением R = 0,02 Ом. Провод лежит в плоскости рамки и параллелен двум ее сторонам, расстояния до которых от провода соответственно равны $a_1$ = 10 см и $a_2$ = 20 см. Найти силу тока в проводе, если при его выключении через рамку протекло количество электричества q = 693 мкКл.

<u>Дано</u>

R = 0,02 Ом
$a_1$ = 0,1 м
$a_2$ = 0,2 м
$q = 693\cdot 10^{-6}$ Кл
$\Phi_2 = 0$

I - ?




<u>Решение .</u> При изменении потокосцепления, пронизывающего рамку, в ней возникает ЭДС индукции и, следовательно, индукционный ток $I_i$, направление которого определяется правилом Ленца (см. рисунок).

Заряд, протекающий по контуру при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$q=\frac{\Phi_1-\Phi_2}{R}.$$

При выключении тока в проводнике исчезает магнитное поле, следовательно, $\Phi_2=0$.

Тогда q = $\frac{\Phi_1}{R}$, где $\Phi_1$ – магнитный поток, пронизывающий рамку при протекании тока по прямому проводу.

$$\Phi_1 = \int\limits_{(S)} d\Phi = \int\limits_{(S)} BdS\cos\alpha, \qquad \alpha = \left(\widehat{\vec{n}, \vec{B}}\right).$$

В данном случае $\alpha = 0$, следовательно

$$\Phi_1 = \int\limits_{(S)} BdS.$$

Магнитная индукция B, создаваемая бесконечно длинным проводником с током, определяется формулой

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, где r – расстояние от провода до точки, в которой определяется B. Так как B зависит от r, то элементарный магнитный поток dΦ также будет зависеть от r.

$d\Phi = B(r)\cdot dS$.

Разобьем площадь рамки на узкие элементарные площадки длиной $a = a_2 - a_1$, шириной dr, площадью $dS = a\cdot dr$.

В пределах каждой такой площадки магнитную индукцию можно считать постоянной, т.к. все части площадки равноудалены (на расстояние r) от провода. Таким образом, элементарный магнитный момент можно записать в виде:

$$d\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot adr.$$

Проинтегрируем полученное выражение в пределах от $a_1$ до $a_2$, найдем магнитный поток $\Phi_1$:

$$\Phi_1 = \int\limits_{(S)} d\Phi = \int\limits_{a_1}^{a_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot adr = \frac{\mu_0 Ia}{2\pi}\int\limits_{a_1}^{a_2}\frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 Ia}{2\pi}\left(\ln a_2 - \ln a_1\right)$$

$$\frac{\mu_0 Ia}{2\pi}\ln\frac{a_2}{a_1} = \frac{\mu_0 I\left(a_2 - a_1\right)}{2\pi}\ln\frac{a_2}{a_1}.$$

$$q = \frac{\Phi_1}{R} = \frac{\mu_0 I\left(a_2 - a_1\right)}{2\pi R}\ln\frac{a_2}{a_1}.$$

Отсюда находим искомую величину:

$$I = \frac{2\pi R\mu_0 q}{\mu_0\left(a_2 - a_1\right)\ln\frac{a_2}{a_1}}$$

$$I = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}02 \cdot 693 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot \ln 2} = 1{,}0 \cdot 10^3 \text{ A.}$$

Ответ: $I = 1{,}0 \cdot 10^3$ A.

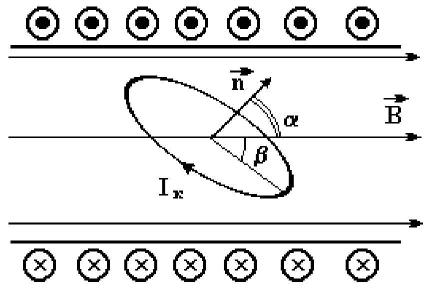
Пример 12.

Внутри соленоида длиной $l$ = 2,0 м, имеющего N = 500 витков, находится проволочное кольцо, радиусом r = 2,0 см и сопротивлением R = 20 Ом. Плоскость кольца образует угол $\beta = 30^0$ с осью соленоида. Какой ток будет идти по кольцу в конце второй секунды, если ток в соленоиде изменяется по закону $I_C = kt^2$, где k=1,0 A/c$^2$. Считать соленоид длинным.

Дано

$l$ = 2,0 м
N = 500
r = 0,02 м
R = 20 Ом
$I_C = kt^2$
k=1,0 A/c$^2$
$\beta = 30^0$
t = 2 c

$I_к$ - ?




Решение . При изменении тока в соленоиде будет изменяться и магнитный поток, пронизывающий кольцо. Следовательно, возникает ЭДС индукции и индукционный ток $I_к$, направление которого указано на рисунке.

По закону Ома $I_к = \frac{\varepsilon_i}{R}$,

по закону Фарадея $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Следовательно, $I_к = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt}$, знак « - » в дальнейшем опустим, т.к. он указывает на направление индукционного тока ( по правилу Ленца).

Магнитный поток через поверхность, ограниченную кольцом:

$\Phi = \int\limits_{(S)} BdS\cos\alpha$, $\cos\alpha = \cos(90^0 - \beta) = \sin\beta$.

Площадь кольца $S = \pi r^2$, индукция магнитного поля длинного соленоида

$$B = \mu_0 I_C n = \mu_0 I_C N/l = \mu_0 kt^2 N/l.$$

Таким образом, магнитный поток через поверхность кольца определяется соотношением:

$$\Phi = \mu_0 kt^2 N/l \cdot \pi r^2 \cdot \sin\beta.$$

По закону Фарадея определяем ЭДС индукции, возникающую в кольце и силу тока $I_к$:

$$\varepsilon_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(\mu_0 kt^2 N/l \cdot \pi r^2 \cdot \sin\beta) = \mu_0 k N/l \cdot \pi r^2 \cdot \sin\beta \cdot 2t$$

$$I_к = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{2\mu_0 kN\pi r^2 t \sin\beta}{Rl}$$

$$I_к = \frac{2 \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 500 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}02^2 \cdot 2 \cdot \sin 30^0}{2{,}0 \cdot 2} = 4 \cdot 10^{-7}\,A = 0{,}60\ мкА$$

<u>Ответ</u>: $I_к$ = 0,60 мкА.

<u>Пример 13.</u>

В цепи, состоящей из катушки индуктивностью $L=1{,}0Гн$ и сопротивлением $R=10Ом$ протекает постоянный ток силой $I_0 = 1A$. Найдите : 1) энергию $W_м$ магнитного поля, запасенную в катушке; 2) время $t_1$, по истечение которого сила тока при размыкании цепи уменьшится в n=10 раз; 3) количество теплоты которое выделяется в цепи за время $t_1$ $(Q_1)$ и за все время убывания тока до нуля $(Q_2)$.

<u>Дано :</u>

$L=1{,}0Гн$

$R=10Ом$

$I_0 = 1A$

$n = \frac{I_0}{I} = 10$

$W_м$ - ? $t_1$ - ? $Q_1$ - ? Q - ?

<u>Решение .</u> 1) Энергию $W_м$ магнитного поля, запасенную в катушке индуктивности, можно расчитать по формуле (21)

$$W_м = \frac{LI_0^2}{2};\ W_м = \frac{1 \cdot 1}{2} = 0{,}5Дж\,.$$

2) Зависимость силы тока $I$ от времени $t$ при размыкании цепи определяется формулой (24б)

$$I = I_0 1^{-\frac{R}{L}t}$$

Отсюда

$$n = \frac{I_0}{I} = 1^{-\frac{R}{L}t_1}$$

Прологарифмируем обе части этого уравнения

$$\frac{R}{L}t_1 = \ln n,\ t_1 = \frac{L\ln n}{R}.$$

$$t_1 = \frac{1\cdot\ln 10}{10} = 0{,}23с.$$

3) Для расчета $Q_1$ используем закон Джоуля-Ленца и учтем, что сила тока $I$, протекающего по цепи, зависит от времени

$$Q_1 = \int_0^{t_1} I^2 R dt = I_0^2 R \int_0^{t_1} e^{-\frac{2R}{1}t} dt = I_0^2 R\left(-\frac{L}{2R}\right) e^{-\frac{2R}{1}t}\Big|_0^{t_1} = \frac{LI_0^2}{2}\left(1 - e^{-\frac{2R}{1}t_1}\right)$$

$$Q_1 = \frac{1\cdot 1}{2}\left(1 - 1^{-\frac{2\cdot 10}{1}\cdot 0{,}23}\right) = 0{,}5\cdot 0.99 = 0{,}495Дж.$$

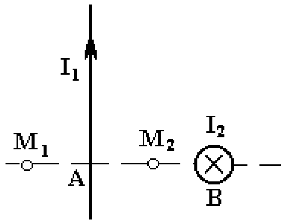
4) По закону сохранения энергии при размыкании цепи энергия магнитного поля катушки индуктивности расходуется на выделение теплоты $Q$ на сопротивлении $R$

$$Q = W_м = 0{,}5 \text{ Дж}.$$

<u>Ответ :</u> $W_м = 0{,}5$ Дж; $t_1 = 0{,}23$ с; $Q_1 = 0{,}495$ Дж; $Q = 0{,}5$ Дж.

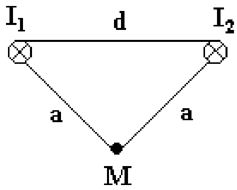
Список задач, рекомендованных для самостоятельного решения

1. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг другу и находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях. Найти индукции $B_1$ и $B_2$ магнитного поля в точках $M_1$ и $M_2$, если токи $I_1$ = 2 А и $I_2$ = 3 А. Расстояния $AM_1 = AM_2$ =1 см, AB = 2 см.




(Ответ : $B_1 = 4{,}5 \cdot 10^{-5}$ Тл, $B_2 = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ Тл )

2. Два прямолинейных длинных проводника расположены параллельно на расстоянии d = 10 см друг от друга. По проводникам в одном направлении текут токи $I_1 = I_2$ = 5 А. Найти модуль и направление вектора магнитной индукции в точке М, находящейся на расстоянии a = 10 см от каждого проводника.




(Ответ : $B = 1{,}7 \cdot 10^{-5}$ Тл )

3. Два круговых витка радиусом R = 4 см каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии d = 10 см друг от друга. По виткам текут токи $I_1 = I_2$ = 2 А. Найти индукцию В магнитного поля на оси витков в точку, находящейся на равном расстоянии от них. Задачу решить, когда: а) токи в витках текут в одном направлении; б) токи в витках текут в противоположных направлениях.

(Ответ : а) $B = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ Тл , б) B=0)

4. Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры эти витков совпадают. Радиус каждого витка R = 2 см, токи в витках $I_1 = I_2$ = 5 А. Найти индукцию В магнитного поля в центе этих витков.

(Ответ : $B = 2{,}2 \cdot 10^{-4}$ Тл )

5. Два прямолинейных бесконечно длинных параллельных проводника находятся на расстоянии $d_1$ = 10 см друг от друга. По проводникам в одном направлении текут токи $I_1$ = 20 А, $I_2$ = 30 А. Какую работу надо совершить (на единицу длины проводников), чтобы раздвинуть эти проводники до расстояния $d_2$ = 20 см?

(Ответ : $\dfrac{A}{l} = 8{,}3 \cdot 10^{-5} \dfrac{\text{Дж}}{\text{м}}$ )

6. Круговой контур помещен в однородное магнитное поле так, что плоскость контура перпендикулярна к направлению магнитного поля.

Индукция магнитного поля B = 0,1 Тл. По контуру течет ток I = 2 А. Радиус контура R = 2 см. Какую работу A надо совершить, чтобы повернуть контур на угол $\varphi = 90^0$ вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

(Ответ : $A = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ Дж )

7. В однородном магнитном поле с индукцией B = 0,5 Тл движется равномерно проводник длиной l = 10 см. По проводнику течет ток I = 2 А. Скорость движения проводника V = 20 м/с и направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найти работу A перемещения проводника за время t =10 с и мощность P, затраченную на это перемещение.

(Ответ : $A = 20$ Дж, $P = 2$ Вт )

8. Электрон ускоренный разностью потенциалов U = 300 В, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии a = 4 мм от него. Какая сила F действует на электрон, если по проводнику пустить ток I = 5 А?

(Ответ : $F = 4{,}1 \cdot 10^{-16}$ Н )

9. Магнитное поле, индукция которого B = 0,5 мТл, направлено перпендикулярно к электрическому полю, напряженность которого E = 1 кВ/м. Пучок электронов влетает в электромагнитное поле, причем скорость $\vec{V}$ электронов перпендикулярна к плоскости, в которой лежат векторы $\vec{B}$ и $\vec{E}$. Найти скорость V электронов, если при одновременном действии обоих полей пучок электронов не испытывает отклонения. Каким будет радиус окружности R траектории движения электрона при условии выключения электрического поля?

(Ответ : $V = 2 \cdot 10^6 \frac{м}{с}$; $R = 0{,}023$м )

10. Электрон, ускоренный разностью потенциалов U = 6 кВ, влетает в магнитное поле под углом $\alpha = 30^0$ к направлению поля и движется по винтовой траектории. Индукция магнитного поля B = 13 мТл. Найти радиус R и шаг h винтовой траектории.

(Ответ : R=0,01м; h=0,11м)

11. Катушка диаметром D = 10 см, состоящая из N = 500 витков проволоки, находится в магнитном поле. Найти ЭДС индукции $\varepsilon_{ср}$, возникающую в этой катушке, если индукция магнитного поля B увеличивается в течение времени t = 0,1 с от 0 до 2 Тл.

(Ответ : $\varepsilon_{ср} = 78{,}5$В )

12. В магнитном поле, индукция которого B = 0,05 Тл, вращается стержень длиной l = 1 м с угловой скоростью ω = 20 рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Найти ЭДС индукции ε, возникающую на концах стержня.

(Ответ : $\varepsilon_i = 0{,}5$В )

13. В однородном магнитном поле, индукция которого B = 0,1 Тл, равномерно вращается катушка, состоящая из N = 100 витков проволоки. Частота вращения катушки n = 5 $с^{-1}$; площадь поперечного сечения катушки S = 0,01 $м^2$. Ось вращения перпендикулярна к оси катушки и направлению магнитного поля. Найти максимальную ЭДС индукции $\varepsilon_{max}$ во вращающейся катушке.

(Ответ : $\varepsilon_{max} = 3{,}14$ В )

14. На соленоид без сердечника длиной l = 144 см диаметром D = 5 см надет проволочный виток. Обмотка соленоида имеет N = 2000 витков, и по ней течет ток I =2 А. Соленоид имеет железный сердечник. Какая средняя ЭДС $\varepsilon_{ср}$ индуцируется в надетом на соленоид витке, когда ток в соленоиде спадет до нуля в течение времени t = 2 мс?

(Ответ : $\varepsilon_{ср} = 0{,}003$ В )

15. Катушка имеет индуктивность L = 0,2 Гн и сопротивление R = 1,64 Ом. Во сколько раз уменьшится ток в катушке через время t = 0,05 с после того, как ЭДС выключена и катушка замкнута накоротко?

(Ответ : $\frac{I_0}{I} = 1{,}5$ )