

## 2. 2. Электромагнитная индукция

### Справочные сведения

ЭДС индукции, возникающая в контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, равна:

$$\vec{E}_{инд} = -\frac{d\vec{\Phi}}{dt},$$

где  $\Phi$  - поток сцепления, т. е. поток, пронизывающий площадь сечения катушки, умноженный на число витков катушки:

$$\Phi = BSN.$$

Если ЭДС создается в замкнутом проводящем контуре сопротивлением  $R$ , то в нем возникает мгновенный ток:

$$i = \frac{E_{инд}}{R}.$$

Направление индукционного тока определяется правилом Ленца

Полный заряд, протекающий по контуру за все время изменения магнитного потока:

$$\Delta q = \int_0^t i \cdot dt = \frac{1}{R} \int_{\Phi_0}^{\Phi} d\Phi = \frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Если в однородном магнитном поле перемещается проводник длиной  $l$  со скоростью  $v$ , то на его концах возникает разность потенциалов:

$$U = Blv.$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке, по которой течет меняющийся ток, равна:

$$\vec{E}_{с.инд.} = -\frac{d\vec{\Phi}}{dt} = -L \frac{di}{dt},$$

Индуктивность катушки:

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

где  $N$  — число витков обмотки,

$l$  — длина катушки,

$S$  — площадь сечения катушки,

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость вещества, заполняющего катушку.

При наличии в цепи двух катушек с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  и взаимной индуктивностью  $M$  общая индуктивность системы равна:

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M$$

где  $M = K \sqrt{L_1 L_2}$ ,

$K$ , - коэффициент связи. (Знак «+» берется, если поля одинаково направлены.)

Энергия магнитного поля:

$$W_N = \frac{1}{2} LI^2.$$

Плотность энергий магнитного поля:

$$\omega_M = \frac{W_M}{V} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu} = \frac{1}{2} BH.$$

Коэффициент взаимной индукции двух катушек (для частного случая, когда две катушки надеты на общий магнитопровод):

$$M = \mu_0 \mu n_1 n_2 l S.$$

(Здесь  $n_1$  и  $n_2$  - плотности намоток катушек — число витков на единицу длины.)

Подъемная сила электромагнита:

$$F = \frac{1}{2} B^2 \frac{S}{\mu_0},$$

где  $S$  — площадь магнитопровода.

Установившийся ток в цепи с индуктивностью и с сопротивлением:

$$i = \frac{E}{R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right],$$

где  $t$  - время, прошедшее с момента замыкания цепи,

$\frac{L}{R}$  - время релаксации.

Ток в цепи с катушкой и сопротивлением при размыкании изменяется по закону:

$$i = I_{\max} \exp\left(-\frac{R}{L} t\right),$$

где  $\frac{L}{R}$  - время релаксации.

Намагниченность магнетика - магнитный момент единицы объема:

$$I = \frac{\chi}{\mu_0} B_0,$$

где  $\chi$  - магнитная восприимчивость вещества (величина безразмерная),

$B_0$  — индукция внешнего магнитного поля,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная.

Полная индукция в веществе, находящемся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}_0$ :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 (1 + \mu) = \vec{B}_0 \mu,$$

где  $1 + \mu = \mu$  - относительная магнитная проницаемость.

где  $L$  — индуктивность катушки.

### Примеры решения задач

При решении задач данного параграфа, как правило, применяют закон электромагнитной индукции. При проведении физического анализа необходимо выяснить, каким образом изменяется магнитное поле, какова причина его изменения. Затем следует определить магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, как функцию от времени. Знак э.д.с. индукции так же, как и направление индукционного тока, может быть определено непосредственно из закона электромагнитной индукции либо с помощью правила Ленца.

*Задача 1.* Две катушки, индуктивности которых равны  $L_1=3$  мГн и  $L_2= 5$  мГн, соединены последовательно так, что их магнитные поля направлены в одну сторону; при этом индуктивность всей системы оказалась равной 11 мГн. Найти индуктивность  $L'$  системы, если катушки переключить так, чтобы их поля были направлены навстречу друг другу. Взаимное расположение катушек при этом не меняется.

#### Решение

Индуктивность системы определяется суммарным потоком сцепления. Первая катушка пронизывается собственным потоком  $\Phi_{11}$  и потоком  $\Phi_{21}$ , созданным второй катушкой. Вторая катушка пронизывается также собственным потоком  $\Phi_{22}$  и потоком  $\Phi_{12}$ , созданным первой катушкой. До переключения катушек их поля направлены в одну сторону, и потоки складываются:

$$\Phi = \Phi_{11} + \Phi_{22} + \Phi_{12} + \Phi_{21}. \quad (3.2.1)$$

После переключения катушек (рис. 103, б) суммарный поток сцепления

$$\Phi' = \Phi_{11} + \Phi_{22} - \Phi_{12} - \Phi_{21}. \quad (3.2.2)$$

Потоки  $\Phi_{12}$  и  $\Phi_{21}$  в данном случае равны друг другу, так как катушки соединены последовательно, и, следовательно, обтекаются одинаковым током, т.е.

$$\Phi_{12} = \Phi_{21} = iM. \quad (3.2.3)$$

где  $M$  - коэффициент взаимной индукции.

Собственные потоки могут быть выражены через индуктивности каждой из катушек:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{11} &= L_1 i_1 \\ \Phi_{22} &= L_2 i_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.2.4)$$

Подставляя выражения (3.2.3) и (3.2.4) в равенства (3.2.1) и (3.2.2) и учитывая, что суммарный поток сцепления  $\Phi = L_i$ , получаем, что до переключения индуктивность системы

$$L = L_1 + L_2 + 2M. \quad (3.2.5)$$

После переключения индуктивность системы

$$L' = L_1 + L_2 - 2M. \quad (3.2.6)$$

Совместное решение уравнений (3.2.5) и (3.2.6) дает результат

$$L' = 2(L_1 + L_2) - L = 5 \text{ мГн.}$$

*Задача 2.* Длинный проводник радиуса  $r_0 = 2 \text{ мм}$  согнут пополам так, что расстояние между осями его половинок  $a = 3 \text{ см}$ . Пренебрегая полем внутри проводника, рассчитать индуктивность системы и ее энергию на каждый метр длины. Сила тока в проводнике  $I = 3a$ .

### *Решение*

Поля, созданные каждой частью получившейся петли, между проводниками направлены в одну сторону. За пределами петли поля направлены в разные стороны. Чтобы вычислить полный поток системы, надо рассчитать поток, пронизывающий плоскость, ограниченную петлей. Продолжать плоскость за пределы петли не надо, иначе каждая силовая линия будет учитываться дважды.

Для расчета потока надо знать индукцию результирующего поля как функцию расстояния  $x$ . Если предположить, что проводник настолько длинен, что можно пренебречь полями токов в подводящих проводах и горизонтальной части проводника, то

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{a-x} \right) \quad (3.2.7)$$

Элемент площадки  $dS$  следует выбрать в виде узкой полоски толщиной  $dx$  и длиной  $l = 1 \text{ м}$ .

Учитывая, что рассчитывается собственный поток системы, и поэтому угол между нормалью к площадке и вектором индукции поля равен нулю, можно записать

$$\Phi = \int_{r_0}^{a-r_0} B l dx. \quad (3.2.8)$$

Подставляя в выражение (3.2.8) формулу (3.2.7), получаем

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \left\{ \int_{r_0}^{a-r_0} \frac{dx}{x} + \int_{r_0}^{a-r_0} \frac{dx}{a-x} \right\} = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{a-r_0}{r_0}$$

Индуктивность системы с учетом этого выражения

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{a-r_0}{r_0} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Энергия системы на каждый метр длины

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{I^2 \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{a-r_0}{r_0} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

*Задача 3.* Тороидальная катушка (без сердечника) состоит из двух обмоток, навитых одна поверх другой, по тысяче витков каждая. Обмотки соединены последовательно, магнитные поля их направлены в одну сторону.

Найти магнитную энергию такой катушки. Как изменится эта энергия, если одну из обмоток отключить?

Ток в обмотке  $I=5a$ ; средняя длина тороида  $l=25$  см; поперечное сечение  $S=1$  см<sup>2</sup>.

#### *Решение*

Размеры тороида, данные в условии, показывают, что тороид тонкий, поэтому поле внутри него можно считать однородным. Это позволяет легко найти магнитную энергию через плотность энергии магнитного поля:

$$W = \omega_m V, \tag{3.2.9}$$

где  $V=Sl$  – объем пространства, в котором сосредоточено магнитное

поле рассматриваемой системы;  $\omega_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$  – плотность энергии.

Внутри тонкого тороида индукция поля

$$B = \mu_0 I \frac{N}{l}, \tag{3.2.10}$$

где  $N$  – общее число витков обеих обмоток.

Подставляя написанные выше значения  $V$  и  $\omega_m$  и выражение (3.2.10) для  $B$  в формулу (3.2.9), получаем

$$W = \frac{\mu_0 I^2 N^2}{2l} S = 25 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

При отключении одной из обмоток число витков и, следовательно, индукция магнитного поля уменьшаются вдвое. Энергия магнитного поля уменьшится вчетверо.

Этот результат надо особенно подчеркнуть. Если каждую из обмоток рассматривать как самостоятельную систему, то полная энергия

$$W = W_1 + W_2 + W_{\text{вз}},$$

где  $W_1, W_2$  - магнитные энергии каждой из обмоток;  $W_{\text{вз}}$  - взаимная энергия.

Выражая энергии через магнитные потоки, находим

$$W_1 = \frac{i_1 \Phi_{11}}{2};$$

$$W_2 = \frac{i_2 \Phi_{22}}{2},$$

$$W_{\text{вз}} = i_1 \Phi_{21} = i_2 \Phi_{12}.$$

Здесь  $\Phi_{11}, \Phi_{22}$  - собственные потоки соответственно первой и второй обмоток;  $\Phi_{12}$  - поток, созданный первой обмоткой и пронизывающий вторую;  $\Phi_{21}$  - поток, созданный второй обмоткой и пронизывающий первую.

Ввиду полной идентичности обмоток все потоки равны между собой, поэтому

$$W_1 = W_2 = \frac{1}{2} W_{\text{вз}}.$$

Отсюда вытекает, что отключение одной из обмоток уменьшает энергию системы в четыре раза.

**Задача 4.** Медный обруч массой  $m = 5$  кг расположен в плоскости магнитного меридиана. Какое количество электричества индуцируется в нем, если его повернуть вокруг вертикальной оси на  $90^\circ$ ? Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли  $B_r = 32 \cdot 10^{-3}$  Т.

#### *Решение*

Количество электричества, индуцируемое в обруче,

$$\Delta q = \frac{\Delta \Phi}{R}; \quad \Delta \Phi = B \Delta S.$$

Положим, что радиус обруча равен  $r$ , тогда  $S = \pi r^2$  ( $S$  - площадь круга, охватываемая обручем). Сопротивление обруча  $R = \rho \frac{1}{Sc}$

( $S_c$  - площадь сечения медного провода),  $S_c = \frac{V}{l}$  ( $V$  - объем,  $l = 2\pi r$  -

длина средней линии обруча),  $V = \frac{m}{D}$  ( $D$  — плотность меди).

С учетом этих соотношений получим:

$$S_c = \frac{m}{D \cdot 2\pi r}; R = \rho \frac{2\pi r \cdot 2\pi r \cdot D}{m} = \rho \frac{4\pi^2 r^2}{m}.$$

Тогда для  $q$  будем иметь:

$$q = \frac{B \pi r^2 m}{\rho \cdot 4\pi^2 r^2 D} = \frac{Bm}{4\rho r D}.$$

Расчеты дают:  $q = 0,053$  Кл.

**Задача 5.** Прямолинейный проводник  $AB$  длиной 1,2 м с помощью гибких проводников соединен с источником тока, ЭДС которого  $E = 24$  В и внутреннее сопротивление  $r = 0,5$  Ом. Проводник находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,8$  Т. Вектор индукции перпендикулярен длине проводника. Найдите ток в цепи, если проводник движется перпендикулярно линиям индукции поля со скоростью 12,5 м/с. Во сколько раз изменится величина тока в цепи, если проводник остановится? Сопротивление всей внешней цепи принять равным  $R = 2,5$  Ом. Магнитным полем тока в проводнике пренебречь.

*Решение*

Согласно закону Ома для полной цепи, сила тока

$$I_1 = \frac{E \pm E_{\text{инд}}}{R + r}.$$

В зависимости от направления движения проводника  $E_{\text{инд}}$  может действовать в одном или противоположном направлении с ЭДС источника  $E$ .

При движении проводника в магнитном поле

$$E_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Найдем изменение магнитного потока:

$$d\Phi = B \cdot dS; dS = lvdt; d\Phi = Blvdt.$$

Тогда

$$E_{\text{инд}} = - Blv;$$

и

$$I_1 = \frac{E \mp Blv}{R + r}; I_1' = 4A; I_1 = 12A.$$

Если проводник остановится, то  $I_2 = \frac{E}{R+r} = 8 \text{ А}$ . При остановке проводника ток увеличится в 2 раза или уменьшится в 1,5 раза.

### Индивидуальные задания.

2.2.1. Кольцо из алюминиевого провода ( $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ ) помещено в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Диаметр кольца  $D = 30 \text{ см}$ , диаметр провода  $d = 2 \text{ мм}$ . Определить скорость изменения магнитного поля, если ток в кольце  $I = 1 \text{ А}$ .

Ответ:  $\frac{dB}{dt} = \frac{16I\rho}{\pi Dd^2}$ ;  $\frac{dB}{dt} = 0,11 \text{ Тл/с}$

2.2.2. Плоскость проволочного витка площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  и сопротивлением  $R = 5 \text{ Ом}$ , находящегося в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 10 \text{ кА/м}$ , перпендикулярна линиям магнитной индукции. При повороте витка в магнитном поле через гальванометр, замкнутый на виток, прошел заряд  $q = 12,6 \text{ мкКл}$ . Определить угол поворота витка.

Ответ:  $\cos \alpha = 1 - \frac{rdQ}{\mu_0 HS}$ ;  $\cos \alpha = 0,5$   $\alpha = 60^\circ$

2.2.3. В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,3 \text{ Тл}$  помещена прямоугольная рамка с подвижной стороной, длина которой  $l = 15 \text{ см}$ . Определить ЭДС индукции, возникающей в рамке, если ее подвижная сторона перемещается перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью  $v = 10 \text{ м/с}$ . Ответ:  $\varepsilon = -Blv$ ;  $\varepsilon = -0,15 \text{ В}$

2.2.4. Две гладкие замкнутые шины, расстояние между которыми равно 30 см, со скользящей перемычкой, которая может двигаться без трения, находятся в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$ , перпендикулярном плоскости контура. Перемычка массой  $m = 5 \text{ г}$  скользит вниз с постоянной скоростью  $v = 0,5 \text{ м/с}$ . Определить сопротивление перемычки, пренебрегая самоиндукцией контура и сопротивлением остальной части контура.

Ответ:  $R = \frac{B^2 \alpha^2 v}{mg}$ ;  $R = 9,2 \text{ мОм}$ .

2.2.5. В катушке длиной  $l = 0,5 \text{ м}$ , диаметром  $d = 5 \text{ см}$  и числом витков  $N = 1500$  ток равномерно увеличивается на  $0,2 \text{ А}$  за одну секунду. На катушку надето кольцо из медной проволоки ( $\rho = 17 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ ) площадью сечения  $S = 3 \text{ мм}^2$ . Определить силу тока в

кольце. Ответ:  $I = \mu_0 \mu \frac{NS_k d}{4l\rho} \frac{dI}{dt}$ ;  $I = 1,66 \text{ мА}$

2.2.6. Катушка диаметром  $d = 2 \text{ см}$ , содержащая один слой плотно прилегающих друг к другу  $N = 500$  витков алюминиевого провода сечением  $S = 1 \text{ мм}^2$ , помещена в магнитное поле. Ось катушки параллельна линиям индукции. Магнитная индукция поля равномерно изменяется со скоростью  $1 \text{ мТл/с}$ . Определить тепловую мощность, выделяющуюся в катушке, если ее концы замкнуты накоротко. Удельное сопротивление алюминия  $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$ .

Ответ:  $P = \frac{N\pi d^2 S_1}{16\rho} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2$ ;  $P = 0,3 \text{ мВт}$

2.2.7. В однородном магнитном поле ( $B = 0,1 \text{ Тл}$ ) вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega = 50 \text{ рад/с}$  вокруг вертикальной оси стержень длиной  $l = 0,4 \text{ м}$ . Определить ЭДС индукции, возникающей в стержне, если ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям магнитной индукции. Ответ:  $\mathcal{E}_i = \frac{Bl^2\omega}{2}$ ;  $\mathcal{E}_i = 0,4 \text{ В}$

2.2.8. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,02 \text{ Тл}$  равномерно вращается вокруг вертикальной оси горизонтальный стержень длиной  $l = 0,5 \text{ м}$ . Ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям магнитной индукции. Определить число оборотов в секунду, при котором на концах стержня возникает разность потенциалов  $U = 0,1 \text{ В}$ . Ответ:  $n = \frac{U}{\pi Bl^2}$ ;  $n = 6,37 \text{ с}^{-1}$

2.2.9. В центре кругового витка перпендикулярно его плоскости создается переменный магнитный поток. Какова будет разность потенциалов между двумя произвольно взятыми точками витка.

Ответ:  $U = 0$

2.2.10. Катушка диаметром  $d = 10 \text{ см}$ , состоящая из  $N = 500$  витков проволоки, находится в магнитном поле. Найти среднюю ЭДС

индукции, возникающую в этой катушке, если индукция магнитного поля  $B$  увеличивается в течение времени  $t = 0,1\text{с}$  от 0 до 2 Тл.

Ответ:  $\varepsilon_{cp} = \frac{\pi N B d^2}{2t}$ ;  $\varepsilon_{cp} = 78,5\text{ В}$

2.2.11. В однородном магнитном поле индукции  $B=10^{-1}\text{Тл}$  равномерно вращается катушка  $N = 100$  витков, со скоростью 5 об/с. Площадь поперечного сечения катушки  $S = 100\text{см}^2$ . Ось вращения перпендикулярна оси катушки и направлению поля. Найти максимальную ЭДС индукции, возникающую в катушке.

Ответ:  $\varepsilon_m = 2\pi \nu B S N$ ;  $\varepsilon_m = 3,14\text{ В}$

2.2.12. Обмотка соленоида состоит из  $N$  витков медной проволоки, поперечное сечение которой  $S = 1\text{мм}^2$ . Длина соленоида  $l = 0,25\text{ м}$ , его сопротивление  $R = 0,2\text{ Ом}$ . Найти индуктивность соленоида.

Ответ:  $L = \mu_0 \mu \frac{R^2 S^2}{4\rho^2}$ ;  $L = 55\text{мкГн}$

2.2.13. Проволочное кольцо радиусом  $r = 10\text{см}$  лежит на столе. Какое количество электричества протечет по кольцу, если его повернуть с одной стороны на другую? Сопротивление кольца  $R = 1\text{ Ом}$ . Вертикальная составляющая магнитного поля Земли  $B = 50\text{ мкТл}$ .

Ответ:  $dq = \frac{\pi B r^2}{R}$ ;  $dq = 1,6 \cdot 10^{-8}\text{ Кл}$

2.2.14. По длинному прямому проводнику течет ток. Вблизи проводника расположена квадратная рамка из тонкого провода сопротивлением  $R = 0,02\text{ Ом}$ . Проводник лежит в плоскости рамки и параллелен двум ее сторонам, расстояния до которых от провода соответственно равны  $a_1 = 10\text{ см}$  и  $a_2 = 20\text{ см}$ . Найти силу тока в проводнике, если при его выключении через рамку протекло количество

электричества  $q = 693\text{ мкКл}$ . Ответ:  $I = \frac{\mu_0 q \ln\left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right)}{2\pi R}$

2.2.15. Квадратная проволочная рамка со стороной  $a = 5\text{ см}$  и сопротивлением  $R = 10\text{ мОм}$  находится в магнитном поле индукции  $B = 40\text{ мТл}$ . Нормаль к плоскости рамки составляет угол  $30^\circ$  с линиями

магнитной индукции. Определить заряд, который проходит по рамке, если магнитное поле выключить. Ответ:  $q = \frac{Ba^2}{R} \cos \alpha$ ;  $q = 8,7 \text{ мКл}$

2.2.16. Обмотка электромагнита, находясь под постоянным напряжением, имеет сопротивление  $R = 15 \text{ Ом}$  и индуктивностью  $L = 0,3 \text{ Гн}$ . Определите время, за которое в обмотке выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике.

Ответ:  $t = \frac{L}{2R}$ ;  $t = 0,01 \text{ с}$

2.2.17. Сила тока  $I$  в обмотке соленоида, содержащего  $N = 1500$  витков, равна  $5 \text{ А}$ . Магнитный поток  $\Phi$  через поперечное сечение соленоида составляет  $200 \text{ мкВб}$ . Определите энергию магнитного поля в соленоиде. Ответ:  $W = \frac{N\Phi I}{2}$ ;  $W = 0,75 \text{ Дж}$ .

2.2.18. Катушка длиной  $l = 50 \text{ см}$  и диаметром  $5 \text{ см}$   $d = 5 \text{ см}$  содержит  $N = 200$  витков. По катушке течет ток  $I = 1 \text{ А}$ . Определите: 1) индуктивность катушки; 2) магнитный поток, пронизывающий площадь ее поперечного сечения. Ответ: 1)  $L = 197 \text{ мкГн}$ ; 2)  $\Phi = 985 \text{ нВб}$ .

2.2.19. Соленоид сечением  $S = 5 \text{ см}^2$  содержит  $N = 1200$ . Индукция магнитного поля внутри соленоида при токе  $I = 2 \text{ А}$  равна  $0,01 \text{ Тл}$ . Определить индуктивность соленоида.

Ответ:  $L = \frac{BNS}{I}$ ;  $L = 3 \text{ мГн}$

2.2.20. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения  $S = 20 \text{ см}^2$  и число витков  $N = 500$ . Индуктивность катушки с сердечником  $L = 0,28 \text{ Гн}$  при токе через обмотку  $I = 5 \text{ А}$ . Найти магнитную проницаемость  $\mu$  железного сердечника. Ответ:  $\mu = 1400$

2.2.21. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Индуктивность первой катушки  $L_1 = 0,2 \text{ Гн}$ , второй -  $L_2 = 0,8 \text{ Гн}$ ; сопротивление второй катушки  $R_2 = 600 \text{ Ом}$ . Какой ток  $I_2$  потечет во второй катушке, если ток  $I_1 = 0,3 \text{ А}$ , текущий в первой катушке, выключить в течение времени  $t = 1 \text{ мс}$ ?

Ответ:  $I_2 = \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{R} \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$ ;  $I_2 = 0,2 \text{ А}$

2.2.22. Имеется катушка длиной  $l = 20 \text{ см}$  и диаметром  $d = 2 \text{ см}$ . Обмотка катушки состоит из  $N = 200$  витков медной проволоки, площадь поперечного сечения которой  $s = 1 \text{ мм}^2$ . Катушка включена в цепь с некоторой ЭДС. При помощи переключателя ЭДС выключается и катушка замыкается накоротко. Через какое время после выключения

ЭДС ток в цепи уменьшится в 2 раза? Ответ:  $t = \frac{SL \ln 2}{\rho l}$ ;  $t = 0,25 \text{ мс}$

2.2.23. Определить индуктивность соленоида длиной  $l$  и сопротивлением  $R$ , если обмоткой соленоида является проволока массой  $m$ , удельное сопротивление вещества которой  $\rho'$ , а плотность

$\rho$ . Ответ:  $L = \frac{\mu_0}{4\pi l} \frac{mR}{\rho\rho'}$ ;

2.2.24. Катушку индуктивностью  $L = 0,6 \text{ Гн}$  подключают к источнику тока. Определить сопротивление катушки, если за время  $t = 3 \text{ с}$  сила тока через катушку достигает 80% предельного значения.

Ответ:  $R = -\frac{L \ln 0,2}{t}$ ;  $R = 332 \text{ мОм}$

2.2.25. Катушка индуктивностью  $L = 1,5 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $R_1 = 15 \text{ Ом}$  и резистор сопротивлением  $R_2 = 150 \text{ Ом}$  соединены параллельно и подключены к источнику, ЭДС которого  $\varepsilon = 60 \text{ В}$ . Определить напряжение на зажимах катушки через  $t = 0,01 \text{ с}$  после выключения источника ЭДС.

Ответ:  $U = \frac{\varepsilon}{R_1} R_2 l^{-\frac{R}{L} t}$ ;  $U_1 = 200 \text{ В}$ ;  $U_2 = 0,01 \text{ В}$

2.2.26. Два соленоида ( $L_1 = 0,64 \text{ Гн}$ ,  $L_2 = 1 \text{ Гн}$ ) одинаковой длины и практически равных сечений вставлены один в другой. Определить взаимную индуктивность соленоидов.

Ответ:  $L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$ ;  $L_{12} = 0,8 \text{ Гн}$

2.2.27. Трансформатор с коэффициентом трансформации 0,15 понижает напряжение с 220 В до 6 В. При этом сила тока во вторичной обмотке равна 6 А. Пренебрегая потерями энергии в первичной обмотке, определить сопротивление вторичной обмотки

трансформатора. Ответ:  $R_2 = \frac{N_2 U_1}{I^2 N_1 - U_2}$ ;  $R = 4,5 \text{ Ом}$

2.2.28. Две длинные катушки намотаны на общий сердечник, причем индуктивность этих катушек  $L_1 = 0,64$  Гн и  $L_2 = 0,04$  Гн. Определите во сколько раз число витков первой катушки больше, чем

второй. Ответ:  $\frac{N_1}{N_2} = 4$

2.2.29. Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром  $d = 0,5$  мм имеет длину  $l = 0,4$  м и поперечное сечение  $S = 50$  см<sup>2</sup>. Какой ток течет по обмотке при напряжении  $U = 10$  В, если за время  $t = 0,5$  мс в обмотке выделяется количество теплоты, равное энергии магнитного поля внутри соленоида? Поле

считать однородным. Ответ:  $I = \frac{2Utd^2}{\mu_0 SE}$ ;  $I = 995$  мА

2.2.30. Индуктивность соленоида при длине  $l = 1$  м и площади поперечного сечения  $S = 20$  см<sup>2</sup> равна  $L = 0,4$  мГн. Определить силу тока в соленоиде, при которой объемная плотность энергии магнитного

поля внутри соленоида  $\omega = 0,1$  Дж/м<sup>3</sup>. Ответ:  $I = \sqrt{\frac{2Sl\omega}{L}}$ ;  $I = 1$  А.