

ЭДС индукции за время в течении, которого магнитный поток пронизывает рамку, изменится от нуля до максимального значения?

$$[\varepsilon_i = 0,16 \text{ В}]$$

**10.12.** Проволочный виток радиусом  $R = 4$  см и сопротивлением  $r = 0,01$  Ом, находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,04$  Тл, плоскость рамки составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с линиями поля. Какое количество электричества  $q$  протечет по витку, если магнитное поле выключить?

$$[q = 10 \text{ мКл}]$$

**10.13.** Проволочное кольцо радиусом  $R = 10$  см лежит на столе. Какое количество электричества  $q$  протечет по кольцу, если его повернуть с одной стороны на другую. Сопротивление кольца  $r = 1$  Ом. Вертикальная составляющая индукции магнитного поля земли  $B = 50$  мкТл.

$$[q = 3,14 \text{ мкТл}]$$

**10.14.** В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. По цепи протекло количество электричества  $q = 10^{-5}$  Кл. Определить магнитный поток  $\Phi$  пересеченный кольцом, если сопротивление цепи гальванометра  $r = 30$  Ом.

$$[\Phi = 0,3 \text{ мВб}]$$

**10.15.** Горизонтальный стержень длиной  $l = 1$  м вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов. Ось вращения параллельна магнитному полю, индукция которого  $B = 50$  мкТл. При такой частоте вращения стержня  $n$  разность потенциалов на концах стержня  $U = 1$  мВ.

$$[n = 6,4 \text{ с}^{-1}]$$

## 11. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ (ЭДС САМОИНДУКЦИИ)

### 11.1. Основные формулы

Явление самоиндукции заключается в возникновении ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока  $\frac{dI}{dt}$

$$\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность (коэффициент самоиндукции) контура, потокосцепление  $\psi$  пропорционально силе тока  $I$ , протекающего по контуру:

$$\psi = LI.$$

Индуктивность соленоида (тороида):

$$L = \mu_0 \mu n^2 V.$$

Магнитная энергия контура с током:

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

где  $n$  – число витков на единицу длины;  $V$  – объем.

Изменение магнитного потока может достигаться также изменением тока в соседнем контуре. При этом индуцируется ЭДС:

$$\varepsilon = -L_{12} \frac{dI}{dt},$$

где  $L_{12}$  – взаимная индуктивность контуров.

Взаимная индуктивность двух соленоидов, пронизываемых общим магнитным потоком:

$$L_{12} = \mu_0 \mu n_1 n_2 S e,$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – числа витков на единицу длины этих соленоидов.

Мгновенное значение силы тока  $I$  в цепи, обладающей сопротивлением  $r$  и индуктивностью:

а) после замыкания цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{r} \left( 1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right),$$

где  $\varepsilon$  – ЭДС источника тока;

$t$  – время, прошедшее после замыкания цепи.

б) после размыкания цепи:

$$I = I_0 e^{-\frac{r}{L}t},$$

где  $I_0$  – сила тока в цепи при  $t = 0$ ;

$t$  – время, прошедшее с момента размыкания цепи.

## 11.2. Примеры решения задач

**Задача 1.** По соленоиду течет ток  $I = 2$  А. Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий поперечное сечение соленоида, равен 4 мкВб. Найти индуктивность  $L$  соленоида, если он имеет 800 витков.

**Анализ и решение.**

$$L = \frac{\Psi}{I} \text{ заменим } \Psi = \Phi N, \text{ то}$$

$$L = \frac{\Phi N}{I} = \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 800}{2} \text{ Гн} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

**Задача 2.** Если сила тока, проходящего в соленоиде изменяется на 50 А в секунду, то на концах соленоида возникает ЭДС самоиндукции 0,08 В. Найти индуктивность соленоида.

**Анализ и решение.**

$$\varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Если ток меняется по произвольному закону, то  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  есть другие значения скорости изменения тока за время  $\Delta t$ . Тогда  $L \frac{\Delta I}{\Delta t}$  выражает среднее значение  $\langle \varepsilon_i \rangle$

$$\langle \varepsilon_i \rangle = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow L = \frac{\langle \varepsilon_i \rangle}{\Delta I} \Delta t = \frac{0,08}{50} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,6 \text{ мГн}.$$

**Задача 3.** Обмотка соленоида состоит из одного слоя, плотно прилегающих друг к другу витков медного провода. Диаметр провода  $d = 0,2$  мм, диаметр соленоида  $D = 5$  см. По соленоиду течет ток  $I = 1$  А. Определить, какое количество электричества протечет через обмотку, если концы ее замкнуть накоротко.

**Анализ и решение.** Количество электричества  $dq$  за время  $dt$  при силе тока  $I$  определяется:

$$dq = Idt, \quad (1)$$

общее количество электричества, протекающее через проводник за время  $t$

$$q = \int_0^t Idt.$$

Сила тока выражается формулой

$$I = I_0 e^{-\frac{r}{L}t},$$

где  $I_0$  – сила тока до замыкания, тогда

$$q = \int_0^{\infty} I_0 e^{-\frac{r}{L}t} dt = I_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{r}{L}t} dt = I_0 \left( -\frac{L}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t} \Bigg|_0^{\infty};$$

$$q = I_0 \left( -\frac{L}{r} \right) [0 - 1] = I_0 \frac{L}{r}. \quad (2)$$

Индуктивность соленоида и сопротивление обмотки равна:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l_1} S_1 = \frac{\mu_0 \pi d_1^2 N^2}{4l_1};$$

$$r = \rho \frac{l}{S} = \frac{4\rho l}{\pi d^2},$$

где  $N$  – число витков,  $l_1$  – длина соленоида,  $S_1$  – сечение соленоида,  $l$  – длина провода,  $S$  – сечение провода,  $d$  – диаметр провода,  $d_1$  – диаметр соленоида.

Подставим выражения для  $L$  и  $r$  в (2):

$$q = I_0 \frac{L}{r} = \frac{\mu_0 N^2 \pi d_1^2}{4l_1 4\rho l} \pi d^2 I_0.$$

Длина провода может быть выражена через диаметр  $d_1$  соленоида:

$$l = \pi d_1 N,$$

тогда

$$q = \frac{\mu_0 N^2 \pi d_1^2 \pi d^2}{16l_1 \rho \pi d_1 N} I_0 = \frac{\pi \mu_0 N d_1 d^2}{16\rho l_1} I_0,$$

но  $\frac{l_1}{r}$  есть диаметр провода, т.к. витки плотно прилегают друг к другу.

Тогда:

$$q = \frac{\pi \mu_0 d_1 d^2}{16\rho d} I_0 = \frac{\pi \mu_0}{16\rho} d d_1 I_0 =$$

$$\frac{3,14 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{16 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \text{ Кл} = 3,63 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}.$$

### 11.3 Задачи для самостоятельного решения

**11.1.** Индуктивность катушки  $L = 2$  мГн. Найти среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей за время  $\Delta t$ , в течение которого ток изменяется от минимального до максимального значения? Амплитудное значение силы тока  $I_0 = 10$  А, частота  $\nu = 50$  Гц.

$$[\varepsilon_i = 4 \text{ В}]$$

**11.2.** Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас,  $L = 1,6$  мГн. Длина соленоида  $l = 1$  м, сечение  $S = 20$  см<sup>2</sup>. Сколько витков приходится на сантиметр длины соленоида?

$$[8 \text{ витков на } 1 \text{ см}]$$

**11.3.** Сколько витков проволоки диаметром  $D = 0,4$  мм нужно намотать на картонный цилиндр диаметром  $D = 2$  см, чтобы получить однослойную катушку с индуктивностью  $L = 1$  мГ? Витки плотно прилегают друг к другу.

$$[10^3 \text{ витков}]$$