

Радиус контура 2 см. Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы повернуть контур на угол  $\varphi = 90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

$$[A = 0,5 \text{ мДж}]$$

**9.12.** Из проволоки длиной  $l = 0,2$  м сделаны квадратный и круговой контуры. Найти вращающие моменты сил  $M_1$  и  $M_2$ , действующие на каждый контур, помещенный в однородное поле с  $B = 0,1$  Тл. По контурам течет ток  $J = 2$  А. Плоскость каждого контура составляет угол  $\alpha = 45^\circ$  с направлением поля.

$$[M_1 = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ н}\cdot\text{м}; M_2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ н}\cdot\text{м}]$$

**9.13.** Каким должно быть отношение длины  $l$  катушки к ее диаметру  $D$ , чтобы напряженность магнитного поля в центре катушки можно было найти по формуле для напряженности поля бесконечно длинного селеноида? Ошибка при таком допущении не должна превышать  $\delta = 5\%$ .

$$\delta = \frac{H_2 - H_1}{H_2},$$

где  $H_1$  – напряженность поля внутри катушки конечной длины;

$H_2$  – напряженность поля внутри бесконечно длинной катушки.

[3]

## 10. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЗАКОНЫ ФАРАДЕЯ

### 10.1. Основные формулы

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток (индукционный).

Закон электромагнитной индукции Фарадея.

ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , возникающие в замкнутом контуре, пропорциональна скорости  $\frac{d\Phi}{dt}$  изменения магнитного потока со временем:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где  $N$  – число витков,  $\Psi$  – потокосцепление.

Количество электричества  $q$ , протекающего в контуре при изменении потокосцепления на величину  $\Delta\Psi$ :

$$q = \frac{\Delta\Psi}{r}.$$

Разность потенциалов  $U$  на концах проводника длиной  $l$ , движущегося в однородном магнитном поле со скоростью  $v$ :

$$U = Blv \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением вектора  $\vec{v}$  и вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , возникающие в рамке, содержащий  $N$  витков площадью  $S$  при вращении с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ :

$$\varepsilon_i = BNS\omega \sin \omega t.$$

Правило Ленца: индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток.

## 10.2. Примеры решения задач

**Задача 1.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл равномерно вращается рамка, содержащая  $N = 1000$  витков, площадь рамки  $S = 150 \text{ см}^2$ . Рамка вращается с частотой  $n = 10$  об/с. Определить мгновенное значение ЭДС, соответствующее углу поворота рамки в  $30^\circ$ .

**Анализ и решение.** Мгновенное значение ЭДС индукции определяется:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

где  $\psi$  - потокосцепление

$$\psi = N\Phi, \quad (2)$$

Следовательно

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

При вращении рамки

$$\Phi = BS \cos \omega t,$$

где  $\omega t$  – мгновенное значение угла между нормалью  $\vec{n}$ , плоскости рамки и вектором индукции  $\vec{B}$ . Подставим в (3) выражение  $\Phi$  и продифференцируем по времени:

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t \quad (4)$$

циклическая частота связана с линейной  $\omega = 2\pi n$ , поэтому  $\varepsilon_i = 2\pi n NBS \sin \omega t$ . Подставим числовые значения:

$$\varepsilon_i = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 \text{ В} = 47,1 \text{ В}.$$

**Задача 2.** Тонкий медный проводник массой  $m = 1$  г согнут в виде квадрата и концы его замкнуты и помещен в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл так, что плотность его перпендикулярна линиям поля.

Определить количество электричества  $q$ , которое протекает по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные концы, вытянуть в линию.

**Анализ и решение.** Обозначим  $a$  сторону квадрата.

Тогда

$$q = \frac{\Delta\Psi}{r} = \frac{\Delta\Phi}{r};$$

$$\Delta\Phi = B\Delta S \cos \alpha = B\Delta S,$$

где  $\Delta S = a^2$  - площадь квадрата.

$$r = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4a}{S},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление меди.

Выразим ее через объем, плотность и массу.

$$S = \frac{V}{l}; V = \frac{m}{D},$$

где  $D$  – плотность меди.

Тогда

$$S = \frac{m}{D4a} \text{ или } g = \frac{Ba^2 m}{\rho 4a D 4a} = \frac{Bm}{16\rho D} = 41,4 \text{ мКл.}$$

### 10.3. Задачи для самостоятельного решения

**10.1.** Рамка площадью  $50 \text{ см}^2$ , содержащая 100 витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $0,04 \text{ Тл}$ . Определить максимальную ЭДС индукции, если ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции, а рамка делает 960 об/мин.

$$[\varepsilon_m = 0,3 \text{ В}]$$

**10.2.** Кольцо из проволоки сопротивлением  $0,001 \text{ Ом}$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $0,4 \text{ Тл}$ . Плоскость кольца составляет угол  $90^\circ$  с линиями индукции. Определить количество электричества, которое протечет по кольцу, если его выдернуть из поля. Площадь кольца  $10 \text{ см}^2$ .

$$[q = 0,4 \text{ Кл}]$$

**10.3.** В магнитном поле индукция которого равна  $0,05 \text{ Тл}$  вращается стержень длиной  $1 \text{ м}$  с угловой скоростью  $20 \text{ рад/с}$ . Ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю. Найти ЭДС индукции, возникающую в витке при выключении поля в течение  $10 \text{ мс}$ .

$$[\varepsilon_i = 1 \text{ В}]$$