

3.6. Электромагнитная индукция

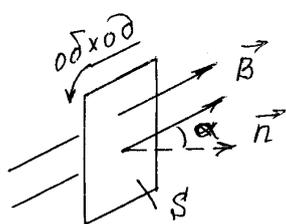
1. Явление электромагнитной индукции

Пусть проводник движется в магнитном поле, пересекая линии магнитной индукции. Тогда на заряженные частицы внутри проводника будет действовать сила Лоренца. Под действием этой силы свободные заряды будут двигаться вдоль проводника.

Если концы проводника соединить проводом в замкнутую цепь, то по ней потечет электрический ток. То есть, проводник стал источником тока, в нем появилась ЭДС. При этом может двигаться как проводник, так и магнитное поле - важно лишь относительное движение.

Явление возникновения ЭДС в проводнике при пересечении им линий магнитной индукции называют **явлением электромагнитной индукции**. Для описания этого явления вводят еще одну характеристику магнитного поля – магнитный поток.

2. Магнитный поток



Пусть линии магнитной индукции проходят через площадку, ограниченную замкнутым контуром. Роль контура часто играют витки катушки, но контуром может быть и мысленная линия в пространстве.

Магнитное поле считаем однородным, а площадку – плоской. Тогда **магнитным потоком** (потоком вектора магнитной индукции) называют величину

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha$$

где: S – площадь площадки;

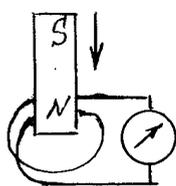
B – величина магнитной индукции;

α - угол между вектором магнитной индукции и положительным направлением нормали к поверхности. Из двух возможных направлений нормали положительным считается то, которое связано с положительным направлением обхода контура **правилом правой руки**.

Магнитный поток – величина скалярная, но имеет знак – положительный или отрицательный. Размерность магнитного потока $[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$ (вебер).

Качественно можно считать, что магнитный поток пропорционален числу линий магнитной индукции, проходящих через площадку. При $\alpha = 0$ число таких линий максимально, а при $\alpha = 90^\circ$ – равно нулю.

3. Закон электромагнитной индукции



Явление электромагнитной индукции открыл Фарадей. Он опускал магнит в катушку, подключенную к гальванометру. При опускании магнита в катушку по ней шел ток, и стрелка гальванометра отклонялась. Когда магнит находился в катушке, электрический ток отсутствовал. При вынимании магнита стрелка гальванометра отклонялась в противоположную сторону. Было установлено, что возникновение тока связано с изменением магнитного потока.

Сегодня **закон электромагнитной индукции** формулируют так: «При любом изменении магнитного потока через контур в нем возникает электродвижущая сила индукции, равная по модулю скорости изменения магнитного потока»

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

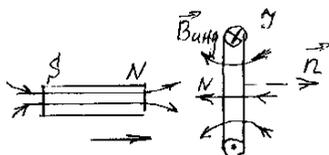
Для мгновенных величин ЭДС

$$\xi = -\Phi'$$

Знак ЭДС определяют относительно положительного направления обхода контура. Минус говорит о том, что увеличению магнитного потока соответствует отрицательная ЭДС, а уменьшению – положительная ЭДС.

Наличие ЭДС говорит о том, что контур стал источником тока. Если контур разомкнут, то между его концами возникнет разность потенциалов $U = - \xi$. Если контур замкнут, то по нему будет течь электрический ток, величину которого можно определить по закону Ома для полной цепи.

4. Правило Ленца



Пусть например, северный полюс магнита приближается к проводящему кольцу. Направление ЭДС можно определить по закону электромагнитной индукции.

Выбирая направление нормали по магнитному полю (вправо), получаем положительное направление обхода контура – по часовой стрелке (глядя со стороны магнита). Тогда $\Phi > 0$; $\Delta\Phi > 0$; $\xi < 0$; $I < 0$;

То есть, индукционный ток направлен против обхода контура (против часовой стрелки).

Определить направление ЭДС можно проще - по правилу Ленца: ЭДС **индукции противодействует причине, вызвавшей ее**. Ключевое слово - противодействует.

Тогда правило Ленца можно использовать так:

а) Индукционный ток своим магнитным полем противодействует нарастанию магнитного поля в кольце. То есть, магнитное поле индукции будет направлено влево. По правилу правой руки такое поле создает ток, направленный против часовой стрелки;

б) Кольцо противодействует приближению магнита, отталкивая его своим магнитным полем. То есть, слева у кольца будет северный магнитный полюс. Тогда магнитное поле индукции направлено влево, а индукционный ток направлен против часовой стрелки.

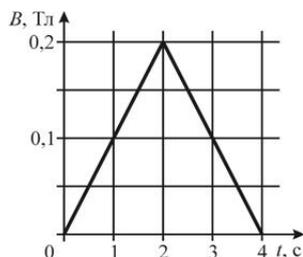
5. Электромагнитная индукция от внешних источников

ЭДС в контуре возникает при любом изменении магнитного потока через контур. Магнитный поток в контуре может изменяться как внешними источниками магнитного поля, так и собственным током по контуру.

Если магнитный поток в контуре изменяется внешними источниками магнитного поля, то в контуре возникает ЭДС

$$\xi = - \frac{\Delta\Phi_{\text{внеш.}}}{\Delta t} = - \frac{\Delta(BS \cdot \cos \alpha)}{\Delta t}$$

То есть, причиной появления ЭДС индукции может быть изменение величины магнитной индукции, площади контура, угла контура относительно магнитного поля или комбинации этих величин.



Пример 1. Намотанная на каркас проволочная катушка сопротивлением $R = 2$ Ом, выводы которой соединены друг с другом, помещена в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости витков катушки. Модуль вектора магнитной индукции B поля изменяется с течением времени t так, как показано на графике. К моменту времени $\tau = 1$ с через катушку протек электрический заряд $q = 5$ мКл. Сколько витков содержит катушка, если все витки одинаковые и имеют площадь $S = 100$ см²?

Решение. В каждом витке катушки изменяется магнитный поток, поэтому в каждом витке возникает ЭДС. Так как N витков соединены последовательно, то суммарная ЭДС катушки будет в N раз больше ЭДС одного витка.

Скорость изменения магнитного потока в течение времени $\tau = 1\text{с}$ постоянная, значит постоянными будут и ЭДС катушки и сила тока в катушке. Считая ЭДС положительной, получаем

- ЭДС катушки по закону электромагнитной индукции

$$\xi = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{NS \cdot \Delta B}{\Delta t}$$

- сила тока по закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R} = \frac{NS \cdot \Delta B}{R \cdot \Delta t}$$

- прошедший заряд по определению силы тока

$$q = I \cdot \Delta t = \frac{NS \cdot \Delta B}{R}$$

Отсюда находим число витков катушки

$$N = \frac{qR}{S \cdot \Delta B} = 10$$

Пример 2. Проволочное кольцо радиусом 10 см и сопротивлением 1 Ом лежит на столе. Какой заряд пройдет по кольцу, если его перевернуть с одной стороны на другую? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли 50 мкТл.

Решение. Если направить нормаль к кольцу по магнитному полю, то начальный и конечный магнитный поток через кольцо будут равны

$$\Phi_{\text{н}} = BS \cdot \cos 0 = BS$$

$$\Phi_{\text{к}} = BS \cdot \cos 180^\circ = -BS$$

Магнитный поток через кольцо изменяется, следовательно, в кольце возникает ЭДС и по кольцу потечет электрический ток.

В данном случае ЭДС не будет постоянным, поэтому процесс разбиваем на малые промежутки времени, в течение каждого из них ЭДС считаем постоянным. Рассчитываем прошедший заряд для каждого промежутка времени и складывая их, находим суммарный заряд

$$q_1 = I_1 \cdot \Delta t_1 = \frac{\xi}{R} \cdot \Delta t_1 = -\frac{(\Phi_1 - \Phi_{\text{н}})}{R} \quad q_2 = -\frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{R} \quad q_3 = -\frac{(\Phi_3 - \Phi_2)}{R} \quad \dots$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots = -\frac{(\Phi_{\text{к}} - \Phi_{\text{н}})}{R} = \frac{2BS}{R} = \frac{2B \cdot \pi r^2}{R}$$

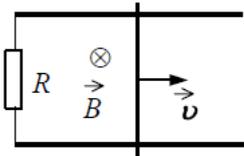
Подставляя численные значения, находим суммарный заряд $q = 3,14 \text{ мкКл}$.

6. Электромагнитная индукция в движущихся проводниках

При изменении магнитного потока изменяется число линий магнитной индукции, проходящих через площадку, ограниченную замкнутым контуром. Но линии магнитной индукции замкнуты. Они не имеют ни начала, ни конца. Поэтому они могут войти в площадку или выйти из нее единственным способом – пересечь ее границу (контур). В том месте, где линии магнитной индукции пересекают контур, возникает ЭДС.

Если проводник движется в магнитном поле и в своем движении пересекает линии магнитной индукции, то в этом проводнике возникает ЭДС индукции. Величину и направление ЭДС можно определить по закону электромагнитной индукции.

Пример 1 - поступательное движение.



Прямоугольный контур, образованный двумя рельсами и двумя перемычками, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости контура. Правая перемычка скользит по рельсам, сохраняя надежный контакт с ними. Известны величины: индукция магнитного поля $B = 0,1$ Тл, расстояние между рельсами $l = 10$ см, скорость движения перемычки $V = 2$ м/с, сопротивление контура $R = 2$ Ом. Какова сила индукционного тока в контуре?

Решение. Направим ось x вправо, а нормаль – по полю. Тогда положительное направление обхода контура будет по часовой стрелке, а величина ЭДС будет равна

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(B \cdot l \cdot x)}{\Delta t} = -Bl \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = -BVl$$

То есть, ЭДС индукции в движущемся проводнике направлена против положительного направления обхода (против часовой стрелки), а величина ЭДС равна

$$\xi = BVl$$

Можно отметить, что эта формула присутствует в кодификаторе, поэтому при решении задач ЕГЭ выводить ее не обязательно.

Силу тока в контуре находим по закону Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\xi}{R} = \frac{BVl}{R} = 0,01 A$$

Величина $\xi = BVl$ - это **максимальная величина** ЭДС. Она получается в том случае, когда вектор скорости перпендикулярен и проводнику, и вектору магнитной индукции. Если это не так, то нужно использовать соответствующие проекции скорости на эти направления.

Направление ЭДС в движущемся проводнике можно определить и другими способами:

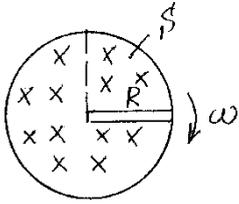
а) по правилу Ленца. ЭДС индукции создает ток, магнитное поле которого противодействует увеличению магнитного потока через контур. По правилу правой руки этот ток через перемычку направлен вверх (в контуре – против часовой стрелки);

б) по правилу Ленца. ЭДС индукции возникает, потому что перемычка движется в магнитном поле вправо. ЭДС индукции создает ток, сила Ампера которого направлена влево, то есть, противодействует движению вправо. По правилу левой руки электрический ток через перемычку направлен вверх;

в) по силе Лоренца. Свободные заряды в перемычке движутся вместе с ней в магнитном поле, поэтому на них действует сила Лоренца. По правилу левой руки на положительные заряды сила будет действовать вверх. Поэтому по перемычке потечет электрический ток, направленный вверх.

Пример 2 - вращательное движение.

Тонкий проводящий стержень длиной $L = 60$ см вращается в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через его конец, с угловой скоростью $\omega = 20$ рад/с в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5$ Тл. Определите разность потенциалов, возникающую между противоположными концами стержня.



Решение. Этот проводник можно рассматривать как источник тока с разомкнутыми полюсами. ЭДС смещает заряды в проводнике, создавая между его концами разность потенциалов.

Направление ЭДС можно найти либо относительно положительного направления обхода контура, либо по правилу левой руки для силы Лоренца.

Мысленно дополняем проводник до замкнутого контура, через который изменяется магнитный поток. Тогда величину ЭДС найдем по закону электромагнитной индукции

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BS)}{\Delta t} = -\frac{B \cdot \pi L^2}{T} = -\frac{BL^2\omega}{2}$$

ЭДС направлена по радиусу от центра, а электрическое поле в стержне направлено к центру. Величина напряжения по модулю равна ЭДС

$$U = -\xi = 5,4 \text{ В.}$$

7. Явление самоиндукции

Если по витку провода протекает электрический ток, то он создает внутри этого витка **собственный магнитный поток**, пропорциональный силе тока по проводу $\Phi_{\text{соб.}} \sim I$. Это будет справедливо и для катушки, содержащей некоторое число витков. Эту пропорциональность можно записать в виде равенства

$$\Phi_{\text{соб.}} = L \cdot I$$

Коэффициент пропорциональности L называют **индуктивностью**. Она не зависит от тока, а только от формы и размеров катушки, числа витков, наличия в катушке сердечника и т.д. $[L] = \text{Вб/А} = \text{Гн}$ (генри).

Если собственный магнитный поток изменяется, то по закону электромагнитной индукции в катушке возникает ЭДС. Это явление называют **явлением самоиндукции**

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi_{\text{соб.}}}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}$$

ЭДС самоиндукции может возникать как при изменении индуктивности (размеров катушки, числа витков в ней и т.д.) так и при изменении тока в катушке. Если индуктивность катушки не меняется, то ЭДС самоиндукции возникает при изменении тока в катушке

$$\xi = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Знак минус говорит о том, что при увеличении тока ЭДС отрицательна, а при уменьшении тока - положительна. Это соответствует правилу Ленца: ЭДС индукции противодействует причине, вызвавшей ее.

Энергию магнитного поля катушки можно определить по формуле

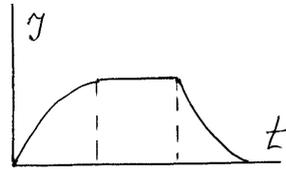
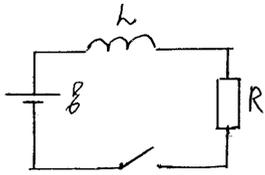
$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

8. Переходные процессы в электрических цепях*

В цепи с чисто омическими проводниками переходные процессы отсутствуют. В момент замыкания цепи ток скачком увеличивается до максимальной величины, а в момент размыкания цепи – скачком падает до нуля.

На участке цепи с **катушкой индуктивности** при изменении тока в катушке возникает ЭДС, противодействующая изменению тока. Поэтому ток через катушку мгновенно измениться не может.

При замыкании и размыкании цепи с катушкой в ней происходят переходные процессы:



- в момент замыкания цепи из-за возникновения ЭДС самоиндукции ток через катушку вначале равен нулю, а затем постепенно увеличивается до максимальной величины;

- при отключении источника из-за возникновения ЭДС самоиндукции ток некоторое время он продолжает идти через катушку, постепенно уменьшаясь до нуля.

При быстром размыкании цепи в месте разрыва цепи накапливаются заряды. При большой индуктивности в месте разрыва цепи может возникнуть искровой или дуговой разряд, поэтому цепь с большой индуктивностью быстро размыкать нельзя. Обычно ток медленно снижают до безопасной величины, и только затем размыкают цепь.

Пример: Катушку индуктивности 2,4 Гн замыкают на источник $\xi = 12$ В. Через какой промежуток времени ток в катушке достигнет 40 А? Омическим сопротивлением цепи пренебречь.

Решение. По 2-му правилу Кирхгофа для произвольного момента времени

$$\xi - L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$$

Записывая эти равенства для малых промежутков времени

$$\xi \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I$$

и складывая их почленно, получаем

$$\xi \cdot t = L \cdot I$$

Отсюда

$$t = \frac{L \cdot I}{\xi} = 8c$$

Основные понятия

Магнитным потоком через площадку называют величину

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha$$

где: α - угол между вектором магнитной индукции и нормалью к площадке. Нормаль связана с положительным направлением обхода контура площадки **правилом правой руки**.

Закон электромагнитной индукции: при любом изменении магнитного потока через контур в нем возникает электродвижущая сила индукции, равная по модулю скорости изменения магнитного потока

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Для мгновенных величин ЭДС

$$\xi = -\Phi'$$

Знак ЭДС определяют относительно положительного направления обхода контура. Минус в формуле говорит о том, что увеличению магнитного потока соответствует отрицательная ЭДС, а уменьшению – положительная ЭДС.

Знак ЭДС легко найти по **правилу Ленца**: «ЭДС индукции противодействует причине, вызвавшей ее».

ЭДС от внешних источников возникает при изменении величины магнитной индукции, площади или угла наклона контура

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi_{\text{внеш.}}}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BS \cdot \cos \alpha)}{\Delta t}$$

Максимальная ЭДС при поступательном движении проводника в магнитном поле

$$\xi_{\text{max}} = BvL$$

ЭДС самоиндукции

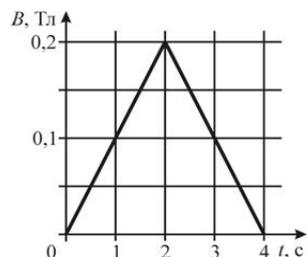
$$\xi = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Энергия магнитного поля катушки

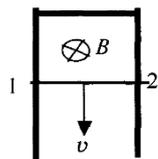
$$W_{\text{м}} = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Задачи 3.6. Электромагнитная индукция

4.2. Проволочное кольцо радиусом 10 см и сопротивлением 1 Ом лежит на столе. Какой заряд пройдет по кольцу, если его перевернуть с одной стороны на другую? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли 50 мкТл.



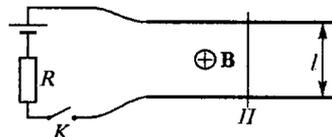
С9. Намотанная на каркас проволочная катушка сопротивлением $R = 2$ Ом, выводы которой соединены друг с другом, помещена в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости витков катушки. Модуль вектора магнитной индукции B поля изменяется с течением времени t так, как показано на графике. К моменту времени $t=1$ с через катушку протек электрический заряд $q = 5$ мКл. Сколько витков содержит катушка, если все витки одинаковые и имеют площадь $S=100$ см²?



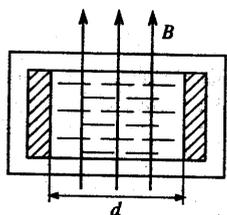
С3. Два вертикальных рельса, находящихся в магнитном поле с индукцией B на расстоянии $l = 1$ м друг от друга, соединены сверху третьим рельсом (см. рисунок). Вдоль них скользит вниз без трения горизонтальный проводник 1-2 массой $m = 0,1$ кг и сопротивлением $R = 0,01$ Ом. При скорости проводника $V = 1$ м/с действующая на него сила Ампера уравнивает силу тяжести. Какова индукция B ? (Магнитное поле перпендикулярно плоскости рельсов, сопротивление рельсов пренебрежимо мало.)

С6. Тонкий проводящий стержень длиной $L = 60$ см вращается в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через его конец, с угловой скоростью $\omega = 20$ рад/с в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5$ Тл. Определите разность потенциалов, возникающую между противоположными концами стержня.

С7. Замкнутый контур площадью S из тонкой проволоки помещён в магнитное поле. Плоскость контура перпендикулярна вектору магнитной индукции поля. В контуре возникают колебания тока с амплитудой $I_m = 35$ мА, если магнитная индукция поля меняется с течением времени в соответствии с формулой $B = a \cdot \cos(bt)$ где $a = 6 \cdot 10^{-3}$ Тл, $b = 3500$ с⁻¹. Электрическое сопротивление контура $R = 1,2$ Ом. Чему равна площадь контура?



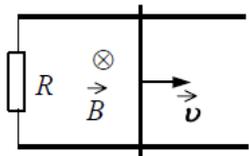
97.9.4. На двух длинных гладких параллельных и горизонтально расположенных проводящих штангах лежит проводящая перемычка II массой M . Расстояние между штангами равно l . Через резистор сопротивлением R и разомкнутый ключ к штангам подключена батарея с некоторой постоянной ЭДС. Штанги расположены в области однородного магнитного поля с вертикально направленной индукцией B . Пренебрегая внутренним сопротивлением батареи, сопротивлением штанг и перемычки, определить ускорение перемычки сразу после замыкания ключа, если известно, что после замыкания ключа максимально установившаяся скорость, которую приобретает перемычка, равна V_0 .



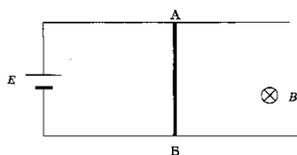
14. Поток проводящей жидкости (расплавленный металл) течет по керамической трубе. Для определения скорости течения жидкости трубу помещают в однородное магнитное поле, перпендикулярное оси трубы, в трубе закрепляют два электрода, образующие плоский конденсатор, и измеряют разность потенциалов между электродами. Найдите скорость потока, если индукция магнитного поля $B=0,01$ Тл, расстояние между электродами $d = 2$ см, измеренная разность потенциалов 0,4 мВ.

С10. Катушка, содержащая несколько витков провода, резистор и конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ соединены последовательно и образуют замкнутую цепь. В некоторый момент времени включают внешнее магнитное поле, и поток магнитной индукции Φ через витки катушки начинает увеличиваться с течением времени t по закону $\Phi = at$, где $a = 10^{-2}$ Вб/с. Какой по величине заряд q установится на пластинах конденсатора спустя достаточно длительное время после начала процесса? Индуктивностью катушки пренебречь.

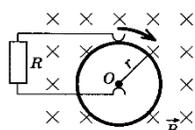
Задачи 3.6. Электромагнитная индукция



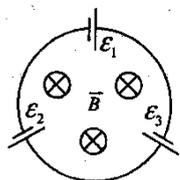
V3. Прямоугольный контур, образованный двумя рельсами и двумя перемычками, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости контура. Правая перемычка скользит по рельсам, сохраняя надежный контакт с ними. Известны величины: индукция магнитного поля $B = 0,1$ Тл, расстояние между рельсами $l = 10$ см, скорость движения перемычки $V = 2$ м/с, сопротивление контура $R = 2$ Ом. Какова сила индукционного тока в контуре?



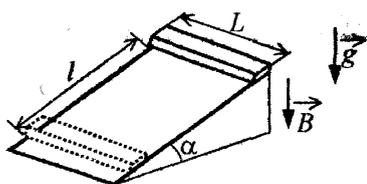
C12. Проводник АВ длиной 0,5 м может скользить по горизонтальным рельсам, подключенным к источнику тока с ЭДС 2 В. Однородное магнитное поле с индукцией 0,5 Тл направлено вертикально вниз, как показано на рисунке. С какой скоростью и в каком направлении нужно перемещать проводник АВ, чтобы сила тока через него была равна нулю?



C2. В однородном магнитном поле индукцией B вращается массивный медный диск радиусом r . Магнитное поле перпендикулярно плоскости диска, вращающегося с частотой ν . С помощью скользящих контактов резистор R подключен к оси O и ободу диска. Какое количество теплоты выделится в резисторе за время, в течение которого диск совершит N оборотов вокруг оси?



4.11. Три гальванических элемента $\zeta_1 = 3$ В, $\zeta_2 = 2$ В, $\zeta_3 = 1$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 2$ Ом, $r_2 = 1,5$ Ом, $r_3 = 0,5$ Ом соединены так, что образуют замкнутый круг-контур радиусом 40 см. Контур пронизывается перпендикулярно его плоскости магнитным полем, индукция которого изменяется по закону $B = \alpha \cdot t$, где $\alpha = 10/\pi$ Тл/с. Определите силу тока в цепи.



C5. Тонкий алюминиевый брусок прямоугольного сечения, имеющий длину $L = 0,5$ м, соскальзывает из состояния покоя по гладкой наклонной плоскости из диэлектрика в вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл (см. рисунок). Плоскость наклонена к горизонту под углом $\alpha = 30^\circ$. Продольная ось бруска при движении сохраняет горизонтальное направление. Найдите величину ЭДС индукции на концах бруска в момент, когда брусок пройдет по наклонной плоскости расстояние $l = 1,6$ м.

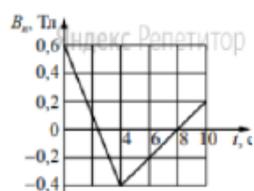


C13. По горизонтально расположенным шероховатым рельсам с пренебрежимо малым сопротивлением могут скользить два одинаковых стержня массой $m = 100$ г и сопротивлением $R = 0,1$ Ом каждый. Расстояние между рельсами $l = 10$ см, а коэффициент трения между стержнями и рельсами $\mu = 0,1$. Рельсы со стержнями находятся в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл.

Под действием горизонтальной силы, действующей на первый стержень вдоль рельса, оба стержня движутся поступательно равномерно с разными скоростями. Какова скорость движения первого стержня относительно второго? Самоиндукцией контура пренебречь.

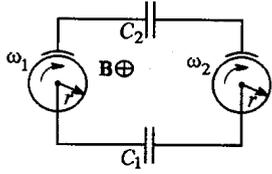
C14. В замкнутую накоротко катушку из медной проволоки вводят магнит, создающий внутри ее поле $B = 10^{-2}$ Тл. Определите заряд q , протекающий при этом через катушку. Радиус витка катушки $r = 10$ см, площадь поперечного сечения проволоки $S = 0,1$ мм².

C16. Плоская рамка из провода сопротивлением 5 Ом находится в однородном магнитном поле. Проекция магнитной индукции поля на ось Ox , перпендикулярную плоскости рамки, меняется от $B_{1x} = 3$ Тл до $B_{2x} = -1$ Тл. За время изменения поля по рамке протекает заряд 1,6 Кл. Определите площадь рамки.

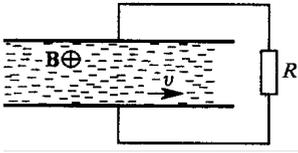


C17. Квадратная проволочная рамка со стороной $l = 10$ см находится в однородном магнитном поле с индукцией B . На рисунке изображена зависимость проекции вектора B на перпендикуляр к плоскости рамки от времени. Какое количество теплоты выделится в рамке за время $t = 10$ с, если сопротивление рамки $R = 0,2$ Ом?

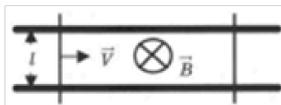
Задачи 3.6. Электромагнитная индукция



96.1.5. Два одинаковых проводящих диска радиусами r вращаются с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$) в однородном магнитном поле с индукцией B , перпендикулярной их плоскостям. Центры дисков с помощью проводников присоединены к конденсатору емкостью C_1 , а ободы - через скользящие контакты к конденсатору емкостью C_2 . Найти напряжения, которые установятся в конденсаторах.



96.2.5. В простейшей схеме магнитного гидродинамического генератора плоский конденсатор с площадью пластин S и расстоянием d между ними помещен в поток проводящей жидкости с удельным сопротивлением ρ , движущейся с постоянной скоростью V параллельно пластинам. Конденсатор находится в магнитном поле с индукцией B , направленной вдоль пластин и перпендикулярно скорости жидкости. Найти полезную мощность, которая выделяется в виде тепла на внешней нагрузке сопротивлением R .

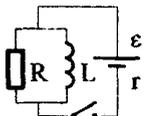


C14. Два параллельных друг другу рельса, лежащих в горизонтальной плоскости, находятся в однородном магнитном поле, индукция B которого направлена вертикально вниз (см. рисунок, вид сверху). На рельсах находятся два одинаковых проводника. Левый проводник движется вправо со скоростью $V = 3$ м/с, а правый - покоится. С какой скоростью U надо перемещать правый проводник направо, чтобы в три раза уменьшить силу Ампера, действующую на левый проводник? (Сопротивлением рельсов пренебречь).

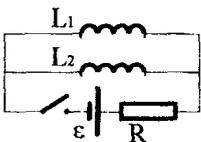
C4. Катушку индуктивности с нулевым сопротивлением подсоединяют к аккумулятору с ЭДС 1,5 В. внутреннее сопротивление которого также пренебрежимо мало. Через 4 с после подсоединения сила тока, текущего через катушку, оказалась равной 10 А. Чему равна индуктивность катушки? Ответ выразите в Гн и округлите до десятых долей.

5.5. Катушку индуктивности 2,4 Гн замыкают на источник $\xi = 12$ В. Через какой промежуток времени ток в катушке достигнет 40 А? Омическим сопротивлением цепи пренебречь.

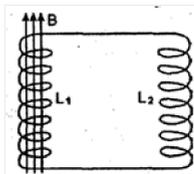
B4. В катушке сила тока равномерно увеличивается со скоростью 2 А/с. При этом в ней возникает ЭДС самоиндукции 20 В. Какова энергия магнитного поля катушки при силе тока 5 А?



1.27. Какой заряд пройдет через сопротивление R после замыкания ключа? Указанные на рисунке величины даны.



1.21. В представленной схеме известны: ЭДС источника ξ , сопротивление R , и индуктивности катушек L_1 и L_2 . Внутренним сопротивлением источника можно пренебречь. Найти установившиеся токи в катушках после замыкания ключа.



02.3. Катушка из n витков, площадь каждого из которых равна S , расположена в однородном магнитном поле с индукцией B , которая направлена перпендикулярно плоскости каждого витка катушки. Вне поля расположена вторая катушка. Катушки соединены проводами. Пренебрегая омическим сопротивлением катушек и проводов, определить величину тока, возникающего в катушках после выключения поля. Индуктивности катушек L_1 и L_2 .

Отвeты:

4.2. 3,14 мкКл;

С9. 10;

С3. 0,1 тл;

С6. 5,4 В;

С7. $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;

97.9.4. $a = \frac{V_0 (IB)^2}{MR}$;

14. 2 м/с;

С10. 100 нКл;

ОТВЕТЫ:

В3. 10 мА;

С12. 8 м/с, вправо;

С2. $Q = \frac{\pi^2 B^2 r^4 N v}{R}$;

4.11. 0,1 А;

С5. 0,17 В;

С13. 2 м/с;

С14. $2,9 \cdot 10^{-3}$ Кл;

С16. 2 м²;

С17. 0,155 мДж;

ОТВЕТЫ:

$$96.1.5. \quad U_1 = \frac{Br^2 \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{2 \cdot (1 + C_1/C_2)} ; \quad U_2 = \frac{Br^2 \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{2 \cdot (1 + C_2/C_1)} ;$$

$$96.2.5. \quad N = \left(\frac{BVd}{R + \rho d / S} \right)^2 \cdot R ;$$

С14. 2 м/с;

С4. 0,6 Гн;

5.5. 8 с;

В4. 125 Дж;

$$1.27. \quad q = \frac{\xi L}{Rr} ;$$

$$1.21. \quad I_1 = \frac{\xi \cdot L_1}{R \cdot (L_1 + L_2)} ; \quad I_2 = \frac{\xi \cdot L_2}{R \cdot (L_1 + L_2)} ;$$

$$02.3. \quad I = \frac{BSn}{L_1 + L_2} ;$$