

4. Электромагнитная индукция

4.1. Закон электромагнитной индукции

1. Электрические токи создают вокруг себя магнитное поле. Существует и обратное явление: магнитное поле вызывает появление электрических токов (индукционных токов). Это явление было открыто М. Фарадеем в 1831 г. и получило название электромагнитной индукции.

Классические опыты по наблюдению электромагнитной индукции проиллюстрированы на рис. 4.1, 4.2. Чувствительный гальванометр, подключенный к катушке, показывает наличие тока в цепи при движении катушки или постоянного магнита (рис.4.1). Постоянный магнит в опыте можно заменить электромагнитом (рис.4.2): и в этом случае будет наблюдаться ток при движении катушки или электромагнита. Индукционный ток в катушке будет наблюдаться и при неподвижных катушке и электромагните, если изменять протекающий через электромагнит ток, например, замыкая или размыкая ключ в цепи на рис. 4.2.

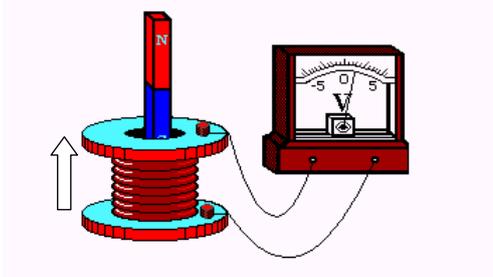


Рис. 4.1.

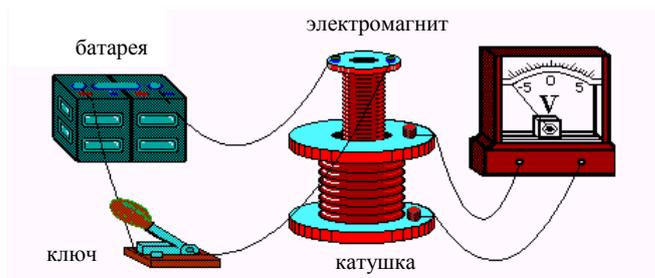


Рис. 4.2.

2. Для дальнейшего описания электромагнитной индукции необходимо ввести физическую величину, называемую магнитным потоком Φ .

Рассмотрим площадку ΔS , расположенную в магнитном поле с индукцией \vec{B} . Площадка предполагается настолько малой, что ее можно считать плоской, а магнитное поле в ее пределах однородным. Тогда магнитным потоком - потоком вектора \vec{B} через площадку ΔS - называют величину

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

где α - угол между вектором \vec{B} и нормалью к площадке \vec{n} (рис.4.3). Если поверхность S не является малой, то ее надо разбить на достаточно малые площадки ΔS_i , а затем рассчитать суммарный магнитный поток:

$$\Phi = \sum B_i \Delta S_i \cos\alpha_i.$$

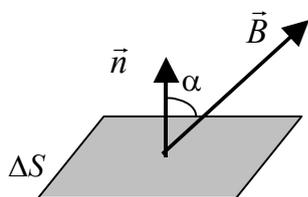


Рис. 4.3.

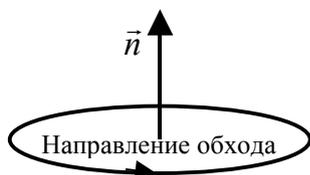


Рис. 4.4.

3. Выяснилось, что индукционный ток в замкнутом проводящем контуре возникает при всяком изменении магнитного потока через поверхность, опирающуюся на этот контур. В этом и состоит явление электромагнитной индукции. Индукционный ток имеет такое направление, что созданное им собственное магнитное поле частично компенсирует то изменение потока внешнего магнитного поля, в результате которого этот индукционный ток возник. Эту закономерность называют правилом Ленца.

4. Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС (ЭДС индукции) \mathcal{E}_i . Фарадей установил, что ЭДС индукции не зависит от того, каким способом осуществляется изменение магнитного потока: изменяется площадь контура, его ориентация в магнитном поле, или изменяется во времени маг-

нитное поле, пронизывающее неподвижный контур. Во всех случаях ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока:

$$\boxed{\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ при } \Delta t \rightarrow 0} \quad (1)$$

Такое отношение, как известно, называется производной

$$\boxed{\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}} \quad (2)$$

ЭДС индукции и возбуждает в проводящем контуре индукционный ток, величина которого определяется по закону Ома $I = \mathcal{E}_i / r$, где r - сопротивление контура. Формулы (1), (2) выражают закон электромагнитной индукции и «автоматически» учитывают правило Ленца. При использовании этих формул направление нормали к поверхности, ограниченной контуром, можно выбирать произвольно, а направление обхода контура должно быть связано с направлением нормали правилом буравчика (рис.4.4). Тем самым определены и знак магнитного потока, и «направление» ЭДС индукции в контуре: если рассчитанная по формуле (1) величина $\mathcal{E}_i > 0$, то сторонние силы направлены в направлении обхода контура, если $\mathcal{E}_i < 0$, то – против обхода.

5. При обсуждении природы электромагнитной индукции следует выделить два существенно различных случая.

Случай 1. Магнитное поле не зависит от времени, магнитный поток изменяется из-за движения проводящего контура в магнитном поле. Возбуждение индукционного тока в этом случае объясняется действием силы Лоренца на носители тока в проводнике, и формулу (2) можно вывести из известных законов электричества и магнетизма.

Случай 2. Магнитное поле зависит от времени, контур покоится. Как известно, магнитная сила действует только на движущиеся носители заряда, поэтому, когда проводник неподвижен, этой силы не возникает. Оказывается, что известные нам законы электричества и магнетизма не могут объяснить возникновение индукционного тока в этом случае. Нужны новые фундаментальные принципы.

Такой новый фундаментальный закон электромагнетизма открыл Максвелл. Он предположил, что всякое переменное магнитное поле порождает в окружающем пространстве поле электрическое. Это электрическое поле, называемое вихревым, и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике. Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты и оно совершает отличную от нуля работу при перемещении пробного заряда по замкнутому контуру.

Примеры решения задач

Пример 4.1. Найдите величину потока однородного магнитного поля \vec{B} через поверхность, ограниченную контуром, изображенным на рис.4.5. Известны величины a, b, c, α, B .

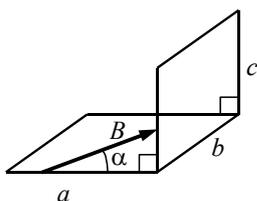


Рис. 4.5.

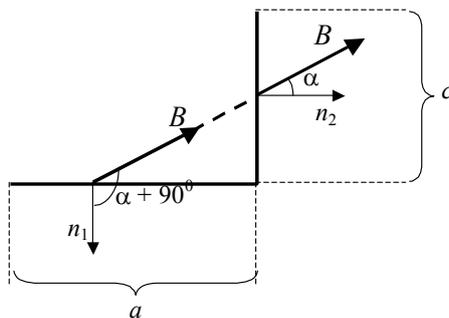


Рис. 4.6.

Решение.

Изобразим рисунок "в разрезе"(см. рис.4.6). При выборе вектора нормали к поверхности мы можем произвольно выбрать одно из двух возможных направлений этого вектора. Например, вектор \vec{n}_1 на рисунке можно направить вверх или вниз перпендикулярно плоскости. Мы выбрали направление "вниз". Тогда во всех других точках поверхности вектор нормали уже определен однозначно: мы можем мысленно перемещать вектор нормали вдоль поверхности, но не можем "перескакивать" на другую сторону поверхности. Итак, если вектор \vec{n}_1 направлен вниз, то вектор \vec{n}_2 направлен вправо (рис.4.6). Тогда по определению:

$$\Phi = Bab \cos(\alpha + 90^0) + Bcb \cos \alpha = Bb(-a \sin \alpha + c \cos \alpha) .$$

Пример 4.2. По П-образному проводнику с постоянной скоростью V скользит проводящая перемычка (рис.4.7). Внешнее магнитное поле \vec{B} перпендикулярно плоскости контура, образованного П-образным проводником и пере-

мычкой. Определите силу тока в контуре, если расстояние между параллельными сторонами проводника равно l , его сопротивление пренебрежимо мало, а сопротивление перемычки R .

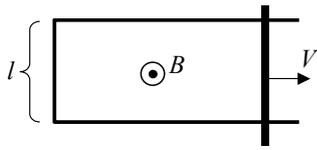


Рис. 4.7.

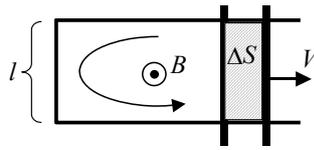


Рис. 4.8.

Решение.

Направление нормали к контуру выберем, совпадающим с направлением вектора \vec{B} . Тогда магнитный поток через контур положителен. Направление обхода контура связано с направлением нормали правилом буравчика (рис.4.8).

Нарисуем положение перемычки через малый промежуток времени Δt . Площадь, ограниченная проводящим контуром, увеличилась на $\Delta S = V\Delta t \cdot l$, а магнитный поток увеличился на

$$\Delta\Phi = B\Delta S = BV\Delta tl.$$

По формуле (1) найдем ЭДС индукции в контуре:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{BVl\Delta t}{\Delta t} = -BVl.$$

Индукционный ток

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{r} = -\frac{BVl}{r}$$

отрицателен, это означает, что он течет против направления обхода. Можно убедиться, что такое направление тока согласуется с правилом Ленца: индукционный ток создает свое магнитное поле, препятствующее возрастанию магнитного потока через контур.

Пример 4.3. Магнитный поток через замкнутый проводящий контур сопротивлением $R = 10$ Ом меняется со временем t по закону $\Phi = \beta t^2$, где $\beta = 10$ Вб/с². Определите силу тока I в контуре в момент времени $t = 1$ мс.

Решение.

В данном случае магнитный поток через контур меняется не равномерно. Поэтому для определения ЭДС нужно вычислить производную от магнитного потока:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_i = -\Phi' = -(\beta t^2)' = -\beta(t^2)' = -2\beta t \\ I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} \end{cases}$$

Отсюда найдем:

$$I = -2\beta t / R = 2 \text{ мА.}$$

Знак "–", означает, что индукционный ток протекает в контуре против направления обхода, связанного с направлением вектора индукции правилом буравчика.

Пример 4.4. Квадрат, изготовленный из проволоки сопротивлением $R = 1$ Ом, помещен в однородное магнитное поле, вектор индукции \vec{B} которого перпендикулярен плоскости квадрата. Длина стороны квадрата $a = 1$ см. Величина индукции магнитного поля сначала равна $B = 0,1$ Тл, а затем ее уменьшают до нуля. Найдите величину q заряда, который в результате переместится через поперечное сечение проволоки.

Решение

При изменении магнитного потока Φ в проводящем контуре возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Индукционный ток в контуре равен

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$$

и за малое время Δt переносит заряд

$$\Delta q = I\Delta t.$$

Из этих уравнений найдем

$$\Delta q = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

Полученное выражение справедливо для бесконечно малых величин Δq и $\Delta\Phi$ поскольку при его выводе строгие выражения $\mathcal{E}_i = -\Phi'$ и $I = q'$ заменены приближенными $\mathcal{E}_i = -\Delta\Phi/\Delta t$ и $I = \Delta q/\Delta t$. Чтобы найти весь заряд, перенесенный током за конечный промежуток времени, необходимо просуммировать его бесконечно малые порции:

$$q = \sum \Delta q_k = -\sum \frac{\Delta\Phi_k}{R} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{R},$$

где $\Phi_1 = a^2 B$ - начальный магнитный поток через контур, $\Phi_2 = 0$ - конечный магнитный поток. В результате получим

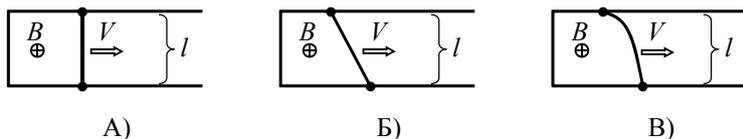
$$q = \frac{Ba^2}{R} = 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Положительный знак заряда означает, что заряд переносится в направлении обхода контура, которое связано с направлением вектора индукции правилом буравчика. Заметим, что величина заряда не зависит от того, по какому закону уменьшаются магнитное поле. При быстром изменении магнитного поля в контуре будет протекать больший ток, но в течение меньшего промежутка времени, чем при медленном изменении магнитного поля. Суммарный заряд, перенесенный индукционным током в обоих случаях, оказывается одинаковым.

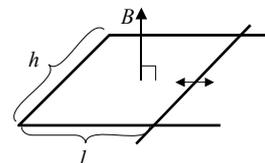
Задачи для самостоятельного решения

Двигается проводник

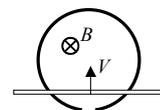
4.1. В однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} расположен П-образный проводник из тонкой проволоки, плоскость которого перпендикулярна вектору магнитной индукции. Расстояние между параллельными сторонами проводника равно l . По проводнику со скоростью V перемещают поступательно, как показано на рисунке, жесткую проводящую перемычку. Определите величину $|\mathcal{E}_i|$ ЭДС индукции в замкнутом контуре для случаев А), Б) и В). Укажите направление индукционного тока.



4.2. Перемычка, замыкающая П-образный проводник, совершает колебательное движение, так что длина l стороны прямоугольного проводящего контура меняется по закону $l = l_0 + a \sin \omega t$, где $a = 1$ мм, $\omega = 10$ рад/с, $l_0 = h = 3$ см (см. рис.). Контур находится в перпендикулярном к контуру однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Определите амплитуду I_m тока в контуре. Сопротивление контура считать равным $R = 0,01$ Ом.



4.3. На горизонтальном столе в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией B закреплено проволочное кольцо радиуса R с узким разрезом. По кольцу перемещают тонкий металлический стержень с постоянной скоростью V , перпендикулярной стержню. Найдите максимальную величину ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре, образованном кольцом и стержнем.



4.4. Рамка площадью $S = 300$ см² содержит $N = 200$ витков проволоки и вращается с постоянной частотой в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Определите период T обращения рамки, если максимальное значение ЭДС индукции в рамке равно $\mathcal{E}_m = 1,5$ В. Ось вращения перпендикулярна линиям индукции и лежит в плоскости рамки.

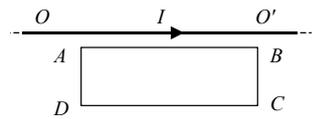
Переменное магнитное поле

4.5. Линии индукции однородного магнитного поля перпендикулярны плоскости кругового контура длиной $l = 1$ м. Найдите величину ЭДС индукции \mathcal{E} в контуре при равномерном уменьшении величины индукции магнитного поля на $\Delta B = 3,14$ мТл за время $\Delta t = 0,5$ с.

4.6. Катушка с площадью поперечного сечения $S = 5$ см² помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1$ Тл. Ось катушки составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с вектором магнитной индукции. На сколько ΔN нужно изменить число витков катушки, чтобы магнитный поток через нее увеличился на $\Delta\Phi = 10$ мВб?

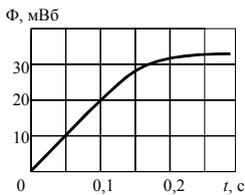
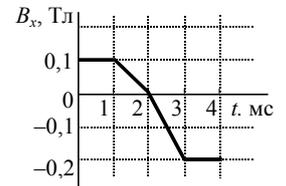
4.7. Магнитный поток через каждый виток катушки, помещенной в магнитное поле, равен $\Phi = 0,05$ Вб. Магнитное поле равномерно убывает до нуля за $\tau = 0,1$ с, при этом в катушке индуцируется ЭДС $\mathcal{E} = 20$ В. Найдите количество витков катушки N .

4.8. Сила тока в прямолинейном длинном проводнике OO' возрастает. Найдите направление индукционного тока в неподвижном проводящем контуре $ABCD$ и направления сил, действующих на каждую из сторон контура со стороны магнитного поля проводника с током OO' . Ответы поясните.



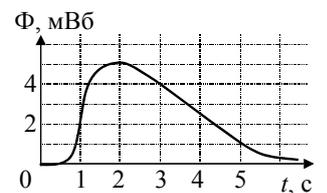
4.9. Магнитный поток через замкнутый проводящий контур сопротивлением $R = 10$ Ом меняется со временем t по закону $\Phi = \beta t^2$, где $\beta = 10$ Вб/с². Определите силу тока I в контуре в момент времени $t = 1$ мс.

4.10. Проволочный виток радиусом $r = 1$ см и сопротивлением $R = 3,1$ Ом находится в однородном магнитном поле. Проекция вектора магнитной индукции на ось x , перпендикулярную плоскости витка, меняется со временем t в соответствии с приведенным на рисунке графиком. Определите максимальную силу тока в витке.



4.11. На рисунке приведен график зависимости магнитного потока Φ через замкнутый проволочный контур от времени t . Сопротивление контура $R = 5$ Ом. Определите максимальную величину тока в контуре в данном процессе.

4.12. Замкнутый проволочный виток сопротивлением $R = 0,3$ Ом проносят мимо магнита. При этом магнитный поток Φ через поверхность, ограниченную витком, меняется, как показано на рисунке. а) Определите силу тока в витке в момент времени $t = 4$ с. б) В какой момент времени величина тока в контуре максимальна?

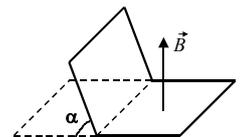


4.13. Проволочный круговой виток, радиус которого $r = 1$ см, а сопротивление $R = 0,1$ Ом, поместили в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости витка. Индукция магнитного поля меняется со временем по закону $B = B_m \sin \omega t$, где $B_m = 0,1$ Тл, $\omega = 10^3$ рад/с. Определите максимальную силу тока I_m в витке.

4.14. Проволочный круговой виток радиусом $r = 2$ см и сопротивлением $R = 0,1$ Ом поместили в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости витка. Индукция магнитного поля меняется со временем по закону $B = B_m \sin \omega t$, где $B_m = 0,01$ Тл, $\omega = 100$ рад/с. Определите силу тока в витке в момент времени, когда индукция магнитного поля равна $B = 0,005$ Тл.

4.15. Кольцевой проволочный виток находится в переменном магнитном поле, индукция которого $\vec{B} = \vec{B}_0 \sin \omega t$ перпендикулярна плоскости витка. а) Чему равна амплитуда I_m тока в витке, если $B_0 = 0,1$ Тл, $\omega = 100$ рад/с, площадь витка $S = 10$ см², сопротивление витка $R = 2$ Ом? б) Во сколько k раз уменьшится амплитуда тока после поворота витка вокруг диаметра на угол $\alpha = 60^\circ$?

4.16. Прямоугольная проволочная рамка находится в однородном магнитном поле, вектор индукции \vec{B} которого перпендикулярен плоскости рамки, а модуль B этого вектора увеличивается со временем по линейному закону. Во сколько n раз уменьшится индукционный ток в рамке после того, как одна из ее половин будет развернута относительно другой на угол $\alpha = 60^\circ$?



4.17. Проволочный виток площади S лежит в плоскости, перпендикулярной магнитному полю индукции B . Сопротивление витка R . Магнитное поле равномерно уменьшается до нуля за время T . Найдите: а) силу тока I в витке при изменении магнитного поля; б) работу A вихревого электрического поля по переносу заряда в витке.

Заряд и изменение магнитного потока

4.18. Замкнутый проводящий контур из тонкой проволоки сопротивлением $R = 3$ Ом находится в магнитном поле. Какой заряд q пройдет через поперечное сечение проволоки при увеличении на $\Delta\Phi = 7,5$ мВб магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром?

4.19. Плоский виток провода расположен перпендикулярно однородному магнитному полю. Если виток повернуть на 180° вокруг оси, перпендикулярной вектору магнитной индукции, то по нему пройдет заряд $q_1 = 10$ мкКл. Какой заряд q_2 пройдет по витку при его повороте вокруг этой оси на угол $\alpha = 60^\circ$?

4.20. Катящийся по горизонтальной дороге металлический обруч радиуса $r = 50$ см падает на землю. Определите заряд q , который протечет по обручу, если сопротивление единицы длины обруча $R_0 = 1$ Ом/м. Учитывайте только вертикальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли, равную $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл.

4.21. При равномерном изменении силы тока через катушку за время $\tau = 0,05$ с в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 0,1$ В. Катушка содержит $N = 1000$ витков. Какой заряд q пройдет за это время через замкнутый виток сопро-

тивлением $R = 20$ Ом, плотно надетый на катушку? Магнитное поле, созданное током в витке, считать пренебрежимо малым. Катушка длинная, намотка однослойная.

4.2. Самоиндукция. Энергия магнитного поля

1. Рассмотрим замкнутый контур из тонкого провода (рис. 4.9). В соответствии с законом электромагнитной индукции при всяком изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, в контуре возникает ЭДС индукции. В частности, ЭДС индукции возникает и в отсутствие внешних источников магнитного поля, если в контуре течет ток, зависящий от времени. Действительно, такой ток порождает магнитное поле, зависящее от времени, а это влечет за собой изменение во времени магнитного потока через контур и, следовательно, появление ЭДС индукции в контуре. Таким образом, изменение тока в контуре ведет к возникновению ЭДС индукции в том же самом контуре. Такое явление называется самоиндукцией.

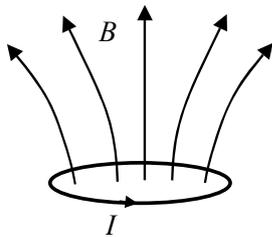


Рис. 4.9.

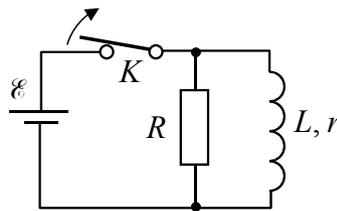


Рис. 4.10.

2. Если в пространстве, где находится контур с током I , нет ферромагнетиков, то поле \vec{B} , а следовательно, и магнитный поток Φ через контур будут пропорциональны току I . Можно записать

$$\boxed{\Phi = LI} \quad (3)$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью контура. Индуктивность L зависит от формы и размеров контура, а также от магнитных свойств окружающей среды. Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн).

Подставляя (3) в закон электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i = -\Phi'$, получим

$$\mathcal{E} = -\Phi' = -(LI)' = -LI' \quad (4)$$

или

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0 \quad (4-a)$$

Эту ЭДС называют электродвижущей силой самоиндукции. В соответствии с правилом Ленца она препятствует изменению тока в контуре.

3. Если катушку с током отключить от источника, например разомкнуть ключ в цепи, показанной на рис. 4.10, то сила тока через катушку сразу не обратится в ноль, а будет убывать постепенно, поскольку ЭДС самоиндукции препятствует быстрому изменению тока. После отключения источника в цепи выделится определенное количество теплоты, то есть произойдет превращение энергии магнитного поля катушки во внутреннюю энергию. Расчет показывает, что в катушке с индуктивностью L запасена энергия

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

Такую же работу должен совершить источник, чтобы создать в катушке ток I . Кроме того источник должен компенсировать потери энергии, обусловленные выделением тепла в цепи при наращивании тока.

Примеры решения задач

Пример 4.5. При подключении катушки индуктивностью $L = 90$ мГн к источнику ЭДС ток в катушке за время $\tau = 0,015$ с равномерно увеличился от нуля до $I = 10$ А. Определите величину ЭДС самоиндукции в катушке за это время.

Решение

ЭДС самоиндукции в катушке определяется формулой

$$\mathcal{E}_s = -LI'$$

При равномерном изменении тока

$$I' = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\Delta I}{\tau}.$$

Следовательно, величина ЭДС самоиндукции равна

$$|\mathcal{E}_s| = LI / \tau = 60 \text{ В}.$$

Пример 4.6. Длинный соленоид (катушка) индуктивностью $L = 10$ мГн содержит $N = 1000$ витков, площадь каждого из которых $S = 5$ см². Определите индукцию B магнитного поля в соленоиде при токе в его витках $I = 1$ А. Магнитное поле в соленоиде можно считать однородным и направленным вдоль его оси.

Решение

Индуктивность соленоида по определению равна

$$L = \Phi / I,$$

где

$$\Phi = NSB$$

- магнитный поток через витки соленоида, B – индукция магнитного поля в соленоиде. Из этих уравнений найдем

$$B = \frac{LI}{SN} = 0,02 \text{ Тл}.$$

Пример 4.7. Катушка индуктивностью $L = 20$ мГн подключена к источнику с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом. Определите энергию W магнитного поля катушки. Сопротивление провода катушки $R = 10$ Ом.

Решение

По закону Ома найдем ток в катушке:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Энергия магнитного поля катушки определяется формулой

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

Из этих выражений найдем

$$W = \frac{L}{2} \left(\frac{\mathcal{E}}{R + r} \right)^2 = 10^{-2} \text{ Дж}.$$

Пример 4.8. Ток в катушке индуктивности изменился от $I_1 = 2$ А до $I_2 = 1$ А. При этом энергия магнитного поля катушки уменьшилась на $|\Delta W| = 1,5$ мДж. Определите величину энергии магнитного поля катушки W_1 в начальном состоянии.

Решение

Энергия магнитного поля катушки при токе I_1 равна

$$W_1 = \frac{LI_1^2}{2},$$

а изменение этой энергии при уменьшении тока:

$$|\Delta W| = \frac{LI_1^2}{2} - \frac{LI_2^2}{2}.$$

Исключая из этих уравнений индуктивность L , получим

$$W_1 = \frac{|\Delta W| I_1^2}{I_1^2 - I_2^2} = 2 \text{ мДж}.$$

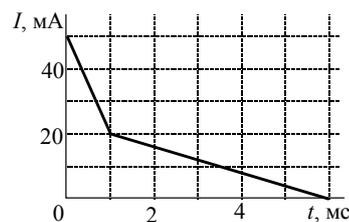
Задачи для самостоятельного решения

Индуктивность

4.22. При равномерном изменении величины тока в катушке индуктивностью $L = 6$ мГн в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 8$ мВ. На какую величину ΔI изменяется величина тока за $\tau = 3$ с?

4.23. С какой по величине скоростью $(\Delta I/\Delta t)$ нужно изменять силу тока в катушке с индуктивностью $L = 0,1$ Гн, чтобы в ней возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s = 1$ В?

4.24. Ток I в катушке индуктивностью $L = 100$ мГн уменьшают до нуля в соответствии с графиком, приведенным на рисунке. Определите максимальное напряжение на катушке во время такого выключения тока. Сопротивлением провода катушки пренебречь.



4.25. Длинный соленоид (катушка) содержит $N = 1000$ витков, площадь каждого из которых $S = 5$ см². При токе через соленоид $I = 1$ А в соленоиде возникает практически однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,01$ Тл, магнитные линии которого параллельны оси соленоида. Чему равна индуктивность L соленоида?

4.26. На длинную катушку индуктивностью $L = 0,4$ Гн плотно надет замкнутый виток провода сопротивлением $R = 1$ Ом. При равномерном уменьшении силы тока в катушке от значения $I_1 = 0,5$ А до нуля в течение времени $\Delta t = 0,01$ с в витке протекает ток $I_2 = 0,01$ А. Найдите число N витков в катушке, считая магнитное поле внутри нее однородным, а радиусы всех витков катушки одинаковыми.

4.27. ** В катушке индуктивностью $L = 100$ мГн протекает постоянный ток. В некоторый момент времени ток в катушке начинают равномерно уменьшать, и через время $\tau = 10$ мс после этого он становится равным нулю. Через какое время t после начала уменьшения тока напряжение на катушке станет равным нулю? Сопротивление провода, которым намотана катушка, равно $R = 20$ Ом.

4.28. ** В катушке индуктивностью $L = 100$ мГн протекает постоянный ток. В некоторый момент времени ток в катушке начинают равномерно увеличивать. Через время $\tau = 10$ мс после этого величина тока увеличилась в $n = 2$ раза, а напряжение на катушке возросло в $k = 3$ раза. Определите сопротивление R провода, которым намотана катушка.

Энергия магнитного поля

4.29. В катушке индуктивностью $L = 0,1$ Гн протекает постоянный ток. Магнитный поток через витки катушки равен $\Phi = 0,5$ Вб. Определите энергию W магнитного поля катушки.

4.30. Найдите энергию W магнитного поля соленоида, в котором при силе тока $I = 10$ А возникает магнитный поток $\Phi = 0,5$ Вб.

4.31. На катушке с активным сопротивлением $R = 10$ Ом поддерживается напряжение $U = 50$ В. Определите величину Φ магнитного потока через катушку, если энергия магнитного поля в ней $W = 250$ мДж.

4.32. При увеличении тока в катушке в 2 раза магнитный поток через ее витки увеличился на $\Delta\Phi = 0,04$ Вб, а энергия, запасенная в катушке, изменилась на $\Delta W = 6 \cdot 10^{-3}$ Дж. Найдите индуктивность катушки.

4.33. Энергия магнитного поля катушки с индуктивностью $L = 0,1$ Гн равна $W = 50$ мДж. Определите: а) силу тока I_0 в катушке, б) величину ЭДС самоиндукции \mathcal{E} в катушке при равномерном уменьшении силы тока от I_0 до нуля за время $\tau = 0,1$ с.

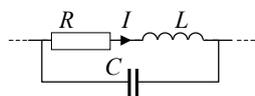
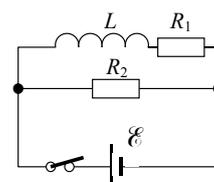
4.34. В обмотке соленоида течет ток $I_1 = 5$ А. При равномерном увеличении этого тока в $k = 2$ раза за время $\Delta t = 1$ с в соленоиде возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 2$ В. Найдите энергию W магнитного поля в соленоиде при токе I_1 .

4.35. При равномерном увеличении тока в катушке от $I_1 = 5$ А до $I_2 = 10$ А за время $\tau = 0,01$ с в катушке возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 10$ В. На какую величину ΔW увеличилась при этом энергия магнитного поля катушки?

4.36. Проволочную катушку подключили к источнику тока. Через некоторое время ток в катушке стал равен I , источник совершил работу A , а в цепи выделилось количество теплоты Q . Определите индуктивность катушки L .

4.37. Катушка индуктивностью $L = 0,1$ Гн и конденсатор подключены параллельно к источнику постоянного напряжения. Сопротивление провода, которым намотана катушка, равно $R = 100$ Ом. При каком значении емкости конденсатора C энергия магнитного поля катушки равна энергии электрического поля конденсатора?

4.38. * Индуктивность катушки $L = 1$ мГн, ЭДС источника $\mathcal{E} = 10$ В, сопротивления резисторов $R_1 = 100$ Ом и $R_2 = 200$ Ом значительно превышают сопротивление катушки и внутреннее сопротивление источника. Ключ в течение длительного времени замкнут. Определите: а) энергию W магнитного поля в катушке; б) количество теплоты Q , которое выделится на резисторе R_1 после размыкания ключа.



4.39. ** В цепи, изображенной на рисунке, по участку, состоящему из резистора сопротивлением $R = 100$ Ом и катушки индуктивностью $L = 0,01$ Гн, течет изменяющийся со временем t ток $I = \alpha \cdot t$, где $\alpha = 100$ А/с. Емкость конденсатора $C = 0,1$ мкФ. Найдите заряд q конденсатора в момент $t = 100$ мкс.

$$4.1. \quad |\mathcal{E}_i| = BVl$$

$$4.2. \quad I_m = ah\omega B / R = 3 \text{ мА}$$

$$4.3. \quad \mathcal{E} = 2VBR$$

$$4.4. \quad N = 2\pi NBS / \mathcal{E}_m \approx 0,19 \text{ с}$$

$$4.5. \quad \mathcal{E} = \frac{\Delta B \cdot l^2}{4\pi\Delta t} \approx 0,5 \text{ мВ}$$

$$4.6. \quad \Delta N = \frac{\Delta\Phi}{BS \cos \alpha} = 40$$

$$4.7. \quad N = \mathcal{E}\tau / \Phi = 40$$

4.8. Ток в контуре течет против часовой стрелки, все силы направлены внутрь прямоугольника $ABCD$ перпендикулярно сторонам

$$4.9. \quad |I| = 2\beta t / R = 2 \text{ мА}$$

$$4.10. \quad I_m = \frac{\pi r^2}{R} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|_{\max} \approx 20 \text{ мА}$$

$$4.11. \quad I_{\max} = 40 \text{ мА}$$

$$4.12. \quad \text{а) } I \approx 5 \text{ мА, б) } t \approx 1 \text{ с}$$

$$4.13. \quad I_m = \frac{\pi r^2}{R} B_m \omega \approx 0,314 \text{ А}$$

$$4.14. \quad I = \frac{\pi r^2 \omega}{R} \sqrt{B_m^2 - B^2} \approx 11 \text{ мА}$$

$$4.15. \quad \text{а) } I_m = B_0 S \omega / R = 5 \text{ мА, б) } k = 1 / \cos \alpha = 2$$

$$4.16. \quad n = 2 / (1 + \cos \alpha) = 4/3$$

$$4.17. \quad \text{а) } I = BS / RT, \text{ б) } A = (BS)^2 / RT$$

$$4.18. \quad q = \Delta\Phi / R = 2,5 \text{ мкКл}$$

$$4.19. \quad q_2 = q_1(1 - \cos \alpha) / 2 = 2,5 \text{ мкКл}$$

$$4.20. \quad q = Br / 2R_0 = 12,5 \text{ мкКл}$$

$$4.21. \quad q = \mathcal{E}\tau / NR = 0,25 \text{ мкКл}$$

$$4.22. \quad \Delta I = \mathcal{E}\tau / L = 4 \text{ А}$$

$$4.23. \quad \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_s}{L} = 10 \text{ А/с}$$

$$4.24. \quad U_m = L \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|_{\max} = 3 \text{ В}$$

$$4.25. \quad L = BSN / I = 5 \text{ мГн}$$

$$4.26. \quad N = \frac{LI_1}{I_2 R \Delta t} = 2000$$

$$4.27. \quad t = \tau - (L/R) = 5 \text{ мс}$$

$$4.28. \quad R = \frac{L(n-1)}{\tau(k-n)} = 10 \text{ Ом}$$

$$4.29. \quad W = \Phi^2 / 2L = 1,25 \text{ Дж}$$

$$4.30. \quad W = I\Phi / 2 = 2,5 \text{ Дж}$$

$$4.31. \quad \Phi = 2WR/U = 0,1 \text{ Вб}$$

$$4.32. \quad L = \frac{3}{2} \frac{\Delta\Phi^2}{\Delta W} = 0,4 \text{ Гн}$$

$$4.33. \quad \text{а) } I_0 = \sqrt{2W/L} = 1 \text{ А, б) } \mathcal{E} = \sqrt{2WL} / \tau = 1 \text{ В}$$

$$4.34. \quad W = \frac{\mathcal{E}I_1\Delta t}{2(k-1)} = 5 \text{ Дж}$$

$$4.35. \quad \Delta W = (I_1 + I_2)\mathcal{E}\tau / 2 = 0,75 \text{ Дж}$$

$$4.36. \quad L - 2(A-Q)/I^2$$

$$4.37. \quad C = L/R^2 = 10 \text{ мкФ}$$

$$4.38. \quad W = L\mathcal{E}^2 / 2R_1^2 = 5 \text{ мкДж}, \quad Q = \frac{WR_1}{R_1 + R_2} \approx 1,7 \text{ мкДж}$$

$$4.39. \quad q = C\alpha(L + Rt) = 0,2 \text{ мкКл}$$