

5. Определите, какую ускоряющую разность потенциалов должна пройти из состояния покоя частица, чтобы в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 80$ мТл, на неё действовала сила Лоренца, модуль которой $F = 20$ мкН. Масса частицы $m = 12$ мг, её заряд $q = 3,0$ мкКл. В магнитное поле частица влетает перпендикулярно линиям индукции.



§ 31. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции

После опытов Эрстеда и Ампера стало понятно, что электрические и магнитные поля имеют одни и те же источники: движущиеся электрические заряды. Это позволило предположить, что они каким-то образом связаны друг с другом. Фарадей был абсолютно уверен в единстве электрических и магнитных явлений. Вскоре после открытия Эрстеда в своём дневнике в декабре 1821 г. Фарадей записал: «Превратить магнетизм в электричество». На решение этой фундаментальной задачи ему понадобилось десять лет. После многочисленных экспериментов Фарадей сделал эпохальное открытие — замыкая и размыкая электрическую цепь одной катушки, он в замкнутой цепи другой катушки получил электрический ток. Наблюдаемое явление Фарадей назвал электромагнитной индукцией.

Магнитный поток. Индукция магнитного поля характеризует магнитное поле в конкретной точке пространства. Чтобы охарактеризовать магнитное поле во всех точках поверхности, ограниченной замкнутым контуром, ввели физическую величину, которую назвали *магнитным потоком* (потоком индукции магнитного поля).

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля (рис. 173):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (31.1)$$

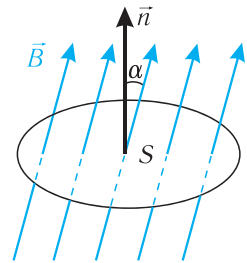


Рис. 173

Единицей магнитного потока в СИ является вебер (Вб). 1 Вб — магнитный поток однородного магнитного поля индукцией 1 Тл через плоскую поверхность, расположенную перпендикулярно индукции магнитного поля, площадь которой 1 м².

Формула (31.1) позволяет сделать вывод, что магнитный поток зависит от взаимной ориентации линий индукции магнитного поля и нормали к плоской поверхности. Магнитный поток максимален, если $\alpha = 0$, т. е. если поверхность перпендикулярна линиям индукции магнитного поля:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Если плоская поверхность параллельна линиям индукции ($\alpha = 90^\circ$), то магнитный поток через неё равен нулю.

На практике часто встречаются ситуации, когда линии индукции магнитного поля пересекают поверхности, ограниченные не одним контуром, а несколькими. Так, например, линии индукции могут пересекать поверхности, ограниченные витками соленоида, которые «параллельны» друг другу и имеют одинаковую площадь поверхности. В этом случае магнитный поток определяют по формуле

$$\Phi = NBS,$$

где N — число витков соленоида; S — площадь поверхности, ограниченной каждым витком.

Изменить магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, можно, изменяя: 1) индукцию магнитного поля, в котором находится контур; 2) размеры этого контура; 3) ориентацию контура в магнитном поле.

От теории к практике

Квадратная проволочная рамка со стороной длиной $a = 4$ см помещена в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости рамки, а модуль индукции $B = 0,5$ Тл. Какова убыль магнитного потока через поверхность, ограниченную рамкой, при её повороте на угол $\beta = 90^\circ$?

Явление электромагнитной индукции. В 1831 г. Фарадей провёл серию опытов, которые позволили установить следующие факты:

1) при движении постоянного магнита относительно катушки, подключённой к гальванометру, в катушке возникал электрический ток (стрелка гальванометра отклонялась). Причём направление тока изменялось на противоположное при изменении направления движения магнита. Это же явление происходило, если

магнит был неподвижен, а двигали катушку (рис. 174);

2) в катушке, подключённой к гальванометру, возникал электрический ток, если относительно неё двигали другую катушку, которая была подключена к источнику постоянного тока (рис. 175);

3) если две катушки намотаны на общий каркас и одну подключали к гальванометру, а другую — к источнику тока, то ток в первой катушке возникал при изменении тока во второй (рис. 176).

Во всех рассмотренных случаях электрический ток в цепи гальванометра возникал только при изменении магнитного потока через поверхности, ограниченные витками катушки, подключённой к гальванометру (рис. 177). Причём значение силы тока, возникающего в контуре, не зависело от способа изменения магнитного потока, а определялось только скоростью его изменения. Назвали такой ток индукционным током.

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Для существования тока в замкнутой электрической цепи необходимо, чтобы на свободные заряженные частицы действовали сторонние силы, т. е. в цепи должен быть источник ЭДС. Очевидно, что в опытах Фарадея источником этих сторонних сил являлся изменяющийся магнитный поток, который создавал в цепи ЭДС. Эту ЭДС назвали *электродвижущей силой индукции* или *ЭДС индукции*. Если цепь замкнута, ЭДС индукции создаёт индукционный ток, т. е. возникновение индукционного тока является вторичным эффектом.

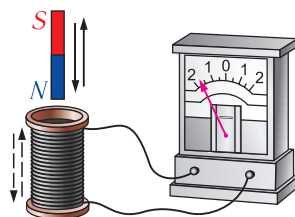


Рис. 174



Рис. 175

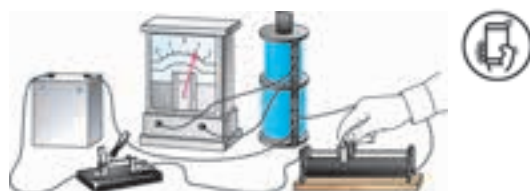


Рис. 176

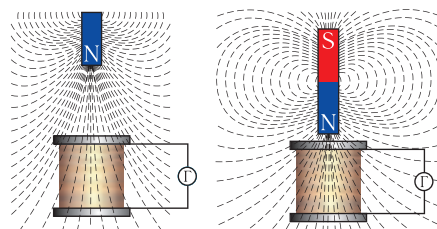


Рис. 177

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоится в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется.

От теории к практике

1. Что изменилось бы в опытах Фарадея, если бы он использовал катушки с большим количеством витков?
2. Отличается ли электрический ток, индуцированный в проводнике, от электрического тока, создаваемого любым другим источником, например гальваническим элементом?



«Превратить магнетизм в электричество»

Возникновение электрического тока при относительном движении катушки и магнита (другой катушки)

Возникновение электрического тока в одной катушке при изменении тока в другой катушке

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля:

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

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоится в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется

Из истории физики

Один из историков науки писал: «...работы других учёных — Кулона, Гальвани, Эрстеда, Араго, Ампера — представляли собой отдельные пики, тогда как Фарадей воздвиг “горную цепь” из взаимосвязанных работ».



1. Что называют магнитным потоком? Что является единицей магнитного потока в СИ?
2. Какими способами можно изменить магнитный поток через поверхность?
3. При каких условиях в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток?
4. В чём заключается явление электромагнитной индукции?



§ 32. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции

Открыв явление электромагнитной индукции, Фарадей практически за полтора месяца установил все его существенные закономерности. Ему стала понятна сущность явления, которое сыграло такую важную роль для человечества: во всех экспериментах, проведённых им, индукционный ток в проводящем контуре возникал в результате изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром. Фарадей не только открыл явление электромагнитной индукции, но и первым продемонстрировал, «что можно создать постоянный ток электричества при помощи обыкновенных магнитов», сконструировав устройство, позволяющее преобразовывать механическую энергию в электрическую.

Направление индукционного тока. Опыты Фарадея показали, что направление индукционного тока, вызванного возрастанием магнитного потока, противоположно направлению индукционного тока, вызванного его уменьшением. Исследовав явление электромагнитной индукции, петербургский академик Эмилий Христианович Ленц (1804–1865) в 1833 г. сформулировал **правило для определения направления индукционного тока (правило Ленца)**: возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток. Это означает, что при возрастании магнитного потока магнитное поле индукционного тока направлено против внешнего поля, а при убывании — магнитное поле индукционного тока направлено так же, как и внешнее поле.

В более сжатой форме правило Ленца можно сформулировать следующим образом: индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызвавшей этот ток.

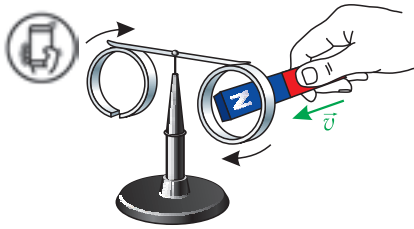


Рис. 178

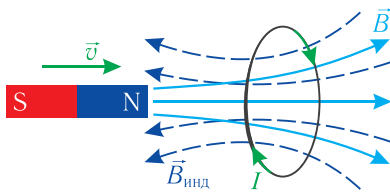


Рис. 179

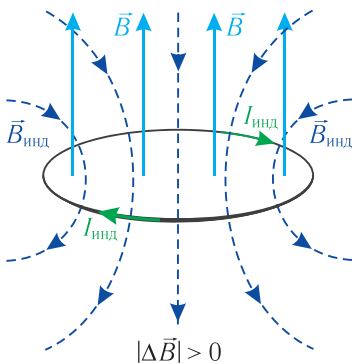


Рис. 180

приращение магнитного потока $\Delta\Phi < 0$, то направления индукций внешнего магнитного поля \vec{B} и магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$ совпадают, если $\Delta\Phi > 0$, то — противоположны;

4) зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$, по правилу буравчика (правилу часовой стрелки) определить направление индукционного тока.

От теории к практике

Изменится ли направление индукционного тока (см. рис. 178), если магнит приближать к кольцу южным полюсом? Если изменится, то как?

Правило Ленца можно проиллюстрировать, используя два алюминиевых кольца (одно из них с разрезом), закреплённых на стержне, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси (рис. 178). Из опыта следует, что при приближении постоянного магнита к сплошному кольцу оно отталкивается от магнита; при удалении магнита — кольцо притягивается к нему. Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняют возникновением в нём индукционного тока при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную кольцом. Очевидно, что при приближении магнита к кольцу направление индукционного тока таково, что индукция магнитного поля тока противоположна индукции магнитного поля постоянного магнита (рис. 179). При удалении магнита индукции магнитных полей тока и магнита совпадают по направлению. При движении магнита относительно кольца с разрезом взаимодействие не наблюдается, так как индукционный ток отсутствует.

Чтобы определить направление индукционного тока по правилу Ленца, необходимо выполнить следующие операции (рис. 180):

- 1) определить направление линий индукции внешнего магнитного поля \vec{B} ;
- 2) выяснить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через поверхность, ограниченную проводящим контуром;

- 3) определить направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$: если

Правило Ленца соответствует закону сохранения энергии применительно к явлению электромагнитной индукции. В самом деле, если бы индукционный ток имел другое направление, он мог бы существовать без затрат энергии, что противоречит закону сохранения энергии.

Открытие явления электромагнитной индукции имело большое значение. Была доказана взаимосвязь магнитных и электрических явлений, что послужило в дальнейшем отправным пунктом для разработки теории электромагнитного поля.

Закон электромагнитной индукции. Анализируя результаты опытов Фарадея, Максвелл в 1873 г. пришёл к выводу, что ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, т. е.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.1)$$

Чтобы обеспечить строгое равенство в выражении (32.1), необходимо учесть направление индукционного тока. Согласно правилу Ленца при увеличении магнитного потока $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ ЭДС индукции отрицательная ($\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$) и, наоборот, при уменьшении магнитного потока $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ ЭДС индукции положительная ($\mathcal{E}_{\text{инд}} > 0$). Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.2)$$

Таким образом, **ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.**

Выражение (32.2) называют **законом электромагнитной индукции Фарадея**, подчёркивая этим заслуги учёного в изучении указанного явления. Следует отметить, что данный закон является универсальным, т. е. ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока.

Зная ЭДС индукции, можно определить силу индукционного тока. Согласно закону Ома для полной цепи:

$$I_{\text{инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R},$$

где R — сопротивление проводника, из которого изготовлен замкнутый проводящий контур.

От теории к практике

На рисунке 181 представлен график зависимости магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, от времени. Определите ЭДС индукции в моменты времени $t_1 = 30$ мс и $t_2 = 60$ мс.

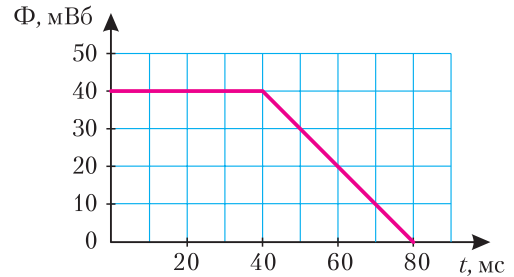


Рис. 181



Возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток (правило Ленца)

ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком (закон электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



1. Как формулируют правило Ленца?
2. Как объяснить результаты опытов со сплошным алюминиевым кольцом и движущимся постоянным магнитом?
3. Как определяют направление индукционного тока?
4. Каково направление индукционного тока в сплошном алюминиевом кольце, к которому подносят магнит (рис. 182)? Как будет двигаться кольцо? Что будет, если магнит подносить к кольцу с разрезом?
5. Как формулируют закон электромагнитной индукции?
6. Почему в формуле, являющейся математическим выражением закона электромагнитной индукции, стоит знак «минус»?

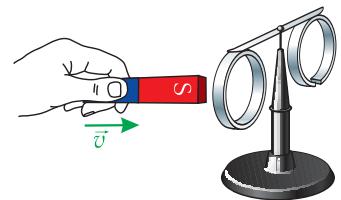


Рис. 182



Пример решения задачи

Определите направление индукционного тока в соленоиде, изображённом на рисунке 183.

Решение. При приближении северного полюса магнита к соленоиду в нём индуцируется электрический ток такого направления, при котором ближайший к магниту конец соленоида приобретает свойства северного магнитного полюса. Определяя направление тока по правилу буравчика (правилу часовой стрелки), отмечаем, что ток в соленоиде направлен от точки A к точке B . При удалении северного полюса магнита от соленоида в нём возникает индукционный ток, направленный от точки B к точке A .

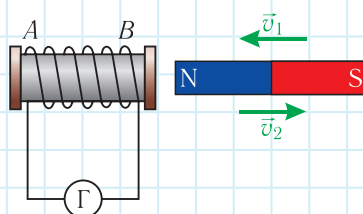


Рис. 183

Упражнение 23

1. На рисунках 184, *a*, *б* стрелками показаны направления индукционных токов в соленоидах. Определите направления движения магнитов в каждом случае.

2. Круговой контур радиусом $r = 12$ см находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,40$ Тл. Определите магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, если: а) линии индукции магнитного поля параллельны нормали к этой поверхности; б) поверхность, ограниченная контуром, параллельна линиям индукции магнитного поля; в) линии индукции магнитного поля образуют угол $\alpha = 30^\circ$ с этой поверхностью.

3. Ось соленоида, состоящего из $N = 100$ витков, параллельна линиям индукции однородного магнитного поля, модуль индукции которого $B = 0,20$ Тл. Определите магнитный поток через поверхности, ограниченные всеми витками соленоида, если площадь каждой из них $S = 16$ см².

4. Определите промежуток времени, в течение которого магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым проводником, равномерно уменьшился на $|\Delta\Phi| = 0,20$ Вб, если индуцированная в проводнике ЭДС $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 0,80$ В.

5. Определите магнитный поток через поверхность, ограниченную витком соленоида, который состоит из $N = 100$ витков, если при равномерном уменьшении до нуля модуля индукции однородного магнитного поля в соленоиде в течение промежутка времени $\Delta t = 5,0$ мс индуцируется ЭДС $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 20$ В.

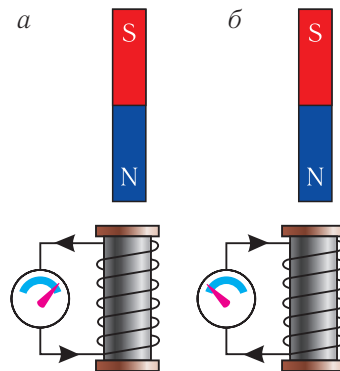


Рис. 184



§ 33. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля катушки с током

Фарадей опытным путём установил, что электромагнитная индукция проявляется во всех случаях изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Современник Фарадея американский физик Джозеф Генри (1797–1878) независимо от своего английского коллеги открыл некоторые из электромагнитных эффектов. В 1829 г. Генри обнаружил, что ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствие изменения внешнего магнитного поля. Каков механизм возникновения ЭДС индукции в этом случае?

Самоиндукция. Если электрический ток, проходящий в замкнутом проводящем контуре, по каким-либо причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле, создаваемое этим током. Это влечёт за собой изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Поскольку магнитный поток Φ пропорционален модулю магнитной индукции B поля, который, в свою очередь, пропорционален силе тока I в контуре, то

$$\Phi \sim I.$$

Коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком Φ и силой тока I Томсон (лорд Кельвин) в 1853 г. предложил название «коэффициент самоиндукции»:

$$\Phi = LI. \quad (33.1)$$

Коэффициент самоиндукции L часто называют *индуктивностью* контура. В СИ индуктивность измеряют в генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока в контуре 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, равен 1 Вб. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств среды, в которой находится этот контур.

Если электрический ток, проходящий в контуре, изменяется, то он создаёт изменяющийся магнитный поток, что приводит к появлению ЭДС индукции. Это явление назвали *самоиндукцией*.

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи.

Возникающую в этом случае ЭДС назвали *электродвижущей силой самоиндукции*. Согласно закону электромагнитной индукции,

$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Если индуктивность контура не изменяется во времени, т. е. $L = \text{const}$, то

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Поскольку контур замкнут, ЭДС самоиндукции создаёт в нём ток самоиндукции. Силу тока самоиндукции можно определить по закону Ома $I_c = \frac{\mathcal{E}_c}{R}$ где R — сопротивление контура. Согласно правилу Ленца, ток самоиндукции всегда направлен так, чтобы противодействовать изменению тока, создаваемого источником. При возрастании силы тока ток самоиндукции направлен против тока источника, а при уменьшении — направления тока источника и тока самоиндукции совпадают.

От теории к практике

Какой должна быть скорость изменения силы тока, чтобы в катушке с индуктивностью $L = 0,20$ Гн возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 4,0$ В?

Наблюдение самоиндукции. Для наблюдения явления самоиндукции соберём электрическую цепь, состоящую из катушки с большой индуктивностью, резистора с электрическим сопротивлением, равным сопротивлению обмотки катушки, двух одинаковых лампочек, ключа и источника постоянного тока. Схема цепи представлена на рисунке 185. При замыкании ключа лампочка L_2 начинает светиться практически сразу, а лампочка L_1 — с заметным запаздыванием. При возрастании силы тока I_1 , созданного источником на участке, образованном катушкой и лампочкой L_1 , ЭДС самоиндукции в катушке имеет такую полярность, что создаваемый ею ток самоиндукции I_c направлен навстречу току источника. В результате рост силы тока I_1 источника замедляется, и сила тока $I_1 - |I_c|$ не сразу достигает своего максимального значения.

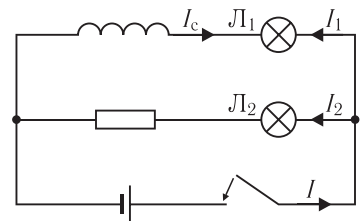


Рис. 185



Энергия магнитного поля. Явление самоиндукции можно наблюдать и при размыкании электрической цепи. Если включить лампочку параллельно катушке

в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании цепи можно увидеть, что лампочка ярко вспыхивает. Почему это происходит? При размыкании цепи сила тока в катушке убывает, что приводит к возникновению ЭДС самоиндукции. Возникающий в цепи ток самоиндукции, согласно правилу Ленца, совпадает по направлению с током катушки, не позволяя ему резко уменьшать силу тока. Это и обеспечивает вспышку лампочки.

Откуда берётся энергия, обеспечивающая вспышку лампочки? Это не энергия источника тока, так как он уже отсоединён. Вспышка лампочки происходит одновременно с уменьшением силы тока в катушке и создаваемого током магнитного поля. Можно предположить, что запасённая в катушке в процессе самоиндукции энергия магнитного поля превращается во внутреннюю энергию спирали лампочки и энергию её излучения.



Расчёты подтверждают, что энергию магнитного поля можно определить по формуле

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

где L — индуктивность контура; I — сила тока.

От теории к практике

Какова индуктивность катушки, если при силе тока $I = 2,0$ А энергия магнитного поля катушки $W_m = 1,2$ Дж?



Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности контура (катушки) и скорости изменения силы тока в нём:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Явление самоиндукции происходит при изменении силы тока в цепи, содержащей индуктивность

Энергия магнитного поля катушки с током пропорциональна квадрату силы тока:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$



1. Что называют самоиндукцией?
2. В каких опытах можно наблюдать явление самоиндукции?
3. От чего зависит ЭДС самоиндукции?
4. Что называют индуктивностью? В каких единицах в СИ её измеряют?
5. Как вычислить энергию магнитного поля катушки с током?



Примеры решения задач

Пример 1. На рисунке 186 представлен график зависимости силы тока, проходящего по соленоиду, от времени. Определите максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции в соленоиде, если его индуктивность $L = 40$ мГн.

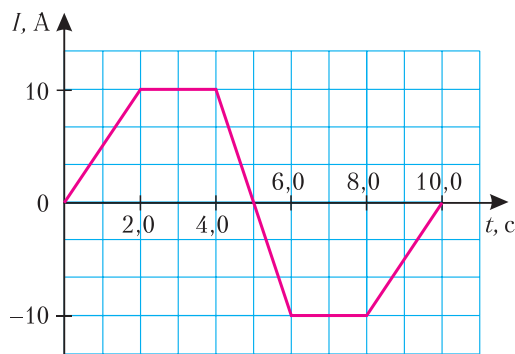


Рис. 186

Дано:

$$L = 40 \text{ мГн} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$|\mathcal{E}_c|_{\text{max}} \text{ — ?}$$

Решение. ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.
Анализируя график (рис. 186), можно сделать вывод, что сила тока, проходящего по соленоиду, изменяется на трёх участках:

1) от момента времени $t_1 = 0,0$ с до момента времени $t_2 = 2,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_1 = 10$ А за промежуток времени $\Delta t_1 = 2,0$ с;

2) от момента времени $t_3 = 4,0$ с до момента времени $t_4 = 6,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_2 = -20$ А за промежуток времени $\Delta t_2 = 2,0$ с;

3) от момента времени $t_5 = 8,0$ с до момента времени $t_6 = 10,0$ с сила тока изменяется на $\Delta I_3 = 10$ А за промежуток времени $\Delta t_3 = 2,0$ с.

Поскольку промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 2,0$ с, то очевидно, что максимальное значение модуля скорости изменения силы тока, а следовательно, и максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции, создаваемой

в соленоиде, соответствует промежутку времени $\Delta t_2 = 2,0$ с (от $t_3 = 4,0$ с до $t_4 = 6,0$ с):

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = L \left| \frac{\Delta I_2}{\Delta t_2} \right|.$$

Таким образом,

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн} \cdot \frac{|-20 \text{ А}|}{2,0 \text{ с}} = 0,40 \text{ В}.$$

Ответ: $|\mathcal{E}_c|_{\max} = 0,40 \text{ В}.$

Пример 2. На рисунке 187 представлен график зависимости ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке с индуктивностью $L = 2,0$ мГн, от времени. Определите изменения силы тока на участках I, II и III графика. Чему равна энергия магнитного поля в момент времени $t = 4,0$ с, если в начальный момент времени сила тока в катушке $I = 0$?

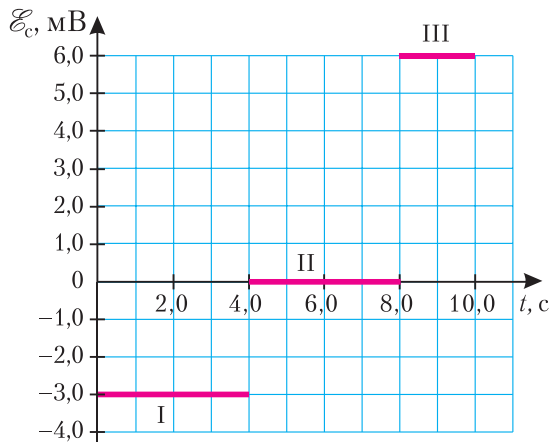


Рис. 187

Дано:

$$\begin{aligned} L &= 2,0 \text{ мГн} = \\ &= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ t &= 4,0 \text{ с} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{I}} &= ? \quad \Delta I_{\text{II}} = ? \\ \Delta I_{\text{III}} &= ? \quad W_{\text{M}} = ? \end{aligned}$$

Решение. Анализируя график, можно сделать вывод, что на участке I ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{\text{сI}} = -3,0$ мВ, на участке III — $\mathcal{E}_{\text{сIII}} = 6,0$ мВ. Изменение силы тока на этих участках графика можно определить, воспользовавшись законом электромагнитной индукции для явления самоиндукции:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; \Delta I = -\frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{L}.$$

$$\Delta I_I = -\frac{-3,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 4,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 6,0 \text{ А}; \Delta I_{III} = -\frac{6,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 2,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = -6,0 \text{ А}.$$

На участке II графика $\mathcal{E}_{cII} = 0$, следовательно, сила тока не изменялась: $\Delta I_{II} = 0$.

В момент времени $t = 4,0 \text{ с}$ энергия магнитного поля катушки $W_M = \frac{LI^2}{2}$.

Следовательно, $W_M = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot (6,0 \text{ А})^2}{2} = 36 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 36 \text{ мДж}$.

Ответ: $\Delta I_I = 6,0 \text{ А}$; $\Delta I_{II} = 0$; $\Delta I_{III} = -6,0 \text{ А}$; $W_M = 36 \text{ мДж}$.



Упражнение 24

1. Сила тока, проходящего по замкнутому проводящему контуру, $I = 1,2 \text{ А}$. Магнитное поле этого тока создаёт магнитный поток $\Phi = 3,0 \text{ мВб}$ через поверхность, ограниченную контуром. Определите индуктивность контура.

2. При равномерном изменении силы тока в катушке на $\Delta I = -4,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,10 \text{ с}$ в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 20 \text{ В}$. Определите индуктивность катушки.

3. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 1,2 \text{ Гн}$, при равномерном изменении силы тока от $I_1 = 2,0 \text{ А}$ до $I_2 = 6,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,60 \text{ с}$. Определите приращение энергии магнитного поля при заданном изменении силы тока.

4. На рисунке 188 представлен график зависимости силы тока в катушке, индуктивность которой $L = 10 \text{ мГн}$, от времени. Определите ЭДС самоиндукции через промежутки времени $t_1 = 10 \text{ с}$ и $t_2 = 20 \text{ с}$ от момента начала отсчёта времени.

5. Сила тока в катушке равномерно уменьшилась от $I_1 = 10 \text{ А}$ до $I_2 = 5,0 \text{ А}$. При этом энергия магнитного поля изменилась на $\Delta W_M = -3,0 \text{ Дж}$. Определите индуктивность катушки и первоначальное значение энергии магнитного поля.

6. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 0,12 \text{ Гн}$, при равномерном уменьшении силы тока от $I_1 = 8,0 \text{ А}$, если за промежуток времени $t_1 = 0,20 \text{ с}$ энергия магнитного поля уменьшилась в $\alpha = 2,0$ раза.

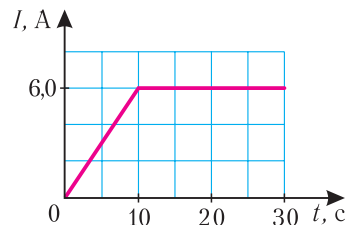


Рис. 188



Обобщение и систематизация знаний

МАГНИТНОЕ

Магнитное поле тока

Модуль индукции магнитного поля

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

Принцип суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Направление индукции магнитного поля \vec{B} :

- правило буравчика;
- правило правой руки;
- правило часовой стрелки

Сила, которой однородное магнитное поле действует

На прямолинейный участок проводника с током.

$$\text{Модуль: } F_A = B I \Delta l \sin \alpha$$

Направление: правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление силы Ампера, действующей на прямолинейный участок проводника с током

На движущуюся заряженную частицу.

$$\text{Модуль: } F_L = |q|vB \sin \alpha.$$

Направление: правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца

ПОЛЕ

Электромагнитная индукция

Магнитный поток

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

Коэффициент самоиндукции
(индуктивность)

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Закон электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Сила индукционного тока

$$I_{\text{инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R}$$

ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Направление
индукционного тока:
правило Ленца

Энергия магнитного поля контура с током

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$



Задания для самоконтроля

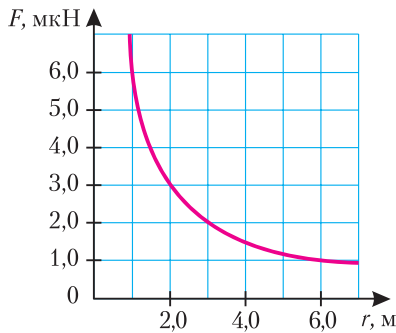


Рис. 189

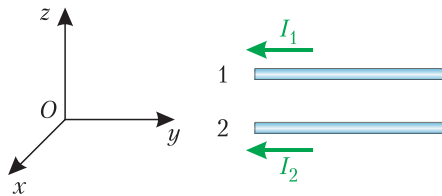


Рис. 190

- 2) противоположно положительному направлению оси z ;
- 3) совпадает с положительным направлением оси y ;
- 4) противоположно положительному направлению оси y ;
- 5) совпадает с положительным направлением оси x .

3. При перемещении прямолинейного участка проводника на расстояние $s = 17$ см перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля внешней силой совершена работа $A = 38$ мДж. Модуль индукции однородного магнитного поля $B = 0,56$ Тл, а сила тока в проводнике $I = 4,0$ А. Определите

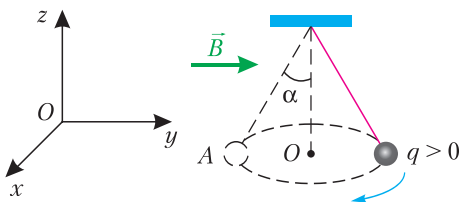


Рис. 191

1. На рисунке 189 представлен график зависимости модуля сил магнитного взаимодействия двух длинных расположенных параллельно друг другу прямолинейных проводников, по которым проходят постоянные электрические токи, от расстояния между ними. Определите модуль сил магнитного взаимодействия проводников, если, не меняя сил токов в проводниках, увеличить расстояние между ними до $r = 10$ м, сохранив длину прямолинейных параллельных участков неизменной.

2. Если тонкие длинные прямолинейные проводники 1 и 2, по которым проходят постоянные электрические токи (рис. 190), параллельны друг другу, то направление силы Ампера, действующей на проводник 1 со стороны магнитного поля проводника 2:

1) совпадает с положительным направлением оси z ;

длину участка проводника, если силу тока в нём и скорость его движения поддерживали постоянной.

4. Маленький положительно заряженный шарик, подвешенный на лёгкой нерастяжимой непроводящей нити, движется по окружности в горизонтальной плоскости (рис. 191) в однородном

магнитном поле. Как направлена сила Лоренца, действующая на шарик в момент прохождения им точки A :

- 1) совпадает с положительным направлением оси z ;
- 2) направлена противоположно положительному направлению оси z ;
- 3) совпадает с положительным направлением оси y ;
- 4) направлена противоположно положительному направлению оси y ;
- 5) совпадает с положительным направлением оси x ?

5. Две частицы, массы которых m_1 и $m_2 = \frac{m_1}{16}$, движутся в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Кинетические энергии частиц одинаковые, а соотношение между радиусами траекторий, описываемых частицами, $R_2 = 2R_1$. Определите отношение модулей зарядов частиц.

6. Протон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите, через какой промежуток времени направление скорости движения протона изменится на угол $\alpha = 90^\circ$, если модуль магнитной индукции поля $B = 0,50$ мТл. Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

7. Ось соленоида составляет с индукцией однородного магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$. Площадь поверхности, ограниченной каждым из $N = 100$ витков соленоида, $S_1 = 12$ см². Определите ЭДС индукции, которая возникает в соленоиде, если модуль индукции магнитного поля равномерно изменяется со скоростью $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 18 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

8. На рисунке 192 представлен график зависимости модуля индукции однородного магнитного поля от времени. Определите максимальное значение ЭДС индукции, возникающей в витке, если линии индукции магнитного поля перпендикулярны плоскости витка и площадь поверхности, ограниченной витком, $S = 24$ см².

9. Магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, изготовленным из проводника, изменяется с течением времени по закону $\Phi = A - Ct$, где $A = 2,5$ Вб, $C = 0,20 \frac{\text{Вб}}{\text{с}}$. Определите силу индукционного тока в контуре, если его сопротивление $R = 5,0$ Ом.

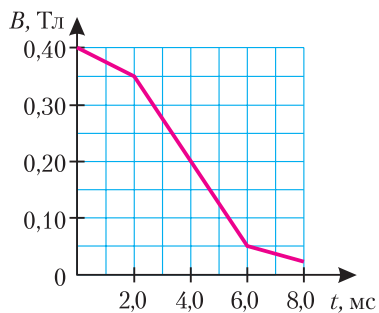


Рис. 192

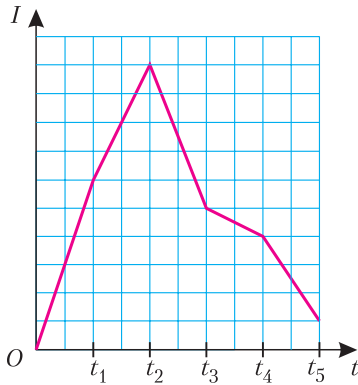


Рис. 193

10. На рисунке 193 представлен график зависимости силы тока, проходящего по замкнутому проводящему контуру с постоянной индуктивностью, от времени. Укажите интервал времени, в пределах которого значение модуля ЭДС самоиндукции $|\mathcal{E}_c|$ минимально.

11. Сила тока в контуре с постоянным коэффициентом самоиндукции изменяется с течением времени по закону $I = C + Dt$, где $C = 5,0 \text{ А}$, $D = -1,0 \frac{\text{А}}{\text{с}}$. Определите магнитный поток в конце четвертой секунды, если в момент начала отсчёта времени магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, $\Phi_0 = 85 \text{ мВб}$.

12. В течение промежутка времени $\Delta t = 10 \text{ мс}$ сила тока в катушке индуктивности равномерно возрастала от $I_1 = 2,0 \text{ А}$ до $I_2 = 6,0 \text{ А}$. При этом в катушке возникала ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -20 \text{ В}$. Определите собственный магнитный поток в конце процесса нарастания силы тока.

