

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):

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

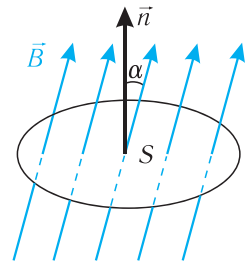


Рис. 173

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 м<sup>2</sup>.

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.

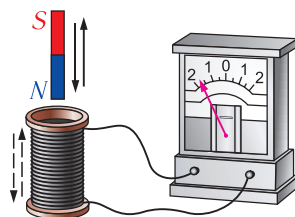


Рис. 174



Рис. 175

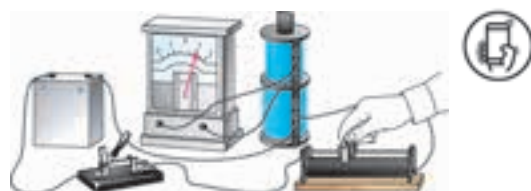


Рис. 176

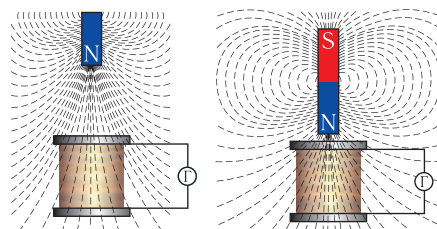


Рис. 177

**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.

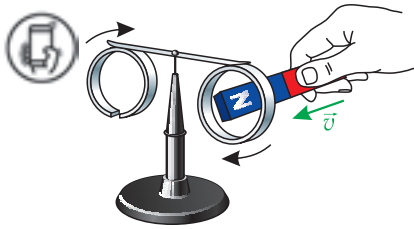


Рис. 178

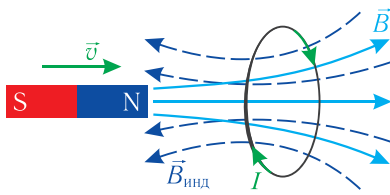


Рис. 179

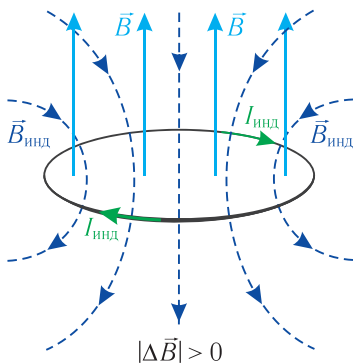


Рис. 180

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 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 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.

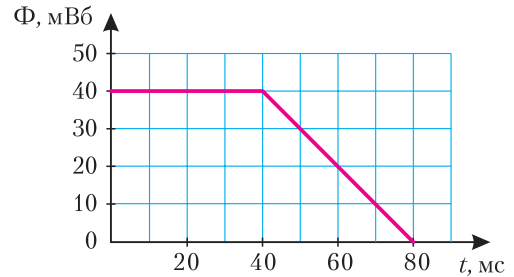


Рис. 181



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»?

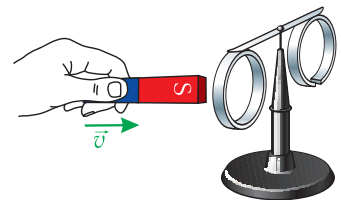


Рис. 182



**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  $A$ .

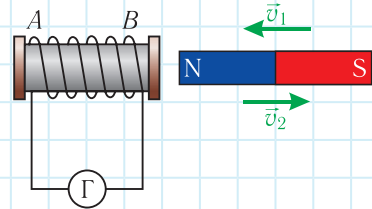


Рис. 183

**Упражнение 23**

1. На рисунках 184, *а*, *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  $S = 16$  см<sup>2</sup>.

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.

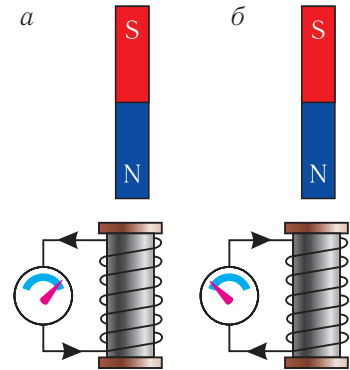


Рис. 184

