

Электромагнитная индукция

Закон Фарадея

В 1831 г. М. Фарадеем экспериментально было обнаружено, что в замкнутом контуре возникает электрический ток при изменении магнитного потока, пронизывающего его. Это явление было названо *электромагнитной индукцией* (индукция — значит наведение).

Проводя многочисленные опыты, Фарадей установил, что в замкнутых проводящих контурах возникает электрический ток при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур, независимо от того, каким способом достигается изменение потока индукции магнитного поля во времени. Ток, возникающий при электромагнитной индукции, называют *индукционным*.

Рассмотрим возникновение ЭДС индукции, а следовательно, и индукционного тока. Пусть проводник без тока длиной l движется в магнитном поле со скоростью v . Магнитное поле однородно-

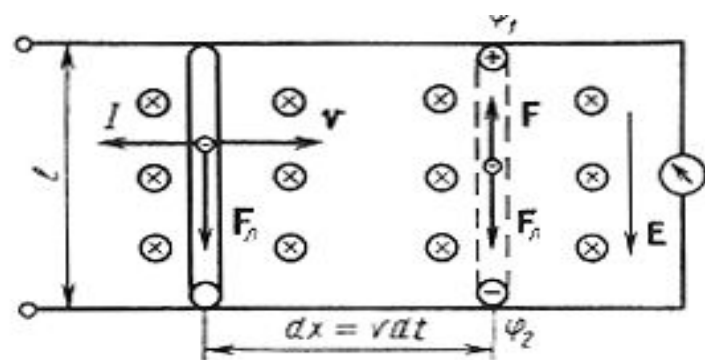


Рис. 3.60

электрон со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Заряд электрона отрицательный, поэтому сила Лоренца F_L направлена вниз. Следовательно, электроны под действием этой силы движутся вниз и в нижней части проводника длиной l будут накапливаться отрицательные заряды, а в верхней — положительные. В результате этого образуется разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$; таким образом, в проводнике возникает электрическое поле напряженностью E , которое препятствует дальнейшему перемещению электронов.

Заряды перестанут перемещаться при такой напряженности E электрического поля, когда сила eE , действующая со стороны электрического поля, будет равна по модулю, но противоположна по направлению силе $e\mathbf{v}\mathbf{B}$, действующей со стороны магнитного поля:

$$eE = -e\mathbf{v}\mathbf{B} \text{ или } E = -vB. \quad (3.151)$$

дно. вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости (рис. 3.60) от нас. При движении проводника вправо свободные электроны, содержащиеся в нем, будут двигаться также вправо, т. е. возникает конвекционный ток. Направление этого тока противоположно направлению движения электронов. На каждый движущийся

Напряженность E электрического поля в движущемся проводнике длиной l и разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ связаны между собой соотношением

$$\varphi_1 - \varphi_2 = El$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -vBl.$$

Если такой проводник замкнуть, то по цепи пойдет ток.

Таким образом, на концах проводника длиной l , движущегося со скоростью v в однородном магнитном поле B , индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -vBl. \quad (3.152)$$

Учитывая, что $v = dx/dt$, преобразуем формулу (3.152):

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -B \frac{l dx}{dt},$$

где $l dx = dS$ — площадь контура, «ометаемого» проводником длиной l при движении за промежуток времени dt . Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{B dS}{dt},$$

где $B dS = d\Phi$. Следовательно,

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.153)$$

Правило Ленца

ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром (закон электромагнитной индукции, или закон Фарадея).

Используя закон Ома для полной цепи и закон Фарадея, получаем выражение для индукционного тока:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.154)$$

Из уравнения (3.154) следует, что *индукционный ток зависит от сопротивления контура.*

Направление индукционного тока определяется по правилу Ленца.

Индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызывающей ток (правило Ленца). Знак минус в формуле (3.153) отражает закон Ленца. При

возрастании магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt} > 0$, $\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$, $I < 0$; при умень-

шении магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, $\mathcal{E}_{\text{инд}} > 0$, $I > 0$.

Электродвижущая сила в цепи — это результат действия сторонних сил, т. е. сил незлектрического происхождения. При движении проводника в магнитном поле роль сторонних сил выполняет сила Лоренца, под действием которой происходит разделение зарядов, в результате чего на концах проводника появляется разность потенциалов. ЭДС индукции в проводнике является работой по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника.

Таким образом, перемещение магнитного поля означает наличие

Таким образом, переменное магнитное поле вызывает появление индуцированного электрического поля. Это поле является непотенциальным, так как работа, совершаемая в этом поле при перемещении единичного положительного заряда по замкнутой цепи, равна ЭДС индукции, а не нулю. Такие поля называют вихревыми. Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты сами на себя в отличие от линий напряженности электростатического поля.

Если замкнутый контур содержит N последовательно соединенных витков (например, катушка или соленоид), то ЭДС индукции равна сумме ЭДС каждого витка:

$$\xi_{\text{инд}} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.155)$$

где $d\Psi = N d\Phi$ — потокосцепление, т. е. суммарный магнитный поток сквозь N витков.

Закон Фарадея может быть непосредственно получен и из

Самоиндукция. Индуктивность

ЭДС электромагнитной индукции, которая возникает в контуре при изменении силы тока в нем, называется ЭДС *самоиндукции*. Это частный случай электромагнитной индукции.

ЭДС самоиндукции определяется из закона Фарадея:

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнитный поток, сцепленный с контуром, всегда пропорционален силе тока в нем:

$$\Phi = LI. \quad (3.156)$$

Коэффициент пропорциональности L называют *коэффициентом самоиндукции (индуктивностью контура)*.

Индуктивность — одна из основных характеристик цепи переменного тока. Подставляя в формулу (3.153) выражение (3.156), получаем

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3.157)$$

Если контур представляет собой соленоид, содержащий N витков, то

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.158)$$

где $d\Psi$ — *потокосцепление*.

В результате самоиндукции при замыкании цепи сила тока в соленоиде никогда сразу не достигает максимального значения, а нарастает постепенно. При размыкании цепи возникает индукционный ток, идущий в том же направлении, что и основной, и проявляющийся в виде искры на контактах рубильника.

Индуктивность L зависит от формы и размеров соленоида, а также от магнитных свойств окружающей среды. Если размеры, форма соленоида и магнитные свойства окружающей среды не изменяются, то

$$L = \text{const.}$$

Индуктивность соленоида

Определим индуктивность соленоида, т. е. катушки, длина l которой много больше ее диаметра. В этом случае можно пренебречь искажением поля вблизи концов соленоида. Напряженность поля во всех точках внутри соленоида одинакова и равна $H = In$, где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида. Если общее число витков соленоида равно N , то $H = I \frac{N}{l}$. Магнитный поток, пронизывающий один виток соленоида, равен

$$\Phi = B \cdot S = \mu \mu_0 I \frac{N}{l} \cdot S,$$

где S — площадь поперечного сечения соленоида; μ — относительная магнитная проницаемость окружающей среды. Полный магнитный поток равен *потокосцеплению*:

$$\Psi = N\Phi = \mu \mu_0 \frac{N^2 I}{l} S.$$

Так как $Sl = V$ (объем соленоида), то

$$\Psi = \mu \mu_0 \frac{N^2 I}{l^2} V = \mu \mu_0 n^2 VI.$$

Поэтому индуктивность соленоида

$$L = \mu \mu_0 n^2 V, \text{ или } L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l}. \quad (3.159)$$

Взаимоиндукция

Взаимной индукцией называют возникновение ЭДС индукции в одном из контуров (1) при изменении силы тока в другом (2), находящемся вблизи него (рис. 3.61).

Явление взаимной индукции рассмотрим на примере трансформатора. Если на общий сердечник намотаны две катушки, то изменение силы тока в одной из них (1) будет индуцировать

в другой катушке (2) ЭДС, которую можно определить по закону Фарадея. Если по первой катушке пропустить ток I_1 , то он создаст магнитное поле, магнитный поток которого пронизывает катушку 2. Очевидно, что поток Φ_2 , пронизывающий катушку 2, зависит от индукции магнитного поля в тех местах, где она находится. Индукция магнитного поля зависит от силы тока I_1 , протекающего по катушке 1, формы, размеров и взаимного расположения

катушек, а также магнитных свойств окружающей среды. Эту зависимость учитывает коэффициент M_{21} , называемый взаимной индуктивностью. Тогда

$$\Phi_2 = M_{21} I_1. \quad (3.160)$$

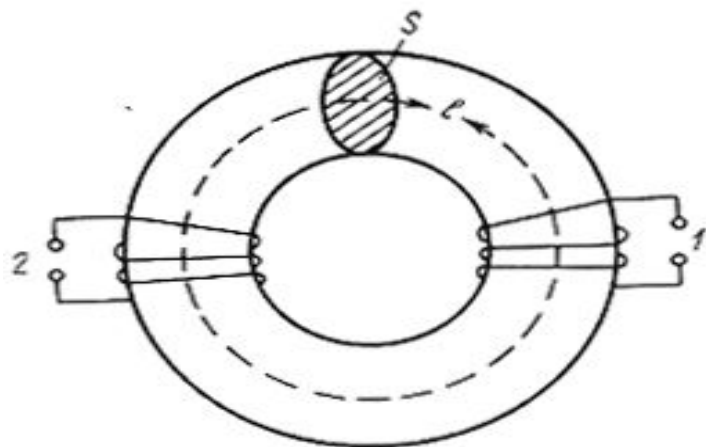


Рис. 3.61

По закону электромагнитной индукции Фарадея, ЭДС, возбуждаемая в катушке 2 переменным магнитным полем катушки 1, равна

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

Проводя аналогичные рассуждения для катушки 2, получаем, что магнитный поток Φ_1 и электродвижущая сила \mathcal{E}_1 , вызываемая в первом контуре переменным током I_2 второго контура, равны

$$\Phi_1 = M_{12} I_2, \quad \mathcal{E}_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt},$$

где коэффициенты $M_{21} = M_{12} = M$ являются характеристикой двух контуров.

В большинстве трансформаторов первичная и вторичная обмотки наматываются одна поверх другой так, что магнитный поток, пронизывающий их, одинаков, т. е. отношение $d\Phi/dt$ одинаково для обеих обмоток. Если число витков первичной катушки N_1 , а вторичной — N_2 , то в первичной и вторичной катушках индуцируются ЭДС

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad \mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношение этих ЭДС равно $\mathcal{E}_1/\mathcal{E}_2 = N_1/N_2$.

Таким образом, система из двух катушек, соединенных ферромагнитным сердечником, представляет собой трансформатор, с помощью которого можно повышать или понижать напряжение переменного тока в зависимости от числа витков первичной и вторичной обмоток.

Энергия магнитного поля

Если в контуре с индуктивностью L течет ток I , то в момент размыкания цепи возникает индукционный ток и им совершается работа. Эта работа совершается за счет энергии исчезнувшего при размыкании цепи магнитного поля. На основании закона сохранения и превращения энергии энергия магнитного поля превращается главным образом в энергию электрического поля, за счет которой происходит нагревание проводников. Работа может быть определена из соотношения $dA = \mathcal{E}_{\text{сн}} I dt$.

Так как $\mathcal{E}_{\text{сн}} = -L \frac{dI}{dt}$, то

$$dA = -LI dI.$$

Уменьшение энергии магнитного поля равно работе тока, поэтому

$$W_{\text{м}} = \int_I^0 dA = -L \int_I^0 I dI = \frac{LI^2}{2}. \quad (3.161)$$

Формула (3.161) справедлива для любого контура и показывает, что энергия магнитного поля зависит от индуктивности контура и силы тока, протекающего по нему.

Рассчитаем энергию однородного магнитного поля длинного соленоида, индуктивность которого определяется по формуле $L = \mu\mu_0 n^2 V$. В этом случае формула (3.161) примет вид

$$W_{\text{м}} = \frac{\mu\mu_0 n^2 V I^2}{2}.$$

Учитывая, что напряженность поля внутри бесконечно длинного соленоида $H = In$, получаем

$$W_{\text{м}} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V. \quad (3.162)$$

Сравнивая выражения для собственных энергий конденсатора

$$W_3 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \text{ и соленоида } W_M = \frac{1}{2} LI^2 \text{ с потенциальной } W_{\text{п}} = \frac{1}{2} kx^2 \text{ и ки-}$$

нетической $W_{\text{к}} = \frac{1}{2} mv^2$ энергиями, можно провести аналогию

между электромагнитными и механическими явлениями. Так, для электрического поля величина $1/C$, обратная емкости, аналогична упругости пружины, а для магнитного поля индуктивность L аналогична массе m тела. Таким образом, индуктивность является мерой «инертности» контура по отношению к изменению в нем тока.