

43-44 Электромагнитная индукция. Явление и закон.

7.1. Явление и закон электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция представляет собой одно из важнейших явлений, наблюдаемых в магнитном поле. Она была обнаружена в 1831 г. английским физиком Майклом Фарадеем. Суть явления в том, что **при изменении магнитного потока**, пронизывающего какой-либо контур (обмотку), независимо от того, чем вызвано изменение потока, **в контуре (обмотке) наводится сила e** .

Закон электромагнитной индукции устанавливает количественное выражение для наведенной (индуктированной) ЭДС.

Электродвижущая сила, наведенная (индуктированная) в контуре, **равна скорости изменения потокосцепления контура Ψ** , взятой с отрицательным знаком:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}. \quad (7.1)$$

Потокосцепление контура Ψ равно алгебраической сумме потоков, пронизывающих отдельные витки обмотки:

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n.$$

Если все витки обмотки N пронизываются одним и тем же **потоком Φ** , то

$$\Psi = N\Phi$$

и ЭДС, наведенная в катушке,

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7.2)$$

7.2. Правило Ленца

В 1833 г. профессор Петербургского университета Э.Х. Ленц установил общее правило для определения направления индукти-

рованного тока и электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия магнитного поля с индуцированным током.

Правило Ленца формулируется следующим образом: **при любом изменении магнитного потока, сцепляющегося с каким-либо проводящим контуром, в контуре возникают явления электрического и механического характера, препятствующие изменению магнитного потока.**

Этому правилу соответствует знак « \rightarrow » в формулах (7.1) и (7.2), выражающих закон электромагнитной индукции, если принять положительными направления магнитного потока и индуцированной в контуре ЭДС, удовлетворяющие правилу правоходового винта (рис. 7.1).

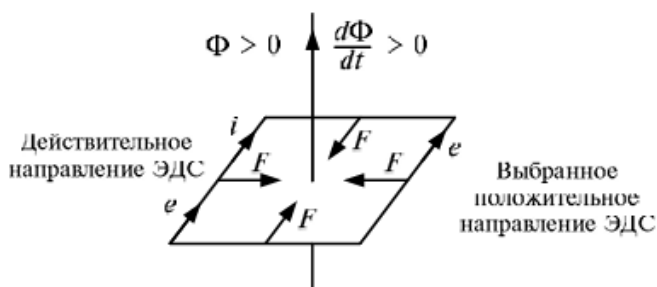


Рис. 7.1. Иллюстрация правила Ленца

Предположим, положительный магнитный поток Φ , сцепленный с контуром, увеличивается. Приращение магнитного потока $d\Phi$ и скорость его изменения $\frac{d\Phi}{dt}$ положительны ($d\Phi > 0$, $\frac{d\Phi_1}{dt} > 0$).

Согласно закону электромагнитной индукции (см. формулу (7.2)), наведенная в контуре ЭДС отрицательна ($e < 0$), т. е. направлена против выбранного положительного направления (см. рис. 7.1).

Наведенная в контуре ЭДС стремится вызвать электрический ток i , направление которого совпадает с направлением ЭДС. Электрический ток i создает вторичный магнитный поток, который, согласно правилу буравчика, действует против основного потока Φ , т. е. препятствует его увеличению.

Одновременно в контуре возникают электромагнитные силы F , стягивающие контур (направление силы определяется правилом левой руки). Тенденция к уменьшению поверхности, ограниченной контуром, направлена на уменьшение основного потока Φ .

При уменьшении основного магнитного потока $\left(d\Phi < 0, \frac{d\Phi}{dt} < 0 \right)$

наведенная ЭДС положительна, т. е. совпадает с выбранным положительным направлением. Наведенный в контуре ток i создаст вторичный магнитный поток, совпадающий по направлению с основным потоком, т. е. будет препятствовать уменьшению основного магнитного потока. Возникающие ЭДС будут стремиться расширить контур с током, т. е. увеличить магнитный поток, сцепленный с ним.

7.3. ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле. Правило правой руки

В проводнике, движущемся в магнитном поле так, что он пересекает линии магнитной индукции, наводится ЭДС. Это явление – разновидность электромагнитной индукции.

Рассмотрим отрезок АБ прямолинейного проводника, который движется, пересекая под прямым углом линии магнитной индукции равномерного поля с магнитной индукцией B (рис. 7.2, а).

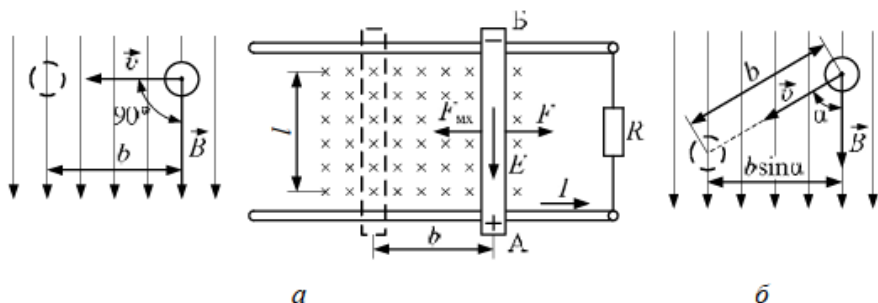


Рис. 7.2. Наведение ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле:
а – проводник пересекает линии магнитной индукции под углом $\alpha = 90^\circ$;
б – проводник пересекает линии магнитной индукции под углом $\alpha < 90^\circ$

На рисунке 7.2, а проводник АБ перемещается в направлении механической силы $F_{\text{мх}}$ по металлическим шинам, соединенным между собой через сопротивление R .

Проводник АБ, отрезки шин и сопротивление R образуют замкнутый проводящий контур. При перемещении проводника на расстояние b с постоянной скоростью v магнитный поток, сцепленный с этим контуром, увеличивается за счет увеличения площади поверхности, ограниченной контуром.

Приращение магнитного потока

$$\Delta\Phi = B\Delta S = Bbl,$$

где l – длина части проводника АБ, находящейся в магнитном поле.

Абсолютная величина ЭДС в контуре

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{Bbl}{\Delta t},$$

где Δt – время, в течение которого проводник АБ переместился на расстояние b ;

$\frac{b}{\Delta t} = v$ – скорость движения проводника, поэтому

$$E = Blv.$$

Если проводник будет перемещаться под углом $\alpha < 90^\circ$ к направлению магнитной индукции поля (см. рис. 7.2, б), то приращение магнитного потока за время Δt при той же скорости v будет

$$\Delta\Phi = Blb \sin \alpha,$$

ЭДС в контуре

$$E = Blv \sin \alpha.$$

При $\alpha = 90^\circ$ определяется наибольшее значение ЭДС при данных величинах B , v , l . При $\alpha = 0$ (проводник движется вдоль линий магнитной индукции) ЭДС равна нулю.

Проводник АБ входит в замкнутый проводящий контур. Под действием наведенной ЭДС в контуре установится перемещение электрических зарядов, т. е. появится электрический ток.

Для определения направления наведенной ЭДС применяют правило правой руки: если расположить правую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а отогнутый большой палец показывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца покажут направление наведенной в проводнике ЭДС. Электрический ток в контуре совпадает по направлению с ЭДС.

В соответствии с этим правилом на рисунке 7.2, а показано направление наведенной ЭДС E и тока I .

Все изложенное о возникновении индуктированной ЭДС в проводнике справедливо и тогда, когда проводник остается неподвижным, а движется система магнитных полюсов так, что линии магнитной индукции пересекают проводник. В этом случае, определяя направление ЭДС по правилу правой руки, нужно считать проводник движущимся в направлении, противоположном направлению движения магнитных полюсов.

7.4. Взаимное преобразование механической и электрической энергий

Электромеханическое действие магнитного поля и электромагнитная индукция используются для преобразования механической энергии в электрическую и обратно. Устройства, при помощи которых эти преобразования осуществляются, называются электрическими машинами. Машина для преобразования механической энергии в электрическую называется генератором, а для обратного преобразования – двигателем.

Рассмотрим принцип преобразования механической энергии в электрическую.

Проводник AB (см. рис. 7.2, а) движется с постоянной скоростью за счет механической энергии какого-либо двигателя – источника механической энергии.

Механическая мощность движения проводника

$$P_{\text{мех}} = F_{\text{мех}} v, \quad (7.3)$$

где $F_{\text{мех}}$ – сила, действующая на проводник со стороны двигателя.

Благодаря электромагнитной индукции в проводнике возникают ЭДС и ток

$$I = \frac{E}{(R_{вт} + R)},$$

где $R_{вт}$ – сопротивление проводника АБ (внутреннее сопротивление источника электрической энергии);

R – сопротивление внешней части цепи, включая сопротивление приемника и части шин, входящей в контур.

В данном случае проводник АБ является источником ЭДС, электрическая мощность которого

$$P = EI.$$

С появлением тока в проводнике АБ возникает ЭДС F , действующая в направлении, перпендикулярном направлению тока. Применяя правило левой руки, можно убедиться в том, что ЭДС F направлена против силы $F_{мх}$. Следовательно, внешняя сила $F_{мх}$ в данном случае движущая, а F – тормозная.

При постоянной скорости v (установившееся движение) движущая и тормозная силы равны:

$$F_{мх} = F = BIl.$$

Подставив выражение силы в формулу (7.3), получим

$$P_{мх} = BIlv.$$

Поскольку

$$Blv = E,$$

то

$$P_{мх} = EI = P. \quad (7.4)$$

Следовательно, механическая мощность двигателя равна электрической мощности источника.

Выражение (7.4) показывает, что при движении проводника в магнитном поле в направлении механической силы происходит полное преобразование механической энергии в электрическую.

Напряжение на концах проводника $U_{АБ}$ является одновременно напряжением на внешней части цепи, которое меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения:

$$U_{AB} = E - IR_{вт}.$$

Рассмотрим принцип преобразования электрической энергии в механическую.

На рисунке 7.3 представлена электрическая цепь с тем же проводником АБ, как и на рисунке 7.2, но вместо приемника электрической энергии R в цепь входит источник электрической энергии с ЭДС E_0 .

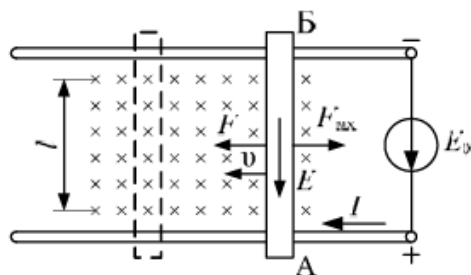


Рис. 7.3. Перемещение проводника в магнитном поле под действием электромагнитной силы F

Под действием ЭДС E_0 в замкнутом проводящем контуре возникнет электрический ток I , совпадающий по направлению с ЭДС E_0 . На проводник АБ, по которому протекает ток I , в магнитном поле будет действовать электромагнитная сила $F = BI l$, направление которой определяется по правилу левой руки. Проводник АБ начнет перемещаться по металлическим шинам в направлении силы F . Сила F становится движущей. Противодействие ей оказывает механическая сила $F_{мх}$ (например, сила трения).

Потокосцепление замкнутого проводящего контура будет изменяться, и в соответствии с законом электромагнитной индукции в проводнике АБ возникнет индуцированная ЭДС $E = B l v$. Ее направление определяют по правилу правой руки и, как видно на рисунке 7.3, наведенная ЭДС E противоположна направлению тока I .

Встречное направление ЭДС и тока является признаком потребления электрической энергии в данном устройстве и преобразования ее в другой вид энергии.

Согласно второму закону Кирхгофа для проводящего контура цепи, представленной на рисунке 7.3, имеем

$$E_0 - E = IR_{вт}, \quad (7.5)$$

где $R_{вт}$ – сопротивление проводника АБ; сопротивлениями металлических шин и источника энергии с ЭДС E_0 пренебрегаем.

Мощность источника электрической энергии с ЭДС E_0

$$P = E_0 I. \quad (7.6)$$

Подставив в выражение (7.6) значение E_0 из уравнения (7.5), получим

$$P = (E + IR_{вт})I = EI + I^2 R_{вт}.$$

Учитывая, что $E = BIv$, а $F = BIl$, запишем

$$P = BlvI + I^2 R_{вт} = Fv + I^2 R_{вт}. \quad (7.7)$$

Первое слагаемое в этой сумме определяет механическую мощность движущегося проводника, а второе – мощность тепловых потерь в проводнике АБ в соответствии с законом Джоуля – Ленца.

Уравнение (7.7) подтверждает, что **в механическую энергию преобразуется часть электрической энергии источника.**