

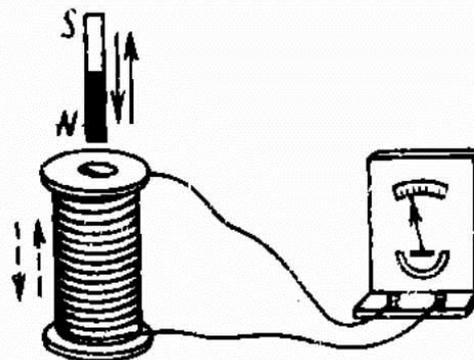
Явление электромагнитной индукции, Закон Фарадея

Явление электромагнитной индукции было открыто Майклом Фарадеем в 1831 году. Оно заключается в *возникновении переменного электрического поля в результате изменения магнитного поля*. Это открытие было первым шагом на пути создания общей теории электрических и магнитных явлений – *классической электродинамики*, что было сделано в 60-х годах XIX века Джеймсом Клерком Максвеллом.

Пусть замкнутый проводящий контур L находится в магнитном поле. При изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур, в нем возникает электрический ток. Этот ток называется *индукционным*, а явление его возникновения – *явлением электромагнитной индукции*.

Так как магнитный поток определяется как $\Phi = BS \cos \alpha$, то его изменение может быть обусловлено изменением индукции поля B , площади контура S или его ориентации относительно направления магнитного поля. Открытие Фарадея было сделано в его знаменитом опыте, когда он вдвигал плоский магнит в катушку, подключенную к гальванометру (рис.1).

Во время движения магнита по цепи протекал электрический ток и стрелка гальванометра отклонялась. При выдвигении магнита стрелка отклонялась в противоположную сторону. Обобщение результатов этого опыта позволило дать приведенную выше формулировку явления электромагнитной индукции.



Рассмотрим механизм возникновения ЭДС индукции. Возьмем контур в виде прямоугольной проводящей рамки, одна из сторон которой – перемычка длиной l – перемещается вдоль оси X параллельно самой себе со скоростью v , сохраняя электрический контакт с двумя другими сторонами рамки (рис.2).

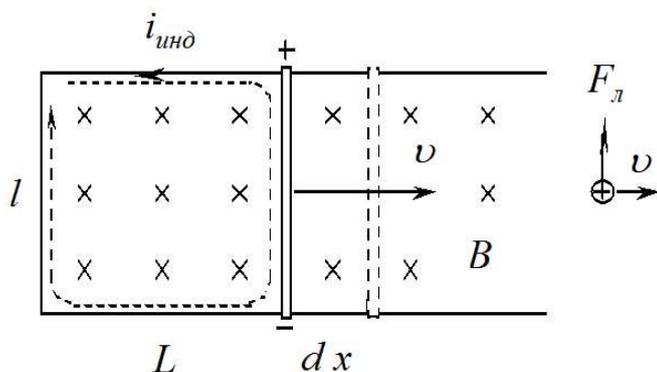


Рис.2

Вектор магнитной индукции \vec{B} перпендикулярен плоскости контура и направлен за плоскость чертежа. При движении перемычки имеющиеся в ней свободные заряды – носители тока – движутся вместе с перемычкой и испытывают действие силы Лоренца $F_L = qvB$. В результате

этого заряды смещаются вдоль перемычки и на ее концах возникает разность потенциалов. Таким образом, движущаяся перемычка выступает в роли источника ЭДС в контуре L . Роль сторонней силы играет сила Лоренца. Напряженность созданного ею электрического поля

$$E_{стор} = \frac{F_l}{q} = vB.$$

Разность потенциалов на концах перемычки, т.е. ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{инд} = E_{стор} \cdot l = Blv.$$

На рис.2 показано направление индукционного тока $i_{инд}$. Оно противоположно обозначенному пунктирной стрелкой направлению обхода контура, связанного с направлением магнитного поля \vec{B} правилом правого винта. Учтем это, поставив знак “минус” в правой части:

$$\mathcal{E}_{инд} = -Blv.$$

Поскольку скорость движения перемычки $v = \frac{dx}{dt}$, “заметаемая” ею за время dt площадь $dS = l dx$, а магнитный поток через эту площадь $d\Phi = B \cdot dS$, используя эти замечания получим

$$\mathcal{E}_{инд} = -Blv = -\frac{Bl dx}{dt} = -\frac{B dS}{dt}.$$

Окончательно имеем

$$\mathcal{E}_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Эта формула выражает закон электромагнитной индукции Фарадея: *ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур.*

Обратим внимание на закон электромагнитной индукции с точки зрения размерности. Как было показано в четвертой лекции размерность магнитного потока $[\Phi] = В \cdot с$, т.о. ЭДС индукции измеряется в вольтах,

$$[\mathcal{E}_{инд}] = \frac{[\Phi]}{[t]} = \frac{В \cdot с}{с} = В,$$

т.е. как и положено для ЭДС.

Знак “минус” выражает правило Ленца, устанавливающее направление индукционного тока.

Правило Ленца

Рассмотрим замкнутый проводящий контур L , находящийся в магнитном поле \vec{B} , которое изменяется со временем (рис.3). Направление обхода контура, обозначенное на рисунке стрелкой, связано с направлением вектора \vec{B} правилом правого винта.

Пусть магнитное поле B возрастает. Тогда $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ и ЭДС индукции, согласно закону Фарадея, отрицательна: $\varepsilon_{\text{инд}} < 0$. Индукционный ток $i_{\text{инд}}^{(1)}$ в этом случае течет в направлении, противоположном направлению обхода контура (рис.3.а), а созданное этим током магнитное поле $B_{\text{инд}}^{(1)}$ направлено против внешнего поля \vec{B} , т.е. препятствует его нарастанию.

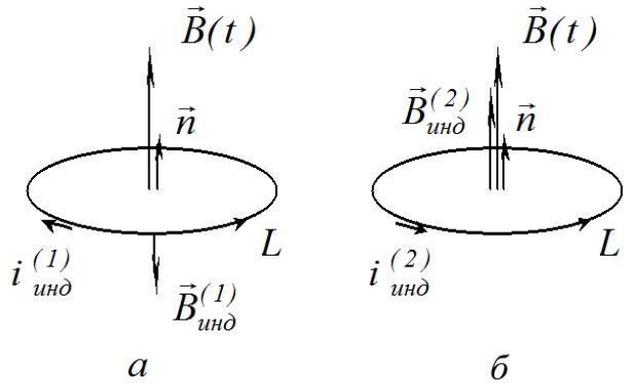


Рис.3

Пусть теперь внешнее поле B убывает. Тогда $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, $\varepsilon_{\text{инд}} > 0$, а

индукционный ток $i_{\text{инд}}^{(2)}$ течет в направлении обхода контура. Магнитное поле $B_{\text{инд}}^{(2)}$, созданное индукционным током, направлено теперь в ту же сторону, что и внешнее поле B , и препятствует его убыванию (рис.3б).

Сформулируем теперь правило Ленца:
индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует тому изменению магнитного потока, которое вызывает данный ток.

Применение

Отметим тот факт, что если магнитный поток пересекает рамку, состоящую из N витков, то закон Фарадея принимает вид

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Индукционный ток определяется по закону Ома

$$i_{\text{инд}} = \frac{\varepsilon_{\text{инд}}}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Среднее значение тока $\langle i_{\text{инд}} \rangle = -\frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и заряда $\langle \Delta q \rangle = -\frac{N}{R} \Delta\Phi$.

Вращение рамки в магнитном поле

По закону Фарадея

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где для однородного магнитного поля

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

В случае, если рамка вращается, то угол поворота зависит от времени следующим образом

$$\alpha = \omega t,$$

где ω - угловая скорость вращения.

Тогда

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\frac{d}{dt}(BS \cos\omega t) = BS\omega \sin\omega t.$$

Окончательно получаем

$$\varepsilon_{\text{инд}} = \varepsilon_{\text{max}} \sin\omega t,$$

где $\varepsilon_{\text{max}} = BS\omega$ - максимальное значение ЭДС.

Для многовитковой рамки

$$\varepsilon_{\text{инд}} = NBS\omega \sin\omega t.$$

Следовательно $\varepsilon_{\text{max}} = NBS\omega$.

Данный метод получения электрической энергии используется практически во всех электростанциях.

