

4.2. Закон электромагнитной индукции.

4.2.1. Закон Фарадея.

Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает *электродвижущая сила (ЭДС) индукции* E_i . Напомним, что ЭДС – работа по перенесению единичного заряда по замкнутому контуру. Самым замечательным фактом является то, что значение ЭДС E_i совершенно не зависит от того, каким образом осуществляется изменение магнитного потока Φ , и определяется лишь скоростью его изменения, т.е. величиной $d\Phi/dt$. Изменение знака производной $d\Phi/dt$ приводит к изменению знака ЭДС индукции E_i . К этому выводу Фарадей пришел из своих экспериментальных измерений, в которых он использовал проводящую рамку, замкнутую на гальванометр G , и магнитное поле катушки с током. В реальности Фарадей заменил гальванометр, который имел слишком большое сопротивление и инерционность, на маленькую катушку с магнитной стрелкой.

В результате своих опытов он обнаружил, что индукционный ток можно вызвать двумя различными способами (экспериментами).

1-й способ: перемещение проводящей рамки в магнитном поле неподвижной катушки.

2-й способ: изменение магнитного поля \vec{B} , создаваемого катушкой, за счет ее движения или вследствие изменения силы тока I в ней (или того и другого вместе). Рамка при этом остается неподвижной.

В обоих этих случаях гальванометр G будет показывать наличие индукционного тока в рамке, за счет индуцируемой ЭДС:

$$E_i = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.2.1)$$

По внешнему виду (4.2.1) есть то же самое, что формула (4.1.12), полученная в предыдущем параграфе, однако их содержание различное. Природа ЭДС из (4.1.12) – сила Лоренца, действующая на движущийся заряд в магнитном поле, и соответствует первому эксперименту как упомянуто выше. Во втором эксперименте силы Лоренца нет, т.к. проводник неподвижен. Поэтому Фарадей сформулировал новый закон.

Закон Фарадея: *всякое изменяющееся магнитное поле порождает в замкнутом проводнике ЭДС, т.е. электрическое поле*. Таким образом, электрическое поле порождается не только зарядами, но изменяющимся магнитным полем.

Направление индукционного тока и, соответственно, знак ЭДС индукции E_i определяются правилом Ленца (1831г.): *индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей*. Другими словами, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающему ЭДС индукции. Правило Ленца выражает важное физическое свойство – стремление системы противодействовать изменению ее состояния. Это свойство называют *электромагнитной инерцией*.

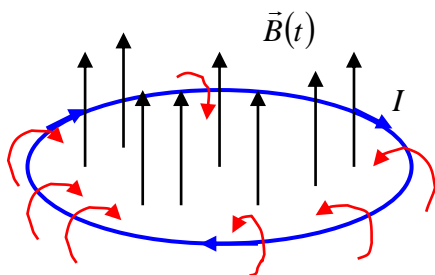


Рис. 2.1.

Рассмотрим пример: замкнутый проводящий контур и изменяющееся магнитное поле. Пусть магнитное поле, направленное как показано на рисунке 2.1, возрастает, то есть возрастает магнитный поток через контур. Появляющийся в контуре индукционный ток направлен таким образом, чтобы его собственное магнитное поле (красные стрелки на рисунке 2.1) ослабляло внешнее поле \vec{B} .

Суть явления электромагнитной индукции состоит в сохранении магнитного потока, проходящего через контур. Всякое изменение потока вызывает противодействие его изменению. Это свойство имеет как паразитное влияние, особенно при включении высоких напряжений в цепи с

катушками индуктивности, так и полезное применение в электротехнике. Например, используется в генераторах переменного тока, в устройствах с изменением напряжения переменного тока.

Примечание 1. *Эмилий Христианович Ленц, русский физик, 1804–1865*

4.2.2. Формулировка Максвелла.

Итак, существует две причины возникновения индукционного тока и ЭДС индукции:

- а) магнитное поле постоянно, контур изменяется,
 б) контур постоянен, магнитное поле меняется.

Наблюдаемое на опыте (б) возникновение индукционного тока свидетельствует о том, что и в этом случае в контуре появляются сторонние силы, которые теперь связаны с изменяющимся во времени магнитным полем. Какова же их природа? Ответ на этот вопрос был дан Дж. Максвеллом. Поскольку проводник покоится, то скорость упорядоченного движения электрических зарядов $\vec{v} = 0$ и, следовательно, магнитная сила, пропорциональная $[\vec{v}, \vec{B}]$, также равна нулю и уже не может привести заряды в движение. Однако кроме магнитной силы на электрический заряд может действовать только сила со стороны электрического поля, равная $q\vec{E}$. Поэтому остается заключить, что *индукционный ток обусловлен электрическим полем \vec{E} , возникающим при изменении во времени внешнего магнитного поля*. Именно это электрическое поле и ответственно за появление ЭДС индукции в неподвижном контуре.

Согласно Максвеллу, всякое *изменяющееся во времени магнитное поле порождает в окружающем пространстве электрическое поле*. Возникновение электрического поля не связано с наличием проводящего контура, который лишь позволяет обнаружить существование этого поля по возникновению в нем индукционного тока. Появление электрического поля можно обнаружить и по другим его действиям. Например, по поляризации диэлектрика, пробую конденсатора, ускорению и торможению заряженных частиц и т.п.

Формулировка закона электромагнитной индукции, данная Максвеллом, является более общей, чем формулировка Фарадея. Она принадлежит к числу наиболее важных обобщений электродинамики.

Д. Максвелл: *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле*. Отличие от формулировки М.Фарадея состоит в том, что никаких проводников не нужно для обнаружения электрического поля.

Математическая формулировка закона электромагнитной индукции в понимании Максвелла звучит следующим образом: *циркуляция вектора напряженности \vec{E} этого поля по любому неподвижному замкнутому контуру L определяется выражением*

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S}, \quad (4.2.2)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий выбранный замкнутый контур L . Поток вектора индукции магнитного поля вычисляется через поверхность, опирающуюся на контур L . Уравнение (4.2.2) входит в систему интегральных уравнений Максвелла.

Далее, мы введем частную производную по времени, считая, что выбранный контур в пространстве не меняется. Меняя порядок дифференцирования по времени и интегрирования по поверхности и используя теорему Стокса $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S}$, получаем:

$$\int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S} = -\frac{1}{c} \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad (4.2.3)$$

Учитывая, что последнее соотношение справедливо для любой произвольной поверхности S , получаем закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.2.4)$$

Это одно из уравнений системы дифференциальных уравнений Максвелла.

Тот факт, что циркуляция электрического поля, возбуждаемого переменным во времени магнитным полем, отлична от нуля $\text{rot} \vec{E} \neq 0$, означает, что рассматриваемое электрическое поле *не потенциальное*. Оно, как и магнитное поле, является *вихревым*, его силовые линии – замкнуты.

В общем случае электрическое поле \vec{E} представляет собой векторную сумму потенциального (поля статических электрических зарядов, циркуляция которого равна нулю) и вихревого (обусловленного изменяющимся во времени магнитным полем) электрических полей. В основе рассмотренных явлений, объясняющих закон электромагнитной индукции, не просматривается общего принципа, позволяющего установить общность их физической природы. Поэтому эти явления следует рассматривать как независимые, а закон электромагнитной индукции – как результат их совместного действия. Тем более удивительным оказывается тот факт, что ЭДС индукции в контуре всегда равна скорости изменения магнитного потока,

проходящего через контур. В тех случаях, когда меняется и магнитное поле \vec{B} , и расположение или конфигурация контура в поле, ЭДС индукции следует рассчитывать по формуле (4.2.1)

$$\mathbf{E}_i = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt},$$

а закон электромагнитной индукции можно представить в виде:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{c} \oint_L [\vec{v}, \vec{B}] d\vec{l}. \quad (4.2.5)$$

Выражение, стоящее в правой части этого равенства, представляет собой полную производную по времени от магнитного потока $-\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$. Первое слагаемое связано с изменением магнитного поля во времени, второе – с движением контура.

Можно сказать, что во всех случаях индукционный ток вызывается полной силой Лоренца

$$\vec{F} = e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right). \quad (4.2.6)$$

Какая часть индукционного тока вызывается электрической составляющей, а какая магнитной составляющей силы Лоренца, зависит от *выбора системы отсчета*. Итак, все эти явления говорят о том, что мы имеем дело с *единым электромагнитным полем*.

Необходимый комментарий. Из самого определения работы следует, что сила, действующая в магнитном поле на электрический заряд и перпендикулярная его скорости, не может совершать работы. Однако при движении проводника с током, увлекающего за собой заряды, сила Ампера все же работу совершает. Наглядным подтверждением этого служат электромоторы.

Это противоречие исчезает, если принять во внимание, что движение проводника в магнитном поле неизбежно сопровождается явлением электромагнитной индукции. Поэтому наряду с силой Ампера работу над электрическими зарядами совершает и возникающая в проводнике электродвижущая сила индукции. Таким образом, полная работа сил магнитного поля складывается из механической работы, обусловленной силой Ампера, и работы ЭДС, индуцируемой при движении проводника. Обе работы равны по модулю и противоположны по знаку, поэтому их сумма равна нулю. Действительно, работа силы Ампера при элементарном перемещении проводника с током в магнитном поле равна $\delta A_A = Id\Phi/c$, за это же время ЭДС индукции совершает работу

$$\delta A_i = \mathbf{E}_i Idt = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} Idt = -\frac{1}{c} Id\Phi.$$

Тогда полная работа равна нулю: $\delta A_A + \delta A_i = 0$. Силы Ампера совершают работу не за счет энергии внешнего магнитного поля, которое может оставаться постоянным, а за счет источника ЭДС, поддерживающего ток в контуре.

Примечание 2. В системе *СИ* запись уравнения (4.2.4) имеет вид: $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Примечание 3. *Джеймс Клерк Максвелл, великий английский физик, 1831-1879 г.г.*
