

## 4.2. Закон электромагнитной индукции.

### 4.2.1. Закон Фарадея.

Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС *индукции*  $E_i$  (работа по перенесению единичного заряда по замкнутому контуру). Самым замечательным является то, что значение  $E_i$  совершенно не зависит от того, каким образом осуществляется изменение магнитного потока  $\Phi$ , 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 экспериментальных измерений, в которых обнаружил, что индукционный ток можно вызвать двумя различными способами (экспериментами).

1-й способ: перемещение 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 неподвижна.

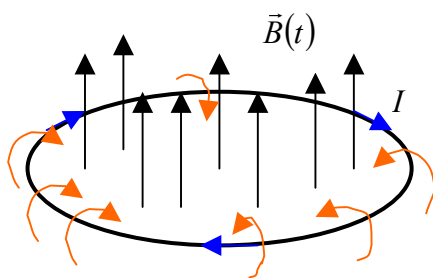
В обоих этих случаях гальванометр  $G$  будет показывать наличие индукционного тока в рамке, за счет индуцируемой ЭДС:

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

По внешнему виду (4.2.1) есть то же самое, что (4.1.12) 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). Во втором эксперименте силы Лоренца нет, т.к. проводник неподвижен.

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

Правило Э.Х. Ленца (1831 г., *Эмилий Христианович Ленц, русский физик, 1804–1865*). Направление индукционного тока и, соответственно, знак ЭДС индукции  $E_i$  определяются правилом Ленца: *индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.* Другими словами, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающего ЭДС индукции. Правило Ленца выражает важное физическое свойство – стремление системы противодействовать изменению ее состояния. Это свойство называют *электромагнитной инерцией*.



Пример: замкнутый контур и магнитное поле. Пусть магнитное поле, направленное как показано на рисунке, 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) ослабляло внешнее поле  $\vec{B}$ .

Суть явления электромагнитной индукции состоит в сохранении магнитного потока, проходящего через контур. 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.

### 4.2.2. Формулировка Максвелла.

Итак, существует две причины возникновения индукционного тока и ЭДС:

- магнитное поле постоянно, контур изменяется,
- 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 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, *изменяющееся во времени магнитное поле порождает в окружающем пространстве электрическое поле.* Возникновение электрического поля не связано с наличием проводящего контура, который лишь позволяет обнаружить по возникновению в нем индукционного тока существование этого поля. Появление электрического поля можно обнаружить и по другим его действиям. Например, по поляризации диэлектрика, пробое 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.

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

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

$$E_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}, \quad (4.2.2)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток, пронизывающий контур  $L$ . Поток вектора индукции магнитного поля вычисляется через поверхность, опирающуюся на контур  $L$ . Здесь мы ввели частную производную по времени, считая, что выбранный контур в пространстве не меняется. Уравнение (4.2.2) входит в систему интегральных уравнений Максвелла. Далее, меняя порядок дифференцирования по времени и интегрирования по поверхности, используем теорему Стокса  $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{S}$ , и тогда 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.

Примечание 1: в системе СИ  $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

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 сквозь 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)  $E_i = -\frac{d\Pi}{cdt}$ , а закон электромагнитной индукции можно представить в виде:

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

Выражение, стоящее в правой части этого равенства, представляет собой полную производную по времени от магнитного потока  $-\frac{d\Pi}{dt}$ . 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, а какая магнитной составляющей силы Лоренца, зависит от *выбора системы отсчета*. Итак, это единое электромагнитное поле.

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 Амперовой силы при элементарном перемещении проводника с током в магнитном поле равна  $\delta A_A = Id\Pi$ , за это же время ЭДС

индукции совершает работу  $\delta A_i = \varepsilon_i Idt = -\frac{d\Pi}{dt} Idt = -Id\Pi$ , тогда полная работа  $\delta A_A + \delta A_i = 0$ . Силы

Ампера совершают работу не за счет энергии внешнего магнитного поля, которое может оставаться постоянным, а за счет источника ЭДС, поддерживающего ток в контуре.