

# Явление электромагнитной ИНДУКЦИИ

Выполняла учащаяся группы

12 СЮ 9

Прыгунова Елизавета

**Электромагнитная индукция** — явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него.

Электромагнитная индукция была открыта **Майклом Фарадеем 29 августа 1831 года**. Он обнаружил, что электродвижущая сила, возникающая в замкнутом проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Величина электродвижущей силы (ЭДС) не зависит от того, что является причиной изменения потока — изменение самого магнитного поля или движение контура (или его части) в магнитном поле. Электрический ток, вызванный этой ЭДС, называется индукционным током.

# Закон Фарадея

- Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея (в СИ):

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- где:

$\mathcal{E}$  - электродвижущая сила, действующая вдоль произвольно выбранного контура

$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$ , магнитный поток через поверхность, натянутую на

этот контур

- Знак «минус» в формуле отражает **правило Ленца**, названное так по имени русского физика Э. Х. Ленца:
- Индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.* Для катушки, находящейся в переменном магнитном поле, закон Фарадея можно записать следующим образом:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

где

$\mathcal{E}$  — электродвижущая сила,

$N$  — число витков,

$\Phi_B$  — магнитный поток через один виток,

$\Psi$  — потокосцепление катушки.

В дифференциальной форме закон Фарадея можно записать в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (в системе СИ)}$$

или

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (в системе СГС)}$$

В интегральной форме (эквивалентной):

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \text{ (СИ)}$$

или

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \text{ (СГС)}$$

Здесь  $\vec{E}$  — напряжённость электрического поля,  $S$  — магнитная индукция,  $\partial S$  — произвольная поверхность,  $\partial S$  — её граница. Контур интегрирования подразумевается фиксированным (неподвижным).

- Следует отметить, что закон Фарадея в такой форме, очевидно, описывает лишь ту часть ЭДС, что возникает при изменении магнитного потока через контур за счёт изменения со временем самого поля без изменения (движения) границ контура (об учете последнего см. ниже).
- В этом виде закон Фарадея входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля (в дифференциальной или интегральной форме соответственно).
- Если же, скажем, магнитное поле постоянно, а магнитный поток изменяется вследствие движения границ контура (например, при увеличении его площади), то возникающая ЭДС порождается силами, удерживающими заряды на контуре (в проводнике) и силой Лоренца, порождаемой прямым действием магнитного поля на движущиеся (с контуром) заряды. При этом равенство

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

продолжает соблюдаться, но ЭДС в левой части теперь не сводится к  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$  (которое в данном частном примере вообще равно нулю). В общем случае (когда и магнитное поле меняется со временем, и контур движется или меняет форму) последняя формула верна так же, но ЭДС в левой части в таком случае есть сумма обоих слагаемых, упомянутых выше (то есть порождается частично вихревым электрическим полем, а частично силой Лоренца и силой реакции движущегося проводника).

- Некоторые авторы, например, М. Лившиц в журнале «Квант» за 1998 год отрицают корректность применения термина *закон Фарадея* или *закон электромагнитной индукции* и т. п. к формуле  $\mathcal{E} = -d\Phi/dt$  в случае подвижного контура (оставляя для обозначения этого случая или его объединения со случаем изменения магнитного поля, например, термин *правило потока*). В таком понимании закон Фарадея — это закон, касающийся лишь циркуляции электрического поля (но не ЭДС, создаваемой с участием силы Лоренца), и в этом понимании понятие *закон Фарадея* в точности совпадает с содержанием соответствующего уравнения Максвелла.
- Однако возможность (пусть с некоторыми оговорками, уточняющими область применимости) совпадающей формулировки «правила потока» с законом электромагнитной индукции нельзя назвать чисто случайной. Дело в том, что, по крайней мере для определенных ситуаций, это совпадение оказывается очевидным проявлением принципа относительности. А именно, например, для случая относительного движения катушки с присоединенным к ней вольтметром, измеряющим ЭДС, и источника магнитного поля (постоянного магнита или другой катушки с током), в системе отсчета, связанной с первой катушкой, ЭДС оказывается равной именно циркуляции электрического поля, тогда как в системе отсчета, связанной с источником магнитного поля (магнитом), происхождение ЭДС связано с действием силы Лоренца на движущиеся с первой катушкой носители заряда. Однако та и другая ЭДС обязаны совпадать, поскольку вольтметр показывает одну и ту же величину, независимо от того, для какой системы отсчета мы ее рассчитали.

# Потенциальная форма

- При выражении магнитного поля через векторный потенциал закон Фарадея

принимает вид: 
$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

(в случае отсутствия безвихревого поля, то есть тогда, когда электрическое поле порождается полностью только изменением магнитного, то есть электромагнитной индукцией).

В общем случае, при учёте и безвихревого (например, электростатического) поля имеем:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$



# История

- В 1820 г. Ганс Христиан Эрстед показал, что протекающий по цепи электрический ток вызывает отклонение магнитной стрелки. Если электрический ток порождает магнетизм, то с магнетизмом должно быть связано появление электрического тока. Эта мысль захватила английского ученого М. Фарадея. «Превратить магнетизм в электричество», — записал он в 1822 г. в своём дневнике. Многие годы настойчиво ставил он различные опыты, но безуспешно, и только 29 августа 1831 г. наступил триумф: он открыл явление электромагнитной индукции. Установка, на которой Фарадей сделал своё открытие, заключалась в том, что Фарадей изготовил кольцо из мягкого железа примерно 2 см шириной и 15 см диаметром и намотал много витков медной проволоки на каждой половине кольца. Цепь одной обмотки замыкала проволока, в её витках находилась магнитная стрелка, удаленная настолько, чтобы не сказывалось действие магнетизма, созданного в кольце. Через вторую обмотку пропускался ток от батареи гальванических элементов. При включении тока магнитная стрелка совершала несколько колебаний и успокаивалась; когда ток прерывали, стрелка снова колебалась. Выяснилось, что стрелка отклонялась в одну сторону при включении тока и в другую, когда ток прерывался. М. Фарадей установил, что «превращать магнетизм в электричество» можно и с помощью обыкновенного магнита.
- В это же время американский физик Джозеф Генри также успешно проводил опыты по индукции токов, но пока он собирался опубликовать результаты своих опытов, в печати появилось сообщение М. Фарадея об открытии им электромагнитной индукции.
- М. Фарадей стремился использовать открытое им явление, чтобы получить новый источник электричества.