

Урок №18 (15.01.2019)

ЭДС индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.

1. Магнитное поле прямолинейного проводника

Экспериментальный факт: магнитное поле прямолинейного проводника имеет (очевидно) осевую симметрию, силовые линии представляют собой окружности и индукция такого поля равна $B \sim \frac{I}{r}$. Коэффициент пропорциональности записывается в виде $\frac{\mu_0}{2\pi}$: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Константа μ_0 называется *магнитной постоянной*, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м} / \text{А}$.

Заметим, что такая «правильная» константа возникла неспроста: из уравнений Максвелла следует, что $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$. Так что только две из трёх мировых констант независимы. Исторически сначала определили ϵ_0 , а затем положили скорость света c такой, что $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

2. Электромагнитная индукция

В 1820-1821 гг. были сделаны два открытия:

- электрический ток создаёт магнитное поле;
- со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила.

Вопрос: может ли магнитное поле создавать электрический ток? В 1830-х годах Джозеф Генри и Майкл Фарадей ответили положительно на этот вопрос.

Основной вывод: при изменении магнитного поля в витке возбуждается электрический ток. По-другому: изменение магнитного поля приводит к появлению *ЭДС индукции*.

Ещё несколько экспериментальных фактов:

- если поле не менять, но виток повернуть в нем, в витке начинает течь ток;
- если в постоянном поле виток «сплющить» – по нему течёт ток.

3. Закон электромагнитной индукции Фарадея.

Определим *магнитный поток* Φ_B аналогично потоку электрического поля:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}.$$

Опыты Фарадея показывали, что при изменении магнитного потока, проходящего через контур, ЭДС, возникающая в этом контуре, пропорциональна скорости изменения потока:

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

Единицей измерения магнитного потока в СИ служит вебер (Вб); $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

При N витках, закон электромагнитной индукции Фарадея приобретает вид:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Правило Ленца: ЭДС индукции возбуждает в контуре ток, индукция магнитного поля которого всегда противодействует первоначальному изменению магнитного потока.

Правило Ленца фактически запрещает существование вечного двигателя, основанного на магнитном поле.

Итак, ЭДС может быть индуцирована двумя способами: за счёт 1) изменения индукции магнитного поля B или 2) изменения площади или ориентации витка.

4. ЭДС, наводимая в движущемся проводнике.

Пусть у нас проводник длины l движется «перпендикулярно себе» со скоростью v в поле B , перпендикулярном v и l . Тогда заряды, находящиеся в нем, испытывают силу $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ (сила Лоренца). Эта сила совершает работу (на длине проводника) $A = \vec{F} \cdot \vec{l} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$. Так как в нашем примере все перпендикулярно, векторы можно снять: $A = qvBl$. В итоге получается, что заряд под действием силы Лоренца приобретает энергию, как будто он проходит ЭДС $\varepsilon = A/q$. Итак, при движении проводника в магнитном поле, в нем возникает ЭДС $\varepsilon = vBl$, или в векторном виде: $\varepsilon = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$.

На самом деле, с использованием закона Фарадея, то же выражение можно получить в общем виде. За время dt проводник проходит расстояние $v dt$, при этом площадь контура (представим, что проводник скользит по П-образной рамке) изменяется на $dS = lv dt$. В соответствии с законом Фарадея $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{B dS}{dt}$, или $\varepsilon = lvB$.

5. Задачи.

1. (Меледин, 3.110) Кольцевой виток радиуса r , сделанный из проволоки с сопротивлением единицы длины ρ , находится в постоянном однородном магнитном поле, индукция которого \vec{B} перпендикулярна плоскости витка. Виток превратили в «восьмёрку», составленную из двух равных колец, не выводя при этом виток из его плоскости (т.е. соединили точки, находящиеся на концах диаметра). Какой заряд при этом пройдёт по проволоке?

Дополнительный вопрос к предыдущей задаче: ЭДС, или по другому – разность потенциалов, возникает между некоторыми двумя точками. Что же это за точки в кольце?

2. Проводник длины $l = 1\text{ м}$ скользит по горизонтальным рельсам в вертикальном магнитном поле с индукцией $B = 10^{-2}\text{ Тл}$. Концы рельсов замкнуты на сопротивления $R_1 = 1\text{ Ом}$ и $R_2 = 2\text{ Ом}$ (см. рис.). Определить ток, текущий через проводник, если скорость проводника $v = 10\text{ м/с}$. Сопротивлением рельсов и проводника пренебречь.

