

## Билет 12

### Электромагнитная индукция. Закон Фарадея для электромагнитной индукции. Правило Ленца. Вихревое электрическое поле. Первый закон Максвелла.

Электромагнитная индукция была открыта английским физиком М. Фарадеем в 1831 году.

Явление **электромагнитной индукции** заключается в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур.

**Магнитный поток  $\Phi$  через площадь  $S$**  - величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции, площади контура и косинуса угла между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции.  $\Phi = B S \cos \alpha$

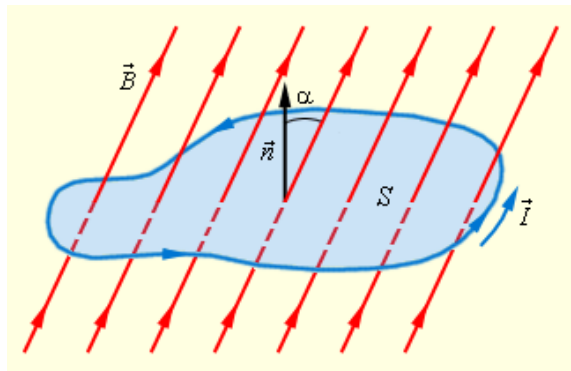
Направление вектора нормали определяется правилом правого буравчика, где направление вращения — выбранное положительное направление движения индукционного тока  $\vec{I}$ .

**Индукционный ток** — электрический ток, возникающий в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур.

Единица магнитного потока в СИ — **вебер (Вб)**.  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$

Магнитный поток, равный  $1 \text{ Вб}$ , создается магнитным полем с индукцией  $1 \text{ Тл}$ , пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью  $1 \text{ м}^2$ .

Элементарный магнитный поток -  $d\Phi = B \cdot dS \cos \alpha$ .



**Закон Фарадея** — при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции  $\xi_{ind}$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус.

$$\xi_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

**Правило Ленца** — индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

Правило Ленца выражает закон сохранения энергии.

#### Причины изменения магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур:

1. Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле.

В данном случае проводники с свободными носителями заряда движутся в магнитном поле, на которые действует сила Лоренца в качестве сторонней силы, за счет чего возникает ЭДС индукции.

Пример:

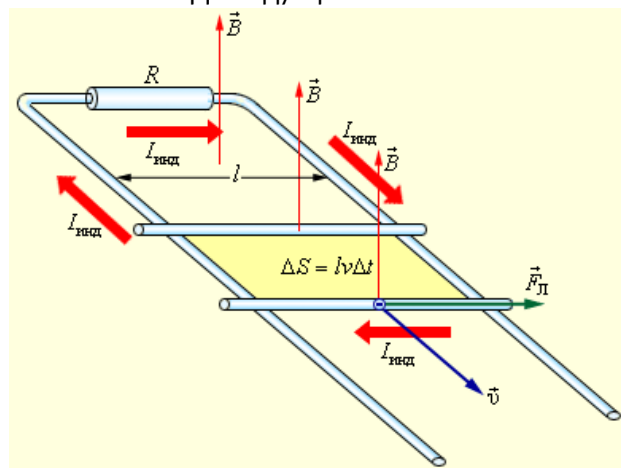
Рассмотрим возникновение ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура. Пусть одна из сторон длиной  $l$  скользит по двум другим со скоростью  $\vec{v}$ . Работа силы Лоренца на пути  $l$ , действующей на частицы передвигаемого проводника  $A_{ст.сил} = F_l \cdot l = qvBl$ .

В оставшихся неподвижных частях контура сторонняя сила равна 0.

По определению

$$|\xi_{ind}| = \frac{A}{q} = \frac{qvBl}{q} = \frac{B \cdot v \cdot l \cdot dt}{q \cdot dt} = \frac{B \cdot dS}{dt} = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$$

Направление индукционного тока можем определить по правилу Ленца.



2. Магнитный поток изменяется вследствие изменения магнитного поля во времени при неподвижном контуре. Электрическое поле, приводящее в движение электроны в неподвижном проводнике, порождается изменяющимся во времени магнитным полем.  $A_{эл.поля} = \xi_{ind}$

Данное электрическое поле не является потенциальным, из-за чего оно называется **вихревым электрическим полем**. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, линии напряженности представляют собой замкнутые линии. Представление о таком поле было введено Дж. Максвеллом в 1861 году.

Но явление электромагнитной индукции тоже описывается формулой Фарадея.

Вихревое поле действует на заряд также, как электрическое.

$$\vec{F} = q \vec{H}, \quad \vec{H} - \text{вектор напряженности вихревого поля.}$$

Работа вихревого поля по перемещению единичного заряда вдоль неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

В данном случае  $\frac{dB}{dt} > 0$ .

$$2\pi r H = \pi r_0^2 \frac{dB}{dt} \quad H = \frac{r_0^2}{2r} \cdot \frac{dB}{dt}$$

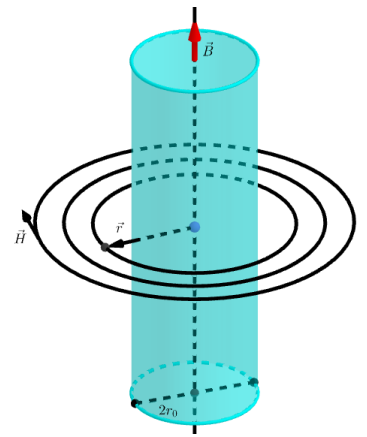
### Первый закон Максвелла

Циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$-\frac{d\Phi}{dt} = \xi_{ind} = \frac{A_{cm}}{q_0} = \frac{\oint dA_{cm}}{q_0} = \frac{\oint \vec{F} \cdot d\vec{l}}{q_0} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

Направление силовых линий определяется по правилу **левого** буравчика, если  $\frac{dB}{dt} > 0$ , иначе по правилу **правого** буравчика.



### Токи Фуко

В сплошных объемных (или плоских) проводниках, помещенных в меняющееся магнитное поле, вследствие явления электромагнитной индукции возникают вихревые индукционные токи Фуко. Токи Фуко применяют для плавления металлов в электропечах, в электроизмерительных приборах для быстрого затухания колебаний стрелок приборов.

Принцип действия электрического счетчика (прибора индукционной системы, служащего для измерения израсходованной электроэнергии) основан на взаимодействии токов Фуко, возникающих во вращающемся в магнитном поле двух катушек с током в алюминиевом диске, закреплённом на вертикальной оси. Число оборотов этого диска, регистрируемых счетчиком за определенное время прямо пропорционально израсходованной в подключённых к нему приборах и машинах электроэнергии.

Токи Фуко учитываются и используются в конструкциях электродвигателей, генераторов, трансформаторов.