

## Электромагнитная индукция



Электромагнитная индукция — физическое явление возникновения электродвижущей силы индукции  $\mathcal{E}_i$ .

- 1) в проводнике, движущемся в магнитном поле со скоростью  $v$ ;
- 2) в замкнутом контуре при изменении проходящего через этот контур потока магнитной индукции  $\Phi$ .

Индукционный ток  $I_i$  — ток, возникающий в проводнике под действием ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$ . Направление  $I_i$  совпадает с направлением  $\mathcal{E}_i$ .



## Электродвижущая сила индукции



### 1. Электродвижущая сила индукции в движущихся проводниках



Электродвижущая сила индукции  $\mathcal{E}_i$  в проводнике длиной  $l$ , движущемся со скоростью  $\vec{v}$  в стационарном (постоянном) однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , определяется выражением:

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .

Существуют два равноправных мнемонических подхода к определению направления ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  (и индукционного тока  $I_i$ ) в движущемся проводнике.

1) Правило правой руки (правило Флеминга), которое предложил Д.А. Флеминг. Это правило описывает способ нахождения суммы сил Лоренца, действующих на заряды в проводнике, движущиеся вместе с проводником в магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$  в направлении движения проводника.

Если расположить правую руку так, чтобы линии магнитной индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь под прямым углом (при  $\alpha = 90^\circ$ ), а отогнутый на  $90^\circ$  большой палец указывал направление движения (скорости  $\vec{v}$ ) проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  (рис. 40).

2) Правило левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы

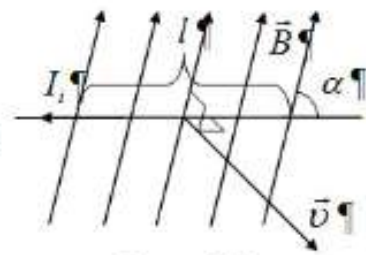


Рис. 40

вытянутые четыре пальца указывали направление, противоположное скорости  $\vec{v}$  движения проводника (то есть противоположное скорости свободных электронов  $e$ , находящихся в нём и движущихся вместе с ним со скоростью  $\vec{v}$ ) в магнитном поле, а линии магнитной индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь под прямым углом (при  $\alpha = 90^\circ$ ), то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Лоренца  $\vec{F}_L$ , действующей со стороны поля на свободные электроны в проводнике, под действием которой они приобретают дрейфовую скорость  $\langle \vec{v} \rangle$ . Учитывая, что индукционный ток  $I_i$  направлен противоположно дрейфовой скорости  $\langle \vec{v} \rangle$  движения свободных электронов в проводнике, направление ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  (и индукци-

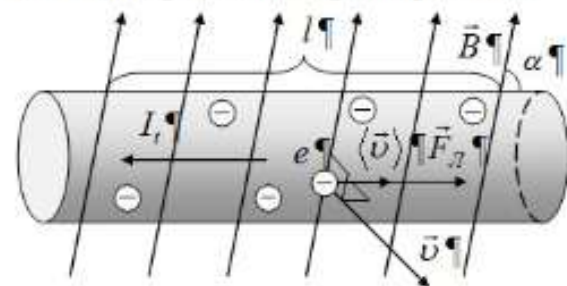


Рис. 41

онного тока  $I_1$ ) будет противоположно направлению большого пальца (рис. 41).

Правило правой руки является частным случаем правила левой руки.

## 2. Электродвижущая сила индукции в замкнутом контуре

### а) Опыты Фарадея

М. Фарадей навил на большую деревянную катушку две электрические спирали, изолированные друг от друга хлопчатобумажной нитью. Гальванометр, подключённый к одной спирали, показывал появление тока в тот момент, когда в другой спирали включали или выключали ток.

Рассмотрим варианты опыта М. Фарадея. Свитый в катушку проводник (слева) замыкается на гальванометр  $G$ .

1) В течение времени сближения постоянного магнита с катушкой в ней возникает индукционный ток  $I_1$ ; при взаимном их удалении ток меняет направление на противоположное (рис. 44а).

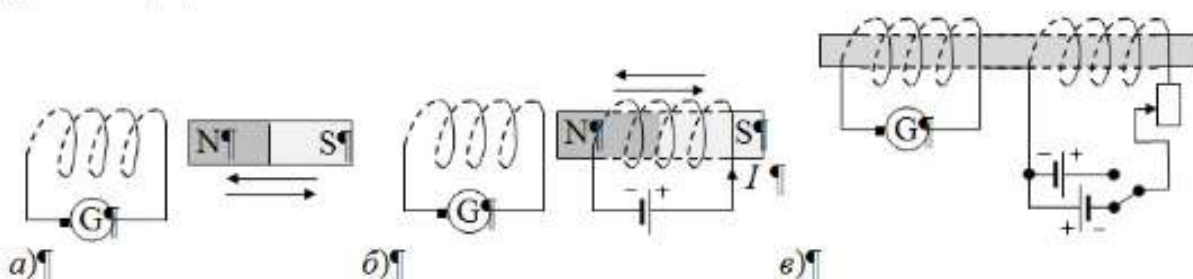


Рис. 44

2) Аналогичные результаты наблюдаются при замене постоянного магнита электромагнитом (рис. 44б).

3) Изменение тока  $I$  по величине и направлению в одной (правой) из закреплённых неподвижно катушек приводит к возникновению в другой (левой) катушке изменяющегося по величине и направлению индукционного тока  $I_1$  (рис. 44в).

¶

¶  
**б) Закон электромагнитной индукции** ¶  
**Закон Фарадея** ¶  
¶

М. Фарадей опубликовал результаты опытов раньше Д. Генри, и поэтому закон носит его имя. ¶

Электродвижущая сила электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_i$  в замкнутом контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\Delta \Phi$ , охватываемого проводником. ¶

Установленный М. Фарадеем факт Д. К. Максвелл выразил математически равенством: ¶

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \rightarrow \rightarrow \quad (\text{Знак «-» объясняется правилом Ленца}). \quad \text{¶}$$

### в) Правило Ленца

В 1833 г. 29 ноября Э.Х. Ленц в своей работе «Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией» установил правило для нахождения направления индукционного тока в замкнутом контуре.

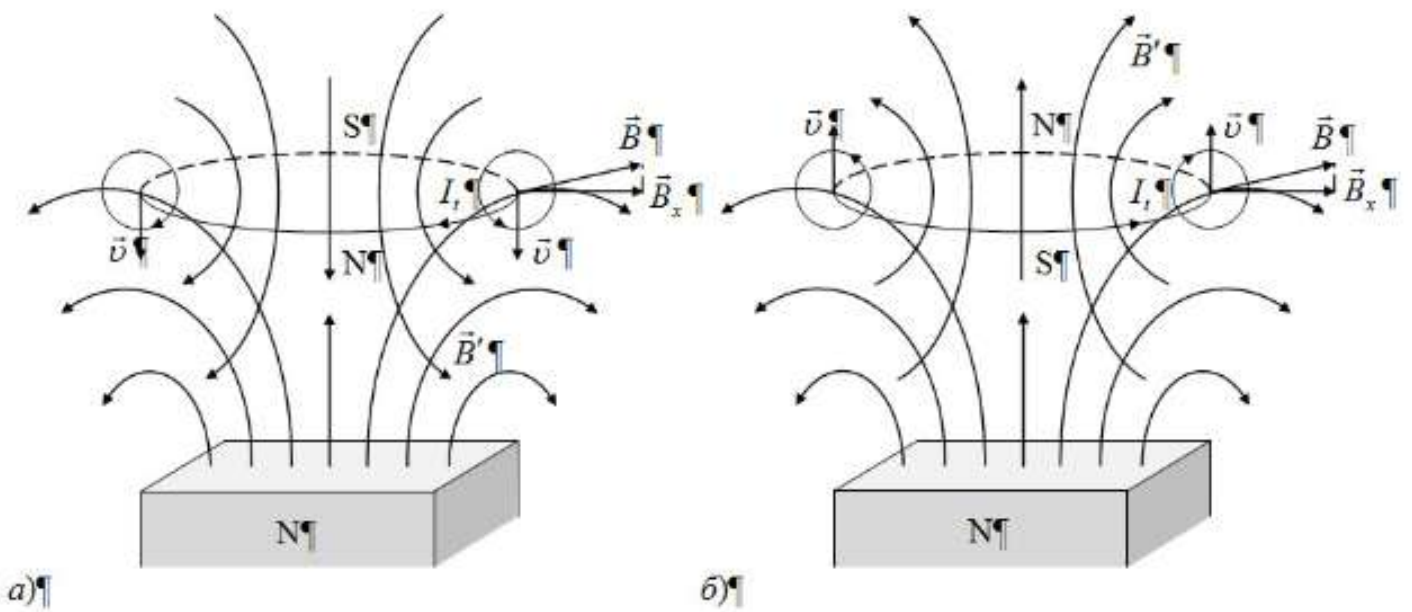


Рис. 45

Индукционный ток  $I_i$  в замкнутом контуре имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать изменение (препятствует изменению) магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток, или индукционный ток  $I_i$  всегда направлен так (по правилу правой руки), чтобы противодействовать вызвавшей его причине. Например:

1) Приближаясь к магниту, замкнутое кольцо (рис. 45а) пересекает линии магнитной индукции  $\vec{B}$ , при этом увеличивается магнитный поток  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$  через кольцо. Индукционный ток  $I_i$  создаёт такое магнитное поле  $\vec{B}'$  кольца, при котором оно отталкивается от магнита.

2) Удаляясь от магнита, замкнутое кольцо (рис. 45б) пересекает линии магнитной индукции  $\vec{B}$ , при этом уменьшается магнитный поток  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$  через кольцо. Индукционный ток  $I_i$  создаёт такое магнитное поле  $\vec{B}'$  кольца, при котором оно притягивается к магниту.

Рассмотрим примеры проявления закона Фарадея. Индукционный ток  $I_i$  появляется:

1) при перемещении подвижной стороны рамки (контра) со скоростью  $\vec{v}$  за время  $\Delta t$  её площадь изменяется на  $\Delta S = S_2 - S_1$ , при этом магнитный поток, охватываемый рамкой (то есть контуром), изменяется на  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  (рис. 46);

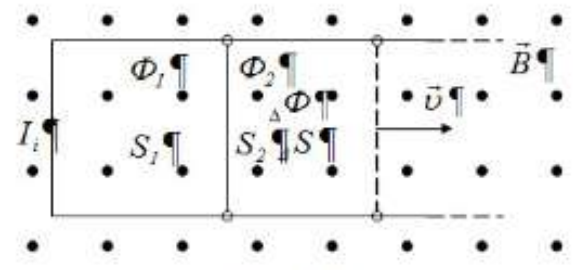


Рис. 46

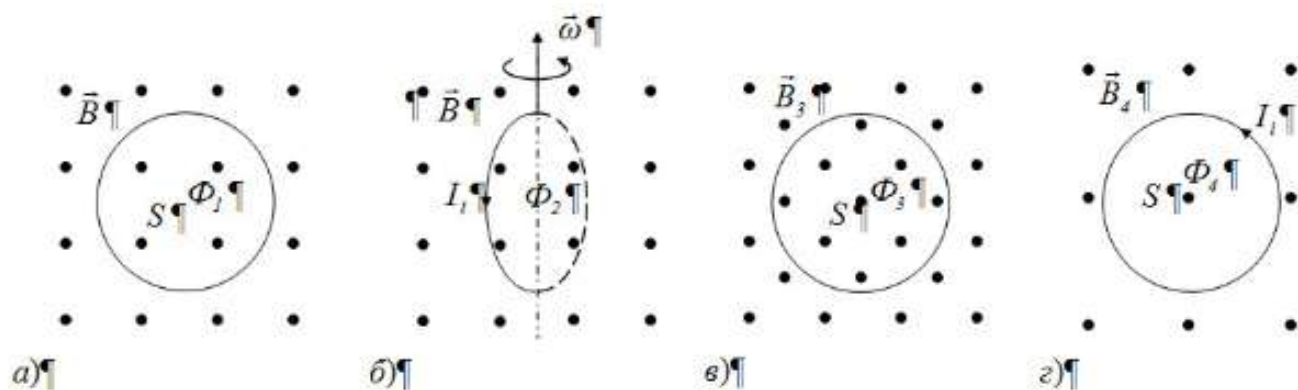


Рис. 47

2) при повороте рамки (контура) площадью  $S$  с угловой скоростью  $\omega$  в магнитном поле за время  $\Delta t$ , в течение которого магнитный поток сквозь рамку (через контур) изменяется на  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ; от  $\Phi_1$  в начале (рис. 47а) до  $\Phi_2$  в конце (рис. 47б) движения соответственно;

3) при изменении индукции  $B$  магнитного потока, например, при усилении (рис. 47в) или ослаблении (рис. 47г) магнитного поля в контуре.

Генератор — устройство для получения переменного тока, основанное на вращении рамки в магнитном поле, в которой возникает ЭДС индукции (рис. 48).

Динамомашинa — устаревшее название электрического генератора постоянного тока.

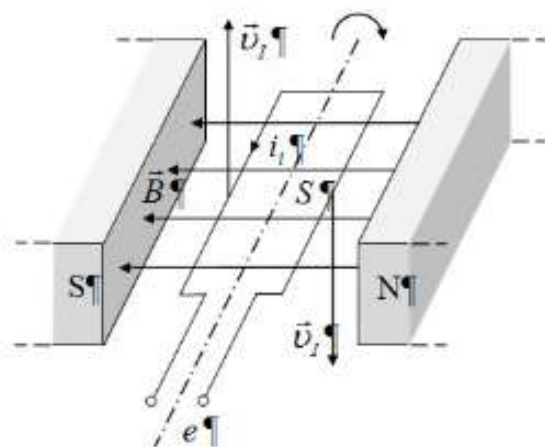


Рис. 48