

## Урок №17 (10.01.2019)

### Магнитное поле. Сила Ампера. Сила Лоренца. Рамка с током в магнитном поле. Электродвигатель.

#### 1. Явления

Компас. Магниты. Сила взаимодействия между двумя магнитами. Магнит – протяжённая величина.

Ферромагнетики: железо, кобальт, никель.

Магнитное поле. Как увидеть магнитное поле. Как магнитное поле видят птицы? Намагничивание опилок.

Ханс Кристиан Эрстед в 1820 г. обнаружил, что магнитная стрелка отклоняется при взаимодействии с *потоком* электрических зарядов.

#### 2. Магнитное поле

Направление магнитного поля – направление, на которое указывает северный полюс пробного компаса в данной точке. Величина магнитного поля? – Момент вращения пробного компаса, когда *он не ориентирован вдоль силовой линии*.

Электрический ток создаёт магнитное поле. Направление – перпендикулярно проводнику. Правило буравчика.

Исследуем силу, действующую на проводник в магнитном поле. Эту силу исследовал Андре Ампер, поэтому её называют *сила Ампера*. Экспериментально можно получить следующее соотношение:  $\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}$ . Это соотношение иногда называют *законом Ампера для проводника в магнитном поле*, хотя надо иметь в виду, что «настоящий» закон Ампера – это совсем другое...

*Векторное умножение.*

*Правило правой руки: выпрямленные пальцы указывают направление движения частицы  $\vec{v}$ , если их согнуть – направление вектора  $\vec{B}$ . Тогда большой палец указывает направление силы  $\vec{F}$ . (Верно для положительно заряженных частиц.)*

Поле  $\vec{B}$ , или *магнитная индукция*, измеряется в *теслах* (Тл),  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$ . Старая единица измерения (СГС) – гаусс (Гс),  $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$ . Поле Земли у поверхности – 0.5 Гс.

#### 3. Движение заряда в магнитном поле

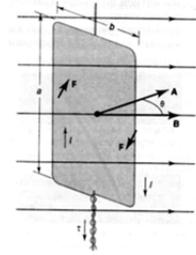
$I = nq/t$ . Пусть за время  $t$  заряд  $q$  проходит расстояние  $l$  в магнитном поле  $\vec{B}$ . Тогда  $\vec{l} = \vec{v}t$ .  $\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} = (nq/t)(\vec{v}t) \times \vec{B} = nq\vec{v} \times \vec{B}$ .

Следовательно, на одну частицу действует сила  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  – *сила Лоренца*. Расписывая векторное умножение, получим:  $F = qvB \sin \theta$ .

*Обратим внимание, что сила равна нулю, если частица движется вдоль силовых линий.*

#### 4. Виток с током в магнитном поле.

Рассмотрим проволочный виток, по которому течёт ток  $I$ , помещённый в магнитное поле, как показано на рисунке. На стороны, длиной  $b$ , действуют равные силы вверх и вниз, по одной прямой. На боковые стороны действуют одинаковые по величине и направленные противоположно силы  $\vec{F}$ , но они лежат в разных плоскостях.



$$\vec{F} = I\vec{a} \times \vec{B} \text{ — сила Ампера.}$$

Плечо каждой силы равно  $\frac{b}{2} \sin \theta$ . Результирующий момент равен

$M = 2IaB \frac{b}{2} \sin \theta = IaBb \sin \theta$ . Если рамка состоит из  $N$  витков, то, обозначая через  $S$  площадь рамки, получим  $M = NISB \sin \theta$ .

Величину  $\vec{\mu} = NIS\vec{e}$  называют *магнитным дипольным моментом*. Тогда момент сил, действующих на рамку с током можно записать в виде  $\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ .

*Несмотря на то, что формула выведена для прямоугольного витка с током, она верна для рамки любой формы.*

Вспомним, что электрический диполь в электрическом поле имеет момент  $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$ , где  $|\vec{p}| = Q \cdot l$ .

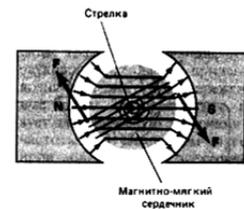
Как и электрический диполь в электрическом поле, магнитный диполь в магнитном поле обладает потенциальной энергией. Можно показать, что эта энергия равна  $U_M = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$  (для электрического диполя  $U_E = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ ).

#### 5. Гальванометр, электродвигатель, громкоговоритель...

Для гальванометра магнитному моменту, создаваемому током  $M = NISB \sin \theta$ , противодействует пружинка создающая момент  $M = k\phi$ , где  $\phi$  — угол отклонения стрелки.

$\phi = \frac{NISB \sin \theta}{k}$ . Хочется, чтобы угол отклонения стрелки не

зависел от угла  $\theta$ , поэтому делают такие хитрые магниты: поле в зазоре везде перпендикулярно катушке.



Электродвигатель выглядит так, как показано на рисунке, а как он работает — очевидно (ну, почти очевидно: когда он поворачивается, провода, по которым подводится напряжение, перескакивают с одного контакта на роторе на другой и ток в рамке меняет направление на противоположное). Ниже показана более красивая картинка, иллюстрирующая устройство электродвигателя, с электромагнитами вместо постоянных магнитов статора.

