

## Теоретическая справка к лекции 7

### Сила Ампера.

На прямолинейный проводник длиной  $l$ , находящийся в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , со стороны поля действует сила Ампера  $\vec{F}_A$ , модуль которой определяется выражением

$$F_A = IBl \sin \alpha,$$

где  $I$  - сила тока в проводнике,  $\alpha$  - угол между осью проводника и вектором  $\vec{B}$ .

Сила  $\vec{F}_A$  направлена перпендикулярно как току, так и вектору  $\vec{B}$ . Для определения направления силы Ампера можно использовать *правило левой руки*: расположите левую руку так, чтобы силовые линии  $\vec{B}$  «входили» в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока; тогда отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы  $\vec{F}_A$ .

Максимальный вращательный момент  $M_{\text{МАКС}}$ , действующий на рамку с током в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  дается выражением:

$$M_{\text{МАКС}} = ISB,$$

где  $I$  - сила тока в рамке,  $S$  - ее площадь.

### Сила Лоренца.

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущийся заряд, определяется выражением

$$F_L = |q|vB \sin \alpha,$$

где  $q$  - заряд частицы,  $v$  - модуль ее скорости,  $B$  - модуль вектора индукции магнитного поля,  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{v}$  скорости частицы и вектором  $\vec{B}$ . Сила  $\vec{F}_L$  направлена перпендикулярно как вектору  $\vec{v}$ , так и вектору  $\vec{B}$ . Здесь также применимо правило левой руки, если считать, что движение положительного заряда эквивалентно току, идущему в прямолинейном участке проводника в направлении вектора скорости положительного заряда, а движение отрицательного заряда эквивалентно току, идущему в прямолинейном участке проводника в направлении, противоположном вектору скорости отрицательного заряда.

Если частица массой  $m$  с зарядом  $q$  влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$ , вектор которой перпендикулярен  $\vec{B}$ , то под действием силы Лоренца она начнет двигаться по дуге окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{|q|B}.$$

Период вращения по окружности радиуса  $R$  составит

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости частицы, то работа этой силы равна нулю.

Обозначения:

⊗  $\vec{B}$  - вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости рисунка и направлен «от нас».

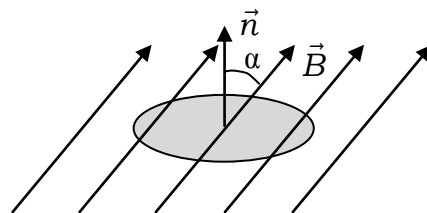
⊙  $\vec{B}$  - вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости рисунка и направлен «к нам».

Магнитным потоком  $\Phi$  через плоскую площадку площадью  $S$ , помещенную в однородное магнитное поле, называется величина

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

где  $B$  - модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ,  $\alpha$  -

угол между вектором  $\vec{B}$  и вектором нормали к площадке  $\vec{n}$  (см.рис.).



Пусть в контуре течет ток силой  $I$ . Этот ток создает собственное магнитное поле. Магнитный поток собственного поля через контур пропорционален току:

$$\Phi_{\text{СОБ}} = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  ( $L > 0$ ) называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью. Индуктивность зависит от размеров и формы проводника с током и от свойств окружающей среды.

Полный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, состоит из потока от внешнего поля  $\Phi_{\text{ВНЕШ}}$  и потока от собственного поля  $\Phi_{\text{СОБ}}$

$$\Phi = \Phi_{\text{ВНЕШ}} + \Phi_{\text{СОБ}}.$$

Независимо от причин, вызывающих изменение полного магнитного потока  $\Phi$  через контур, в контуре возникает электродвижущая сила, называемая электродвижущей силой индукции (закон электромагнитной индукции Фарадея):

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Направление нормали к контуру и положительное направление обхода контура, связанные друг с другом «правилом буравчика», определяют знак  $\Phi$  и  $E$ . ЭДС индукции

положительна, если направление ее действия совпадает с положительным направлением обхода контура и отрицательна в противном случае.

*Правило Ленца:* ЭДС индукции всегда направлена так, чтобы вызванный ею индукционный ток создавал в окружающем пространстве собственное магнитное поле, частично компенсирующее то изменение магнитного потока внешнего поля, в результате которого эта ЭДС возникла.

Причиной появления ЭДС индукции в движущихся в постоянном поле проводниках является сила Лоренца, играющая роль сторонних сил. Направление действия ЭДС индукции в движущемся проводнике совпадает с возможным направлением движения в нем положительных зарядов под действием силы Лоренца.

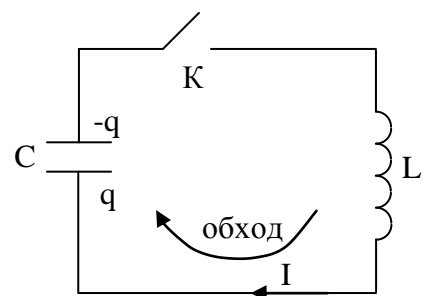
Изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве *вихревого электрического поля*, которое и заставляет заряды двигаться вдоль проводника, создавая ток.

Энергия  $W$ , запасенная в магнитном поле контура с индуктивностью  $L$ , по которому протекает ток силой  $I$ , определяется выражением

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

*Колебательный контур без затухания* (сопротивление равно нулю) состоит из конденсатора с постоянной емкостью  $C$  и катушки с постоянной индуктивностью  $L$  (см.рис.).

Выберем направление обхода и направление тока  $I$  в контуре «по часовой стрелке». Пусть  $q$  - заряд той обкладки конденсатора, для которой  $q' = \frac{dq}{dt} = I$ . Тогда при выбранном направлении обхода для ЭДС самоиндукции и напряжения на конденсаторе имеем:



$$E_{си} = -L \frac{dI}{dt} = -LI' = -Lq'', \quad U_c = \frac{q}{C}.$$

Теперь из второго правила Кирхгофа получаем дифференциальное уравнение колебаний величины  $q$

$$E_{си} = U_c; \quad L \frac{dI}{dt} + \frac{q}{C} = Lq'' + \frac{q}{C} = 0 \Rightarrow q'' + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Заряд  $q$  изменяется по гармоническому закону  $q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$  с циклической частотой  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  и периодом  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  (формула Томсона). Здесь  $q_0$  - максимальный заряд конденсатора,  $\varphi_0$  - начальная фаза. Сила тока при этом изменяется по закону  $I = q' = -\omega q_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2)$ , где  $I_0 = \omega q_0$  - максимальное значение силы тока.

В процессе незатухающих колебаний остается постоянной полная энергия, определяемая суммой энергии электрического поля конденсатора и энергии магнитного поля катушки

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = const.$$