

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, α - 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° 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, α - 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».

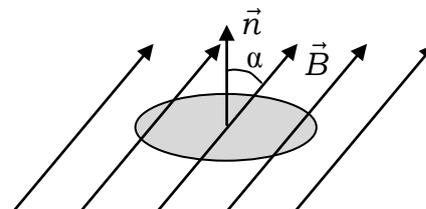
⊙ \vec{B} - вектор \vec{B} перпендикулярен плоскости рисунка и направлен «к нам».

Магнитным потоком Φ 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} , α -

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 Φ , 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 Φ 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 Φ 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.

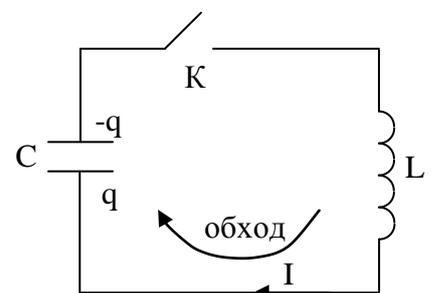
Изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве *вихревого электрического поля*, которое и заставляет заряды двигаться вдоль проводника, создавая ток.

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, φ_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

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