Движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего пространства – создают магнитное поле. В магнитном поле на движущиеся заряды (токи, контуры с током) действуют силы.

Количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $B = \text{Тл} = \frac{\text{А}}{\text{м}}$ – аналог вектора напряженности для электрического поля.

Магнитная индукция – силовая характеристика магнитного поля.

Принцип суперпозиции магнитного поля – магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме индукций отдельных контуров с током.

Линии индукции – линии, касательные к которым направлены также как и вектор магнитной индукции в данной точке поля.

Свойства линий индукции магнитного поля:

1. Линии магнитного поля замкнуты, нигде не начинаются и нигде не заканчиваются. Магнитное поле является вихревым.
2. Густота линий пропорциональна модулю магнитной индукции.
3. Направление линий индукции определяется по правилу буравчика (правого винта).

Сила Лоренца – сила, действующая на движущийся заряд в электромагнитном поле. $F_л = F_\text{М} + F_\text{Е} = q[\vec{v} \times \vec{B}] + q\vec{E}$.

Направление силы Лоренца (магнитной силы) определяется по правилу левой руки.

Вектор силы всегда перпендикулярен направлению скорости, следовательно магнитная сила не совершает работы, т.е. энергия частицы, движущейся в постоянном магнитном поле, остается постоянной.

Сила Ампера – сила, действующая на элемент проводника с током. $dF_\text{А} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]$.

Движущийся заряд создает магнитное поле, индукция которого вычисляется по формуле $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v}\times\vec{r}]}{r^3}$, где $\vec{r}$ – вектор, проведенный от заряда в точку, в которой определяется магнитная индукция, $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}\,\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная, $\vec{v}$ – скорость движения заряда.

Закон Био-Савара-Лапласа – магнитная индукция элемента проводника с током $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[d\vec{l}\times\vec{r}]}{r^3}$.

Магнитное поле бесконечного прямого тока: $B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{b}$, где b – расстояние от проводника до рассматриваемой точки.

Магнитное поле прямого конечного проводника: $B = \frac{\mu_0}{4\pi b}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$, где b – расстояние от проводника до рассматриваемой точки, α_1, α_2 – углы между вектором тока и вектором, проведенным от рассматриваемой точки к току.

Магнитное поле кругового тока: $B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{(R^2+x^2)^{3/2}}$, где x – расстояние от центра витка до рассматриваемой точки вдоль оси, перпендикулярной плоскости контура.

Магнитный поток – мера силы и протяженности магнитного поля. $\Phi = \int d\Phi = \int \vec{B} d\vec{S} = \text{Вб}$.

Графическое представление магнитного поля:

1. Касательные к линиям магнитного поля совпадают с направлением вектора B.
2. Густота линий пропорциональна модулю индукции магнитного поля.
3. Магнитный поток пропорционален числу линий индукции магнитного поля.

Магнитный поток однородного поля $\Phi = \vec{B}\vec{S} = BS\cos\alpha$, где α – угол между вектором магнитной индукции и вектором нормали.

Поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = div\,\vec{B} = 0$.

Циркуляция вектора B по произвольному контуру равна произведению μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых контуром (закон полного тока) $\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I_k$. Ток считается положительным, если его направление связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта.

	Электрическое поле	Магнитное поле
Тип поля	Потенциальное	Вихревое, соленоидальное, непотенциальное
Теорема Гаусса	$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
Теорема Гаусса в дифференциальной форме	$div\,\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$	$div\,\vec{B} = 0$
Теорема о циркуляции	$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0$	$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I_k$
Теорема о циркуляции в дифференциальной форме	$rot\,\vec{E} = 0$	$rot\,\vec{B} = \mu_0\vec{J}$

Магнитное поле бесконечного прямого тока: внутри провода $B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}$, снаружи $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Если провод имеет форму трубки, то магнитное поле внутри отсутствует (согласно теореме о циркуляции).

Магнитное поле соленоида: внутри соленоида $B = \mu_0 n I$, снаружи $B \to 0$, где n – число витков провода на единицу длины. Магнитное поле внутри соленоида однородно.

Магнитное полк тороида: внутри $B = \frac{\mu_0 n I R}{r}$, снаружи $B = 0$, где n – число витков провода на единицу длины.

Элементарный контур с током – контур с током, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других токов.

Магнитный момент – основная характеристика контура с током – векторная величина $\overrightarrow{p_m} = IS\vec{n}$, где S – площадь, обхваченная контуром, $\vec{n}$ – единичный вектор, связанный правилом правого винта с направлением тока.

Сила, действующая на элементарный контур с током в неоднородном поле $\overrightarrow{F_\text{А}} = p_m \frac{\partial\vec{B}}{\partial n}$. Если поле однородно, то $\overrightarrow{F_\text{А}} = 0$.

Момент сил Ампера, действующих на контур с током $\vec{M} = [\overrightarrow{p_m} \times \vec{B}]$. Направление определяется правилом левой руки.

Работа при перемещении контура с током $A = \int_1^2 I d\Phi$.

Намагниченность – количественная характеристика намагничивания веществ – суммарный магнитный момент в единице объема вещества. $\vec{J} = \frac{\sum\overrightarrow{p_m}}{\Delta V} = \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Теорема Гаусса для вектора намагниченности: $\oint \vec{J} d\vec{S} = 0$.

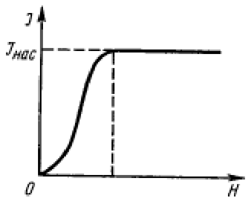
Циркуляция вектора J равна алгебраической сумме токов намагничивания, охватываемых контуром : $\oint \vec{J} d\vec{l} = \sum I'$.

Теорема о циркуляции (закон полного тока) вектора H: $\oint\left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}\right) d\vec{l} = \sum I$. $H = \frac{\text{А}}{\text{м}}$ - вспомогательный вектор (аналог вектора электрической индукции для электрического поля).

Взаимосвязь: $\vec{J} = \chi\vec{H}$, где χ – магнитная восприимчивость. $\chi = \mu - 1$; $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = (\chi + 1)\mu_0\vec{H} = \mu_0(\vec{J} + \vec{H})$.

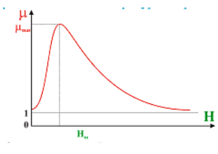
Магнетики – вещества, способные намагничиваться (приобретать магнитный момент).

Диамагнетики: $|\mu| \approx 1, \mu < 1$. Собственное магнитное поле направлено в противоположную сторону внешнему полю. Выталкиваются из внешнего магнитного поля. Молекулы не обладают собственным магнитным моментом.



Парамагнетики: $|\mu| \approx 1, \mu > 1$. Намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля. Втягиваются в область более сильного поля. Молекулы обладают собственным магнитным моментом. Чем больше температура, тем слабее намагничивается парамагнетик. Рисунок чуть выше показывает зависимость J от H для диа- и парамагнетиков.

Ферромагнетики: $\mu \gg 1$. Вещества, способные сохранять намагниченность в отсутствии внешнего магнитного поля. Кривая намагничивания ферромагнетика. $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$. Рисунки справа отражают зависимости для ферромагнетиков.



С увеличением температуры способность ферромагнетиков намагничиваться уменьшается.

Температура Кюри – температура, выше которой ферримагнитные свойства исчезают, а ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Намагничивание ферромагнетика зависит не только от индукции магнитного поля B, но и от предыдущих состояний вещества. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной при цикле перемагничивания.

При изменении магнитного потока возникает ЭДС индукции, которая совершенно не зависит от того, каким образом меняется магнитный поток, а зависит только от скорости его изменения (закон Фарадея).

Направление индукционного тока определяется правилом Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причинам его вызывающим.

ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре определяется скоростью изменения магнитного потока $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле независимо от наличия проводящего контура $\oint \vec{E}d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$.

Явление самоиндукции – изменяющийся во времени ток в контуре приводит к изменению магнитного потока через контур, а, следовательно, к появлению ЭДС индукции в этом же контуре.

В отсутствие ферромагнетиков полный магнитный поток через контур с током I равен $\Phi = LI$, где $L = \text{Гн}$ – индуктивность, зависит от формы и размеров контура, а также от свойств окружающей среды.

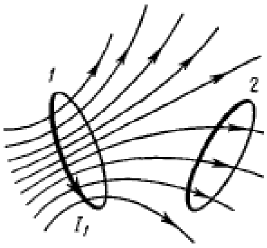
Индуктивность соленоида $L = \mu\mu_0 n^2 V$, где n – число витков на единицу длины.

При изменении силы тока в контуре возникает **ЭДС самоиндукции** $\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt}$. Явления самоиндукции проявляются при замыкании и размыкании в цепи.

Ток при размыкании цепи: $I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = \frac{L}{R}$ – время релаксации.

Ток при замыкании цепи: $I = I_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$.

Взаимная индукция Ток в контуре 1 создает магнитный поток через контур 2 $\Phi_2 = L_{21}I_1; \Phi_1 = L_{12}I_2$. L_{21}, L_{12} - взаимная индуктивность контуров. Зависит от размеров, формы, взаимного расположения контуров и свойств окружающей среды. При всяком изменении тока в одном контуре в другом возникает ЭДС индукции. $\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -L_{12}\frac{dI_2}{dt}; \varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt}$.



Энергия контура с током $W = \frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$. Гармонические колебания: $x = x_0(\omega t + \varphi_0)$. $T = \frac{1}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\omega}$. Математический маятник $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Пружинный маятник $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Колебательный контур $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Полная энергия пружинного маятника $W = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$. Полная энергия колебательного контура $W = \frac{LI^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$. Коэффициент затухания колебаний в колебательном контуре $q'' + 2\beta q' + \omega_0^2 q = 0, \beta = \frac{R}{2L}$. Уравнение затухающих колебаний $q = q_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi_0)$, где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$. Время релаксации τ – время за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз. Логарифмический декремент затухания $\lambda = \ln\frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$.

Добротность колебательного контура Q – отношение запасенной энергии в контуре к энергии, теряемой системой за один период $Q = \frac{\pi}{\lambda}$.

Уравнения максвелла в ответах ко второй рубежке.