Тема: Магнитное поле в вакууме

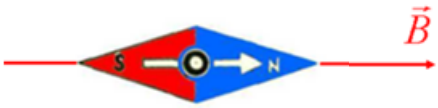
Магнитным полем называется особый вид материи, не воспринимаемый органами чувств человека и оказывающий силовое воздействие на магниты, проводники и контуры с током, а так же на движущиеся заряженные частицы и тела.

Основные характеристики магнитного поля

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$

Основной силовой характеристикой, характеризующей магнитное поле в данной точке пространства, является ***вектор магнитной индукции*** $\vec{B}$ (бэ).

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ (бэ) - это векторная физическая величина, направление которой в данной точке поля совпадает с направлением, которое указывает в этой точке северный полюс магнитной стрелки.



$[B] = Тл$, Тесла.

Вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ (аш)

Использовать вектор магнитной индукции $\vec{B}$ не всегда удобно, поскольку его величина зависит от свойств среды. Поэтому вводится вспомогательная характеристика магнитного поля, величина которой от свойств среды не зависит. Эту величину назвали ***вектором напряжённости магнитного поля*** $\vec{H}$.

Измеряется вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ (аш) в амперах на метр: $[H] = \frac{A}{м}$, Ампер на метр.

причём $$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

где $\mu = \frac{B_{в\ веществе}}{B_{в\ вакууме}}$ - магнитная проницаемость вещества (величина табличная),

$[\mu] = безразмерная$, Для воздуха и вакуума μ = 1.

$B_{в\ веществе}$ - индукция магнитного поля в веществе, *Тл*;

$B_{в\ вакууме}$ - индукция магнитного поля в вакууме, *Тл*;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная (Генри на мктр).

Физический смысл магнитной проницаемости вещества μ (мю)*:* она показывает, во сколько раз вещество усиливает магнитное поле по сравнению с вакуумом.

Взаимодействие магнитов

Любой магнит обладает двумя полюсами. Полюс, указывающий направление на север, назвали северным ***N*** (Nord), а на юг - южным ***S*** (Sude). Северный полюс магнитной стрелки обычно окрашивают в синий цвет, а южный полюс – в красный цвет.

В зависимости от того, какими концами друг к другу повёрнуты магниты, они либо притягиваются, либо отталкиваются

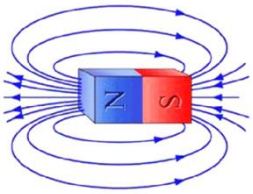
Одноимённые полюса отталкиваются, а разноимённые полюса притягиваются

Графическое изображение магнитных полей

Магнитные поля графически изображаются с помощью *силовых линий*.

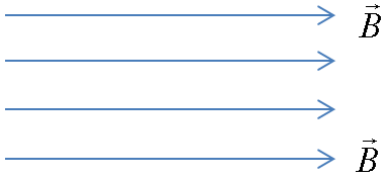
Силовой линией магнитного поля называется линия, касательная в каждой точке которой совпадает по направлению с вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

Принято, что силовые линии выходят из **северного полюса магнитна** N и входят в **южный полюс магнита** S.



В природе не существует магнитных зарядов, поэтому силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Такие поля называются ***вихревыми***.

Однородным магнитным полем называется поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции имеет одну и ту же величину и направление.



Линии индукции однородного магнитного поля изображаются параллельными прямыми, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга.

Сила Ампера $\vec{F}_A$

(это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током)

Сила Ампера F_A *равна произведению вектора магнитной индукции* B *на силу тока в проводнике* I*, длину прямолинейного участка проводника* l *и на синус угла* α *между вектором магнитной индукции и направлением тока в проводнике:*

$$d\vec{F}_A = I\left[d\vec{l}\ \vec{B}\right] \text{ или } dF_A = IdlB\sin\alpha,$$

где I – сила тока в проводнике, *А;*

B – магнитная индукция, *Тл*

$d\vec{l}$ – вектор элемента тока, *м* (направлен по направлению тока)

α – угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Ампера определяется по ***правилу левой руки***:

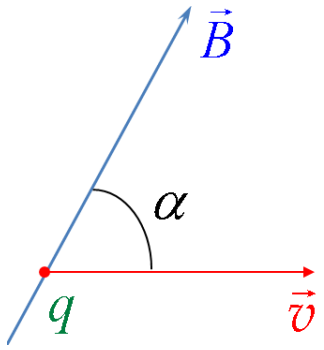
если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца руки были направлены по току, то отогнутый на 90˚ большой палец покажет направление силы Ампера, действующей на проводник с током .

Сила Лоренца $\vec{F}_Л$

(это сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряды)

Сила Лоренца $\vec{F}_Л$ *равна произведению модуля заряда* $|q|$, *движущегося в магнитном поле со скоростью* υ, *на величину вектора магнитной индукции B и на синус угла* α *между вектором скорости заряда* $\vec{\upsilon}$ *и вектором магнитной индукции* $\vec{B}$:

$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{\upsilon}\vec{B}\right] \quad \text{или} \quad F_Л = |q|\upsilon B\sin\alpha,$$



где

B – магнитная индукция, *Тл*; q – заряд, *Кл*;

υ – скорость заряда, *м/с*;

α – угол между векторами $\vec{\upsilon}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Лоренца определяется:

- для положительных зарядов по правилу ЛЕВОЙ РУКИ,
- для отрицательных зарядов по правилу ПРАВОЙ РУКИ.

Правило левой руки:

если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца руки были направлены по скорости заряда, то отогнутый на 90˚ большой палец покажет направление силы Лоренца, действующей на движущийся заряд .

(аналогичное правило для правой руки)

Механический момент сил *M*, действующий на замкнутый контур с током в магнитном поле

На рамку с током в магнитном поле на противоположные стороны рамки действует пара сил Ампера $\vec{F}_A$, которая создаёт механический вращающий момент сил *M*, величину которого можно определить по формуле:

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m\vec{B}\right] \quad \text{или} \quad M = IBS\sin\alpha = p_m B\sin\alpha,$$

где M - механический момент сил, $[M] = H\cdot м$, Ньютон – метр;

B - магнитная индукция, *Тл*;

$\vec{p}_m = I\,S\,\vec{n}$ - вектор магнитного момента контура с током,

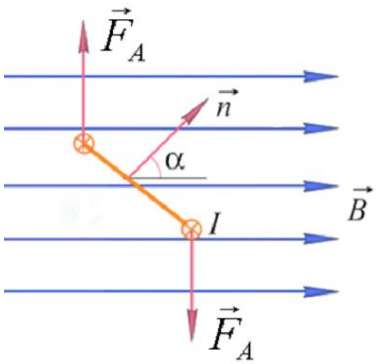
$[p_m] = A\cdot м^2$ (Ампер-метр квадратный)

где $\vec{n}$ - вектор положительной нормали к плоскости контура с током,

$p_m = IS$ - модуль магнитного момента контура с током,

I - сила тока в контуре, *A*; S – площадь контура, $м^2$

α - угол между векторами $\vec{n}$ (или $\vec{p}_m$) и $\vec{B}$.



Таким образом, рамка с током, помещённая в магнитном поле на неподвижной оси вращения, ведёт себя точно так же, как и стрелка компаса.

Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле

Контур с током в магнитном поле обладает потенциальной энергией

$$W_П = -\left(\vec{p}_m \vec{B}\right) = -p_m B cos\alpha ,$$

где $W_П$ - потенциальная энергия контура с током в магнитном поле, *Дж*;

B - магнитная индукция, *Тл*;

$p_m = IS$ - модуль магнитного момента контура с током, $A \cdot м^2$.

I - сила тока в контуре, *А*; S – площадь контура, $м^2$

α - угол между векторами $\vec{n}$ (или $\vec{p}_m$) и $\vec{B}$.

Закон Био-Савара-Лапласа

(позволяет определить магнитную индукцию, создаваемую элементом проводника с током)

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{l}\,\vec{r}\right]}{r^3} \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\alpha}{r^2} ,$$

где dB - магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника с током $d\vec{l}$, *Тл*;

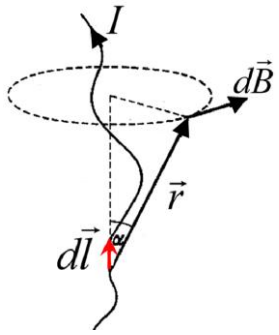
μ - магнитная проницаемость вещества, в котором находится контур с током;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная; I - сила тока в проводнике, *А*;

$d\vec{l}$ - вектор элемента тока, равный по модулю длине dl проводника и совпадающий по направлению с током, *м*;

$\vec{r}$ - радиус-вектор, проведенный от середины элемента проводника dl к точке пространства, магнитная индукция в которой определяется, *м*.

α - угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{r}$.



Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по ***правилу буравчика:***

Если рукоятку буравчика вращать по кратчайшему повороту от первого сомножителя в векторном произведении $d\vec{l}$ ко второму $\vec{r}$, то поступательное движение буравчика укажет направление вектора $d\vec{B}$

Принцип суперпозиции для магнитного поля

(позволяет определить характеристики результирующего магнитного поля, создаваемого несколькими источниками поля)

Результирующая магнитная индукция поля в каждой точке пространства определяется по ***принципу суперпозиции***:

результирующий вектор магнитной индукции $\vec{B}_{рез}$ в данной точке поля равен сумме векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке.

$$\vec{B}_{рез} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_n \quad \text{или} \quad \vec{H}_{рез} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \ldots + \vec{H}_n$$

Циркуляция вектора $\vec{B}$

Циркуляцией вектора магнитной индукции $\vec{B}$ вдоль произвольного замкнутого контура L называется криволинейный интеграл вида:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \oint_L B_l dl,$$

где B_l - проекция вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на направление элементарного перемещения $d\vec{l}$ вдоль контура L.

Теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$ в вакууме (закон полного тока для магнитного поля в вакууме)

Циркуляция вектора $\vec{B}$ в вакууме вдоль произвольного замкнутого контура L, равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму сил токов $\sum_{i=1}^{n} I_i$, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^{n} I_i,$$

где μ_0 — магнитная постоянная;

$\sum_{i=1}^{n} I_i$ - алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром;

Правило знаков для токов:

Ток считается положительным, если он создаёт магнитное поле в направлении положительного обхода контура L, в противном случае ток считается отрицательным.

Поток магнитного поля

Потоком магнитного поля Φ через произвольную поверхность S называется поверхностный интеграл вида

$$\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S BdS\cos\alpha = \int_S B_n dS,$$

где $B_n = B\cos\alpha$ - проекция вектора $\vec{B}$ на вектор нормали $\vec{n}$ в данной точке поверхности dS,

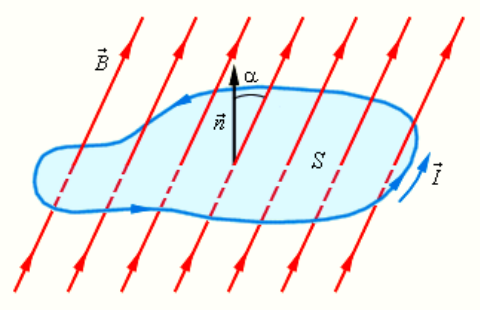
α - угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$ в данной точке поверхности dS.

$[\Phi] = Вб$, Вебер.

Поток однородного магнитного поля через плоскую поверхность

Потоком однородного магнитного поля через какую-либо плоскую поверхность S называется скалярная величина, равная

$$\Phi = BS\cos\alpha,$$



где Φ – магнитный поток, $[\Phi] = Вб$, Вебер,

S – площадь контура, $м^2$;

$\vec{n}$ - вектор положительной нормали к плоскости контура,

α – угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$

Теорема Гаусса для магнитного поля

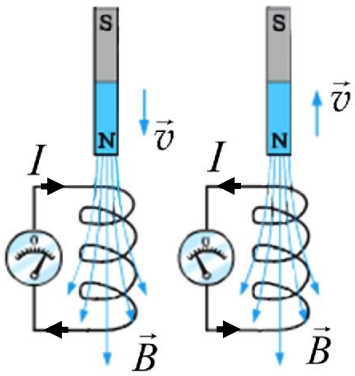
Поток вектора магнитной индукции через любую произвольную замкнутую поверхность равен нулю:

$$\int_S \vec{B}d\vec{S} = 0.$$

Физический смысл теоремы Гаусса: она говорит о том, что силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.

Явление электромагнитной индукции

После обнаружения того факта, что электрический ток создаёт вокруг себя магнитное поле, стали искать обратный эффект: ***можно ли магнитным полем создать электрический ток***?



Опыты Фарадея

(позволили обнаружить явление *электромагнитной индукции*)

- при вдвигании и выдвигании магнита, в катушке возникает электрический ток, который называют индукционным (то есть наведённым) током.
- если магнит неподвижен относительно катушки, то тока нет.

Так было обнаружено явление электромагнитной индукции.

Электромагнитной индукцией (ЭМИ) называется явление возникновения в замкнутом проводящем контуре электрического тока, при изменении магнитного потока пронизывающего этот контур.

На основании подобных опытов был установлен **закон электромагнитной индукции:** *Индукционный ток возникает в замкнутом проводящем контуре только при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур, и существует в течение всего времени изменения магнитного потока.*

Так как ток существует только при наличии электрического поля, следовательно, во время изменения магнитного потока, в проводнике возникает электрическое поле.

Физический смысл явления ЭМИ:

переменное магнитное поле создаёт в окружающем его пространстве электрическое поле, силовые линии которого замкнуты (такие поля называются ***вихревыми***) и которое является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

Вихревое электрическое поле возникает всегда при изменении магнитного поля в не зависимости от того, в какой среде это происходит (то есть в вакууме, проводнике или диэлектрике).

Таким образом, электромагнитная индукция создаёт в замкнутом контуре электродвижущую силу (ЭДС), которая и создаёт индукционный ток.

Закон Фарадея для электромагнитной индукции (1831 г.)

ЭДС электромагнитной индукции $\mathcal{E}_{инд}$, *возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока* $\frac{d\Phi}{dt}$ *через поверхность этого контура и существует в течение всего времени* dt *изменения магнитного потока:*

$\mathcal{E}_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt}$ - мгновенное значение ЭДС индукции, возникающей в одном витке,

$\langle \mathcal{E}_{инд} \rangle = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - среднее значение ЭДС индукции, возникающей в одном витке,

где $\mathcal{E}_{инд}$ - ЭДС индукции, $В$, Вольт;

$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - изменение магнитного потока через контур, $Вб$, Вебер;

Δt - время изменения магнитного потока, *с*.

Правило Ленца

Знак минус в законе Фарадея позволяет через правило Ленца определить направление индукционного тока в замкнутом контуре.

Правило Ленца (1833):

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля, которое вызвало этот индукционный ток.

Явление самоиндукции

Когда по замкнутому контуру течёт ток силой *I*, то магнитное поле тока создаёт свой собственный магнитный поток $\Phi_{соб}$ пересекающий поверхность этого контура.

Опыт показывает, что собственный магнитный поток $\Phi_{соб}$ через контур прямо пропорционален силе тока *I* в контуре:

$$\Phi_{соб} = LI,$$

где $[\Phi_{соб}] = Вб$, Вебер, $[L] = \frac{Вб}{А} \equiv Гн$, Генри – индуктивность контура.

Явление самоиндукции

При изменении силы тока I в контуре, изменяется собственный магнитный поток $\Phi_{соб}$ через поверхность этого контура, следовательно, в контуре возникает ЭДС индукции, которую назвали ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{сам}$.

Самоиндукцией *называется явление возникновения в замкнутом проводящем контуре ЭДС индукции при изменении силы тока в этом контуре.*

ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{сам}$, возникающей в замкнутом контуре

ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{сам}$, возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре $\frac{dI}{dt}$ и существует в течение всего времени dt изменения тока в контуре:

$$\mathcal{E}_{сам} = -\frac{d\Phi_{соб}}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$ - мгновенное значение ЭДС самоиндукции в одном витке,

$$\langle \mathcal{E}_{сам} \rangle = -\frac{\Delta\Phi_{соб}}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$ - среднее значение ЭДС самоиндукции в одном витке.

где $\left[\mathcal{E}_{сам}\right] = B$ - ЭДС самоиндукции, Вольт,

$\Delta\Phi_{соб} = \Phi_2 - \Phi_1 = L\Delta I$ - изменение собственного магнитного потока, $Вб$

Δt - время изменения собственного магнитного потока, с,

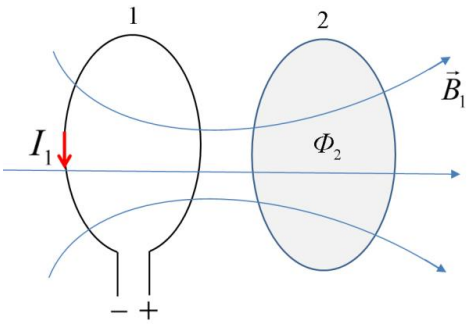
L - индуктивность контура или соленоида, $Гн$, Генри.

Явление взаимной индукции

Если рядом находятся несколько замкнутых контуров и в одном из них протекает ток, то собственное магнитное поле этого контура пронизывает поверхности соседних контуров.

Если ток в контуре начнёт изменяться, то в соседних контурах начнёт наводиться ЭДС электромагнитной индукции, которую называют ЭДС взаимной индукции.

Взаимной индукцией *называется явление возникновения ЭДС индукции в контуре за счёт изменения собственных магнитных потоков соседних контуров.*



- контур 1 создаёт собственное магнитное поле $\vec{B}_1$,
- через контур 2 проходит магнитный поток

$$\Phi_2 = L_{21}I_1,$$

где I_1 - сила тока в контуре 1, A,

L_{21} - коэффициент взаимной индукции второго контура 2 относительно первого контура 1, $Гн$, Генри.

Работа сил магнитного поля по перемещению проводника или контура с током

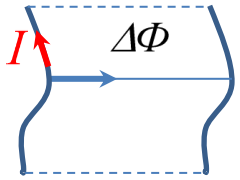
$$A_{мп} = I\Delta\Phi,$$

где $A_{мп}$ - работа сил магнитного поля, $Дж$;

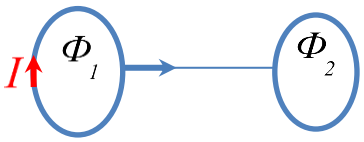
I - сила тока в проводнике или контуре, A ;

$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - изменение магнитного потока через контур, $Вб$.

Возможны два случая:



1. Если перемещается проводник с током, то $\Delta\Phi$- это поток магнитного поля через поверхность, которую «заметает» проводник при своём движении,



2. Если перемещается контур с током, то $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$- это изменение потока магнитного поля через поверхность контура, при его движении.

Энергия магнитного поля контура или соленоида (катушки индуктивности) с током

Когда в контуре или соленоиде течёт ток, то вокруг них возникает магнитное поле, энергию которого можно определить по формуле:

$$W_{МП} = \frac{LI^2}{2}$$

где $W_{МП}$ - энергия магнитного поля контура с током или соленоида с током, $Дж$;

L - индуктивность контура или соленоида, $Гн$;

I - сила тока в контуре или соленоиде, A.