

Лекция 5

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

(закон Био-Савара-Лапласа и закон полного тока)

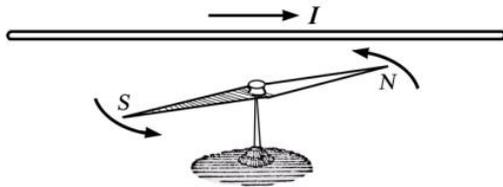


Магнитные свойства постоянных магнитов, их способность притягивать железные предметы были известны еще древним грекам. Земля также является магнитом, и явления земного магнетизма были использованы древними китайцами для создания компаса, т. е. свободно вращающейся магнитной стрелки, указывающей ориентацию сторон света.



Магнитные взаимодействия токов и постоянных магнитов

1. Опыт Эрстеда (1820)



Взаимодействие
постоянного
электрического тока с
магнитной стрелкой.

На магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся повернуть стрелку. Стрелка стремится расположиться перпендикулярно проводнику с током.

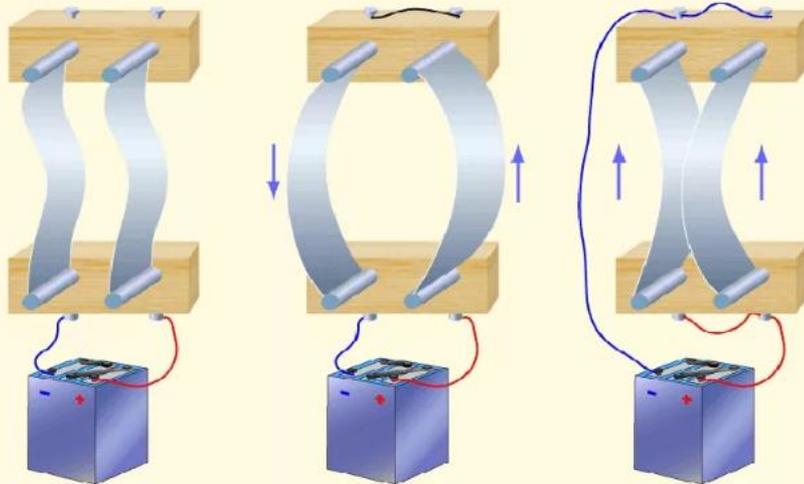
Вывод:

вокруг прямолинейного проводника с током есть магнитное поле.

2. А. Ампер. (1820)

Силовое взаимодействие двух проводников с токами.

Взаимодействие проводников с током



Токи одинакового направления притягиваются, а противоположного отталкиваются.

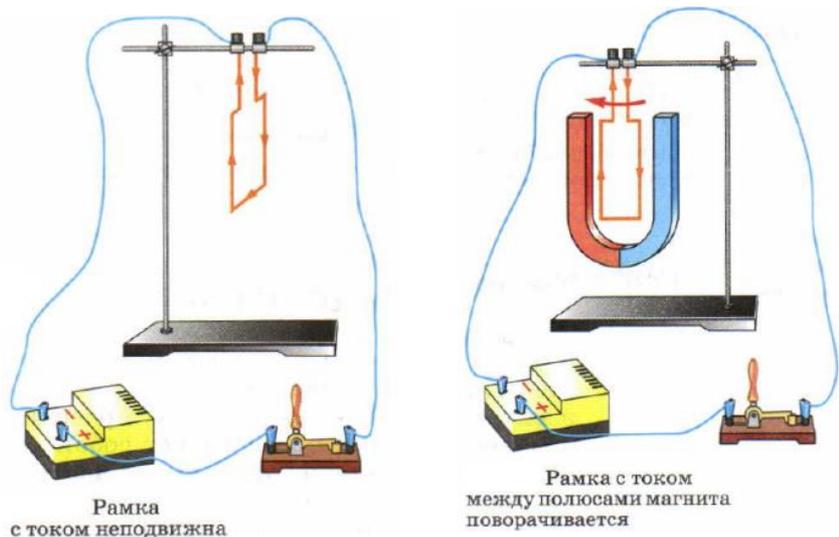
3. Действие постоянного магнита на проводник с током

Магнитное поле действует с некоторой силой на любой проводник с током, находящийся в нем



Направление движения проводника зависит от направления тока в проводнике и от расположения полюсов магнита

4. Ориентирующее действие магнита на рамку с током

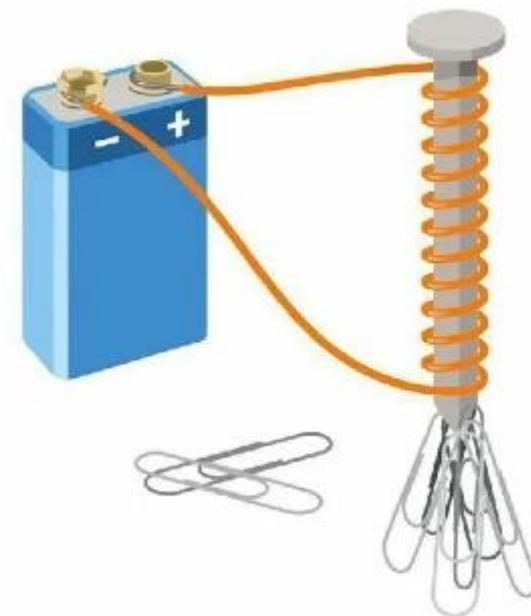


Если поместить проволочную рамку, по которой протекает электрический ток, в магнитное поле, то рамка будет поворачиваться

ВЫВОД: взаимодействия токов и постоянных магнитов эквивалентны. Эти взаимодействия называют **магнитными**, так как они осуществляются посредством **магнитного поля**.

5. Араго (1820)

Намагничивание железа постоянным током



Магнитное поле

Магнитное поле – это одна из форм проявления электромагнитного поля. *Магнитное поле* создается движущимися электрическими зарядами или токами и действует только на движущиеся заряды или токи, а также на намагниченные тела.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Магнитная
индукция**

$$\vec{B} \quad [B] = \text{Тл}(\text{тесла})$$

– векторная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой поля (зависит от свойств окружающей среды).

**Напряженность
магнитного поля**

$$\vec{H} \quad [H] = \frac{A}{m}$$

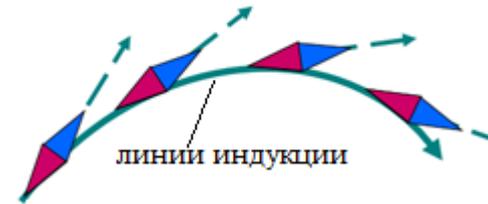
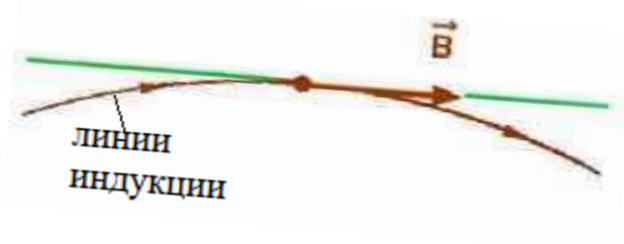
– векторная физическая величина, являющаяся характеристикой поля (не зависит от свойств окружающей среды).

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

μ_0 – магнитная постоянная

μ – магнитная проницаемость среды

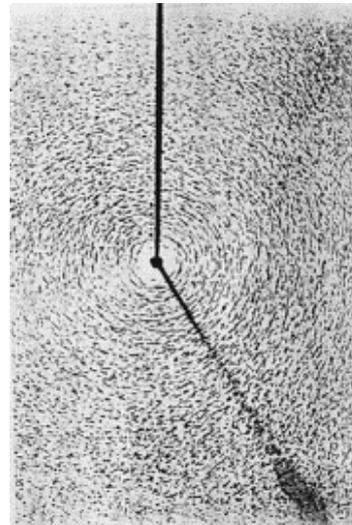
Магнитное поле графически изображается с помощью **линий магнитной индукции (магнитных линий)** – это линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором магнитной индукции в данной точке поля.



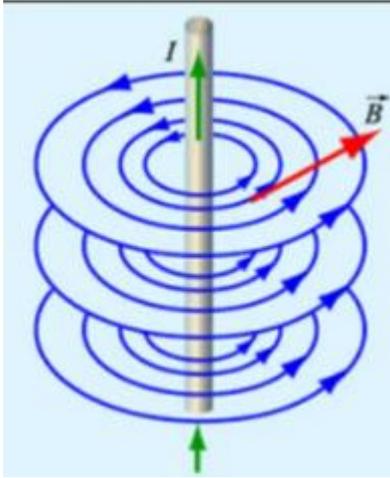
Линии индукции – воображаемые линии, вдоль которых расположились бы магнитные стрелки, помещённые в магнитное поле.

Свойства линий магнитной индукции

- ✓ «охватывают» проводник, создающий это поле
- ✓ всегда замкнутые (не имеют ни начала, ни конца)
- ✓ не пересекаются и не касаются друг друга
- ✓ там, где магнитное поле сильнее, силовые линии расположены гуще



Конфигурацию силовых линий легко установить с помощью мелких железных опилок которые намагничиваются в исследуемом магнитном поле и ведут себя подобно маленьким магнитным стрелкам (поворачиваются вдоль силовых линий).

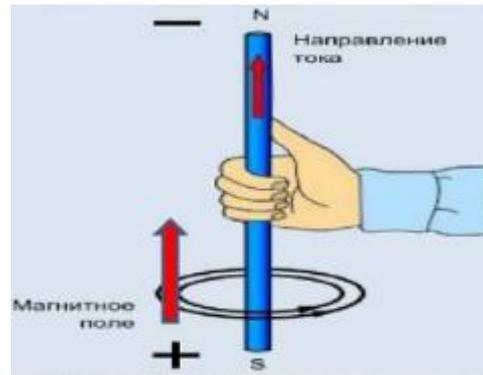


Для магнитного поля прямолинейного проводника с током линии магнитной индукции – концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током.

Направление линий магнитной индукции зависит от направления тока в проводнике и определяется **по правилу правого винта (буравчика)** или **по правилу правой руки**.



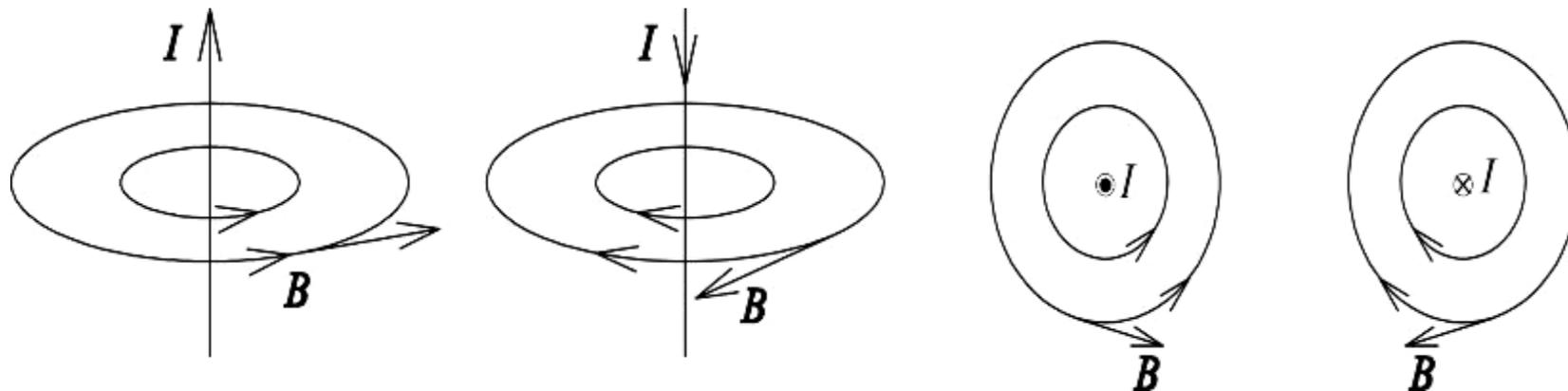
если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в контуре, то поступательное движение винта укажет направление линий индукции внутри контура



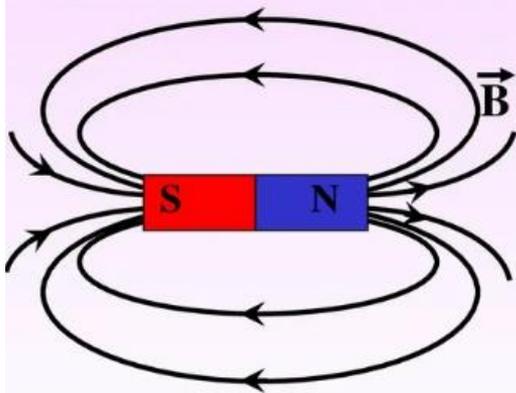
Если правую руку расположить так, чтобы большой палец был направлен по току, то остальные четыре пальца покажут направление линии магнитной индукции

Линии магнитной индукции

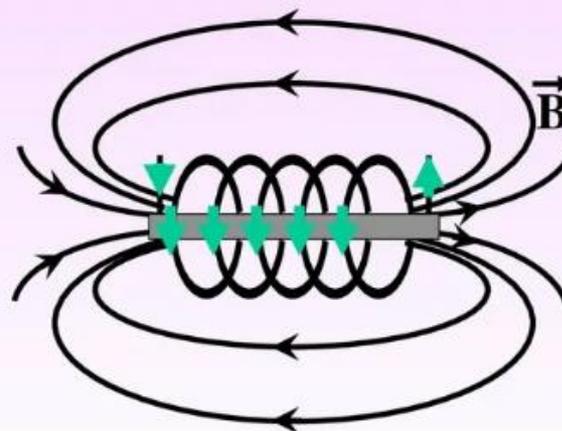
Прямолинейный проводник



постоянный магнит



соленоид



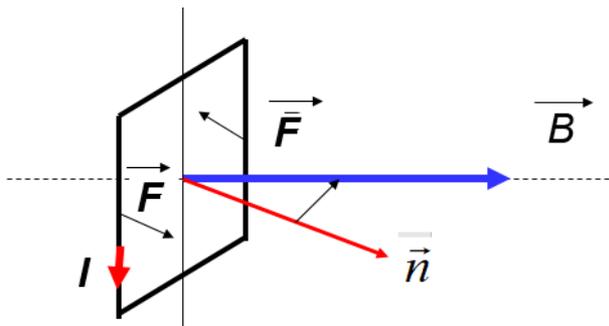
Так как **вектор магнитной индукции** является силовой характеристикой магнитного поля, то модуль и направление этого вектора можно установить из соотношений, которые определяют:

- *силу, действующую на проводник с током в магнитном поле (силу Ампера);*
- *силу, действующую на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле (силу Лоренца);*
- *вращающий момент, действующий на рамку с током в магнитном поле.*

Контур с током в однородном магнитном поле. Магнитный момент контура с током

В магнитном поле контур (рамка) с током будет ориентироваться определенным образом.

Вращающий момент, действующий на контур (рамку с током) прямо пропорционален величине тока I , площади контура S и синусу угла между направлением магнитного поля и нормали \vec{n} :



$$M \sim ISB (\vec{n}, \vec{B})$$

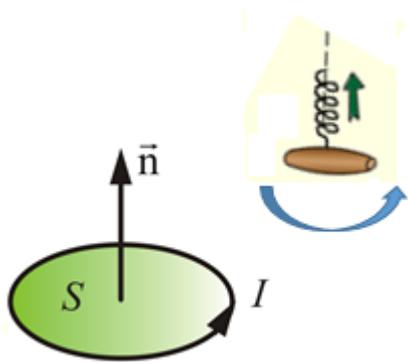
M - вращающий момент

\vec{n} - нормаль к контуру

Вращающий момент, действующий на рамку, зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки. Можно ввести величину

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}$$

- **МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ** контура с током (характеризует поведение контура в магнитном поле)



Направлением нормали \vec{n} связано с направлением тока *правилом правого винта или буравчика.*

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

- вращающий момент (момент сил), действующий на рамку с током

$$M = p_m B \sin(\vec{p}_m, \vec{B})$$

- модуль момента сил

Если $\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B}$ или $\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}$, то $M=0$. При $\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B}$ положение равновесия неустойчивое.

Итак, под действием вращающего момента рамка с током повернется так, что $\vec{n} \parallel \vec{B}$.

Отношение момента силы к магнитному моменту $\frac{M}{P_m}$

для данной точки магнитного поля будет одним и тем же и может служить характеристикой магнитного поля, названной **магнитной индукцией**:

$$B = \frac{M}{P_m \sin(\vec{n}, \vec{B})}$$

Если $\sin(\vec{n}, \vec{B})=1$, то

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

По аналогии с электрическим полем

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

M_{\max} - максимальный вращающий момент

P_m - магнитный момент контура

Магнитная индукция (\vec{B}) – векторная физическая величина, силовая характеристика магнитного поля, численно равная отношению максимального вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле, к магнитному моменту контура.

Направление вектора магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением нормали \vec{n}

Расчет магнитных полей

Для расчета магнитных полей используют закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции полей, а также закон полного тока.

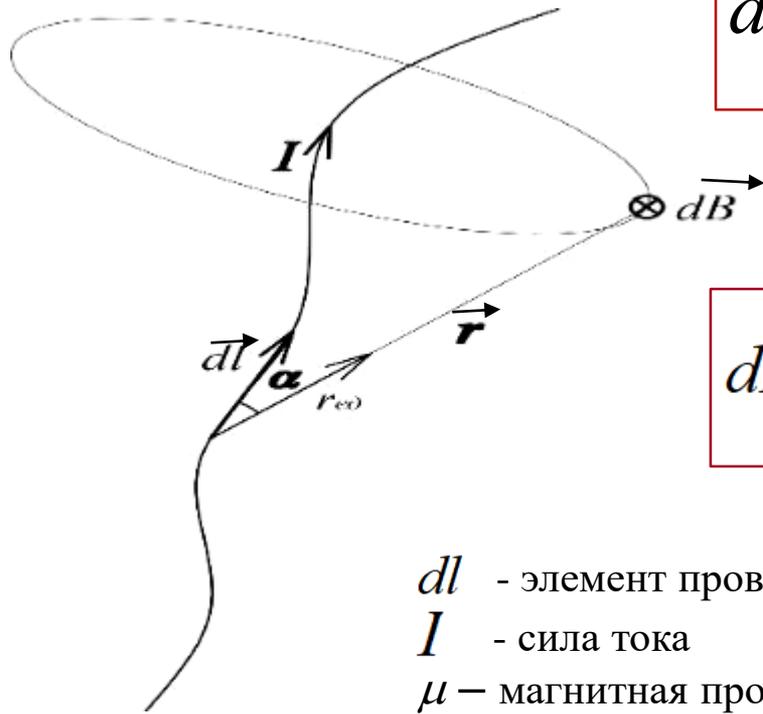
Закон Био-Савара-Лапласа

Французские физики **Ф. Савар** и **Ж.Б. Био** изучали магнитное поле, создаваемое проводниками с постоянным током различной формы. На основании многочисленных опытов они пришли к выводу, что **магнитная индукция** поля проводника с током

- пропорциональна силе тока I и зависит от направления тока;
- зависит от формы и размеров проводника;
- зависит от расположения рассматриваемой точки по отношению к проводнику;
- зависит от магнитных свойств среды, окружающей проводник.

Результаты этих опытов были обобщены французским математиком и физиком **П. Лапласом**.

Закон Био–Савара-Лапласа позволяет рассчитывать магнитные поля токов различных конфигураций.



$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

- закон Био-Савара-Лапласа для элемента проводника с током в векторном виде

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha$$

- закон Био-Савара-Лапласа для элемента проводника с током в скалярном виде

dl - элемент проводника

I - сила тока

μ - магнитная проницаемость изотропной среды;

μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

r - радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция поля;

α - угол между радиусом-вектором и направлением тока в элементе провода.

По принципу суперпозиции индукция магнитного поля проводника длиной l :

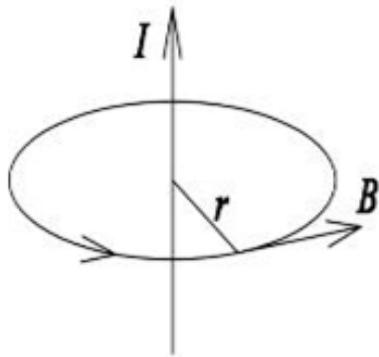
$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}$$

Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

Магнитная индукция поля прямолинейного проводника

1) созданного бесконечно длинным прямым проводником с током



$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$$

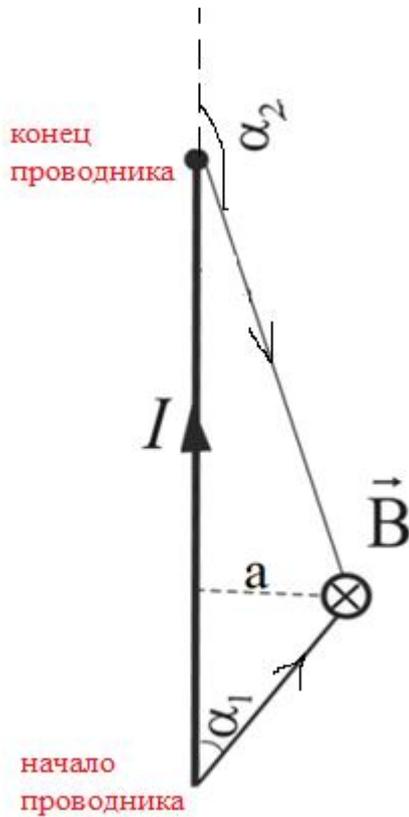
I - сила тока в проводнике

r - расстояние до проводника

μ - магнитная проницаемость изотропной с

μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м)

2) созданного отрезком проводника



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

I - сила тока в проводнике

a - расстояние до проводника

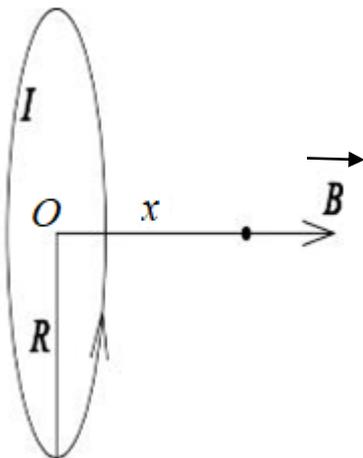
μ - магнитная проницаемость изотропной с

μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м)

α_1 и α_2 - углы, которые образуют с направлением тока радиус-векторы, проведенные из начала и конца проводника

Магнитная индукция кругового поля

1) в центре кругового витка с током



$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$$

I – сила тока

R – радиус кругового тока

2) на оси кругового тока

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

I – сила тока

R – радиус кругового тока

x – расстояние от центра кругового тока до точки на оси

Закон полного тока (Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля)

Циркуляцией вектора \vec{H} по произвольному замкнутому контуру L называется интеграл

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l}$$

$$\oint_L (\vec{H} \cdot d\vec{L}) = \sum I_i$$

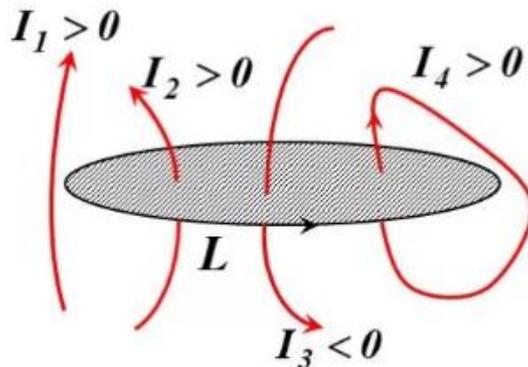
- закон полного тока

Циркуляция вектора H по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром, причем токи направление которых связаны с направлением обхода контура правилом правого винта, берут со знаком «+», в противном случае – со знаком «-».

Пример

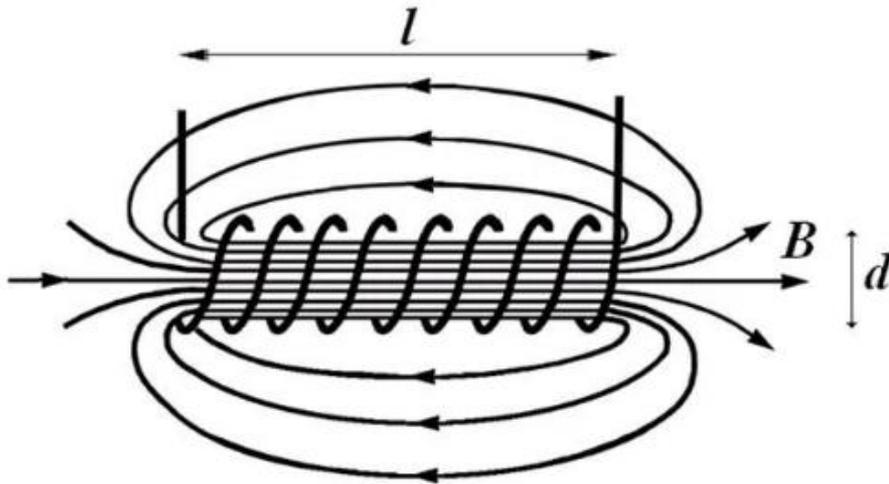
токи I_1 , I_2 и I_4 - положительные, ток I_3 - отрицательный. Сумма токов:

$$I_k = 0 \cdot I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = I_2 - I_3 + I_4$$



Магнитное поле соленоида

Соленоид - тонкий провод, намотанный плотно виток к витку на цилиндрический каркас.



Поле внутри бесконечно длинного соленоида однородное, вне соленоида – равно нулю.

l – длина соленоида

N – число витков

d - диаметр витков

Если $l \gg d$ - соленоид бесконечно длинный

$\frac{N}{l} = n$ - число витков на единицу длины

$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l}$$

$B = \mu\mu_0 nI$ - индукция внутри соленоида

$H = nI$ - напряженность внутри соленоида

nI - число ампер-витков на единицу длины