

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное поле – форма материи, существующая вокруг движущихся зарядов, посредством которой осуществляется связь и взаимодействие между движущимися электрическими зарядами в веществе и вакууме.

Вокруг проводника с током существует магнитное поле. Между двумя, расположенными параллельно друг другу, длинными проводниками возникают силы притяжения при пропускании через них электрического тока в одном направлении, и силы отталкивания, если токи имеют противоположное направление. Такое взаимодействие токов объясняется тем, что электрический ток, протекающий по одному из проводников, создает в пространстве магнитное поле, которое и действует на другой проводник. Существенно, что магнитное поле в данной точке пространства создается одновременно всеми участками проводника, по которому течет ток.

Взаимодействие магнитов во многом сходно с взаимодействием электрических зарядов: разноименные полюсы магнитов притягиваются, а одноименные – отталкиваются.

Силовой характеристикой магнитного поля является векторная физическая величина – **магнитная индукция** $\vec{B}$. Магнитное поле называется **однородным**, если векторы $\vec{B}$ одинаковы во всех его точках.

Единица измерения магнитной индукции в СИ – тесла (Тл).

Магнитную индукцию можно определить на основании: 1) ориентирующего действия магнитного поля на проводник с током, 2) силового воздействия магнитного поля на проводник с током, 3) отклонения движущихся заряженных частиц в магнитном поле.

На плоский замкнутый контур с током в однородном магнитном поле действует **момент сил** $\vec{M}$, модуль, которого равен:

$$M = IBS \sin \alpha,$$

где I – сила тока, протекающего в контуре, B – модуль вектора индукции магнитного поля, S – площадь поверхности, охватываемой контуром, α – угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью к поверхности.

При исследовании магнитного поля с помощью контура с током, модуль вектора магнитной индукции определяют отношением максимального момента сил $M_{\max}$, действующего на контур с током со стороны магнитного поля, к произведению силы тока I , протекающего в контуре, на площадь контура S :

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

Вектор $\vec{B}$ направлен перпендикулярно плоскости, в которой устанавливается свободно вращающийся контур с током в ту сторону, куда перемещался бы буравчик с правой резьбой, если рукоятку вращать по направлению тока в контуре.

На проводник с током в магнитном поле действует сила, называемая **силой Ампера**. Модуль силы Ампера равен произведению силы тока I , протекающего в проводнике, на модуль вектора магнитной индукции B , на длину проводника l и на синус угла α между вектором $\vec{B}$ и направлением тока:

$$F_A = IBl \sin \alpha.$$

Направление силы Ампера определяется правилом левой руки: если левую руку расположить так, чтобы четыре пальца указывали направление тока, перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции входила в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

При исследовании магнитного поля с помощью прямолинейного проводника с током, модуль вектора магнитной индукции определяют отношением максимального значения силы Ампера $F_{A\max}$, к произведению силы тока I , протекающего в проводнике, на длину этого проводника l :

$$B = \frac{F_{A\max}}{I}.$$

Направление вектора магнитной индукции в этом случае можно определить по правилу левой руки: расположить проводник с током в магнитном поле так, чтобы действующая на проводник сила была максимальна. Четыре пальца левой руки расположить по направлению тока в проводнике, отогнутый на 90° большой палец должен указывать направление действующей силы, тогда вектор индукции $\vec{B}$ будет входить перпендикулярно в плоскость ладони.

Сила, действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, называется **силой Лоренца**. Модуль силы Лоренца равен произведению абсолютного значения движущегося заряда q на скорость его движения v , на модуль вектора магнитной индукции B и на синус угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{v}$:

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы четыре пальца указывали направление скорости движения заряженной частицы, перпендикулярная к скорости составляющая вектора магнитной индукции входила в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на положительный заряд.

При исследовании магнитного поля с помощью движущихся заряженных частиц, модуль вектора магнитной индукции определяют отношением максимального значения силы Лоренца $F_{L\max}$, действующей на одну заряженную частицу, к произведению модуля заряда этой частицы q на скорость её движения v .

$$B = \frac{F_{L\max}}{qv}.$$

Направление вектора магнитной индукции в этом случае можно определить по правилу левой руки (см. силу Лоренца).

Для графического изображения магнитных полей используется представление о линиях магнитной индукции.

Линиями магнитной индукции (силовыми линиями магнитного поля) называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этих точках.

Линии индукции магнитного поля ни в одной точке поля не обрываются. Эти линии либо замкнуты, либо идут из бесконечности в бесконечность. Замкнутость линий магнитной индукции обозначает, что в природе нет свободных магнитных зарядов. В отличие от электростатического поля, магнитное поле является непотенциальным вихревым полем.

Рассмотрим некоторые примеры магнитных полей. Направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого прямым проводником с током определяется **правилом буравчика (правилом правого винта)**: если поступательное движения буравчика с правой резьбой совпадает с направлением тока в проводнике, то направление движения рукоятки буравчика укажет направление вектора магнитной индукции (рис. 1). Магнитное поле постоянного магнита показано на рис. 2.

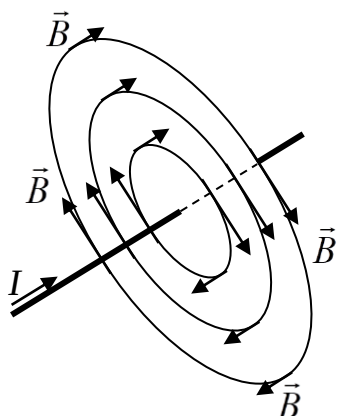


Рис. 1

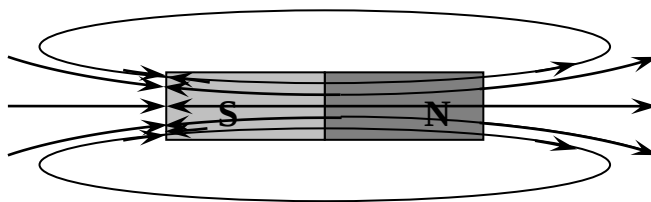


Рис. 2

Движение заряженных частиц в магнитном поле

На заряженную частицу, движущуюся в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует постоянная

по модулю и направлению сила Лоренца, направленная перпендикулярно вектору скорости. Под действием силы Лоренца заряженная частица движется по окружности постоянного радиуса. Окружность лежит в плоскости, перпендикулярной к вектору магнитной индукции. Радиус окружности R , по которой движется частица, определяется из условия:

$$qvB = m \frac{v^2}{R}, \quad R = \frac{mv}{qB}.$$

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

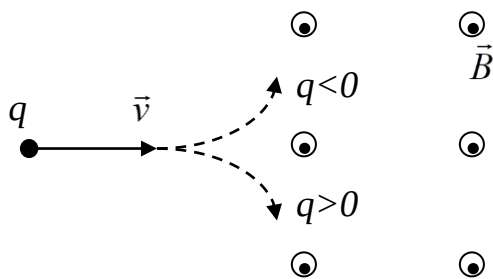


Рис. 3

Отклонение заряженной частицы, движущейся перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, используется для определения знака заряда частицы (рис. 3).

Если вектор скорости заряженной частицы составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ однородного поля, то частица движется по винтовой линии. Радиус витка

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}. \text{ Шаг винта равен } h = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{qB}.$$

Примеры решения задач

Задача 1. Почему два параллельных проводника, по которым идут токи в одном направлении, притягиваются, а два параллельных катодных пучка отталкиваются?

Решение. Вокруг первого проводника возникает магнитное поле B_1 , направление которого находится по правилу буравчика (рис. 4). Второй проводник находится в этом магнитном поле B_1 (около проводника поле направлено

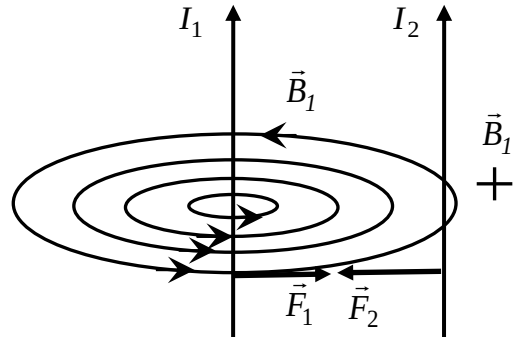


Рис. 4

от нас $+B_1$). По второму проводнику идёт ток I_2 , поэтому на него действует сила Ампера F_2 , направление которой находится по правилу левой руки: она направлена в сторону первого проводника. Аналогично находится сила F_1 , действующая на первый проводник со стороны магнитного поля второго тока. Силы взаимодействия $F_1 = F_2$ являются в данном случае силами притяжения.

В проводниках объемный электрический заряд равен нулю, поэтому проявляются только магнитные силы – силы взаимодействия между движущимися зарядами. В катодных пучках – пучках электронов – над магнитными силами преобладают кулоновские силы отталкивания между одноименными зарядами.

Задача 2. Нихромовая проволока длиной $l = 0,2$ м подвешена на тонких невесомых нитях в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. На какой угол α отклонится эта проволока, если к её концам приложить напряжение $U = 0,5$ В?

Решение. На проволоку действует три силы: сила Ампера, сила тяжести и сила натяжения нитей (рис. 5). Так как проволока находится в равновесии, геометрическая сумма сил, действующих на неё, равна нулю:

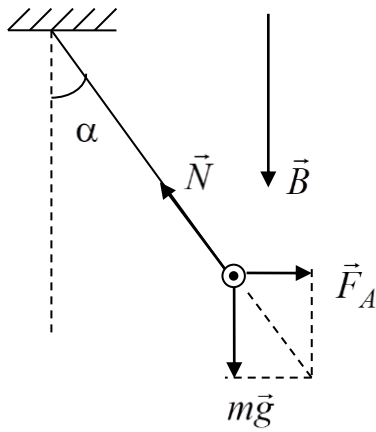


Рис. 5

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{T} = 0.$$

Из геометрических построений следует, что:

$$\operatorname{tg} \alpha = F_A / mg.$$

Модуль силы тяжести $mg = \rho_m Vg = \rho_m lSg$,

где ρ_m – плотность нихрома; S – площадь сечения нихромовой проволоки.

Ток, протекающий по проволоке, можно рассчитать по закону Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\rho l / S} = \frac{US}{\rho l}, \text{ где } \rho - \text{удельное сопротивление нихрома. Тогда}$$

$$F_A = IBl = \frac{BUS}{\rho}.$$

Подставляя полученные выражения для силы Ампера и силы тяжести в формулу для нахождения угла, получаем:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{BU}{\rho \rho_m gl} \approx 70^\circ.$$

Задача 3. Электрон, обладающий скоростью v , попадает в однородное магнитное поле, индукция которого $\vec{B}$ составляет угол α с вектором $\vec{v}$. По какой траектории будет двигаться электрон? Окружность какого радиуса будет ей соответствовать? Чему равна работа силы, действующей на электрон?

Решение. Сила Лоренца, действующая на движущийся в магнитном поле электрон, перпендикулярна скорости электрона и сообщает ему центростремительное ускорение. Поэтому $ev_1 B = \frac{mv_1^2}{R}$, откуда $R = \frac{mv_1}{eB}$.

$v_1 = v \sin \alpha$ – составляющая скорости, перпендикулярная вектору $\vec{B}$. Поскольку вектор скорости имеет также составляющую, направленную вдоль вектора $\vec{B}$, то одновременно с вращением электрон будет продвигаться вдоль силовой линии магнитного поля, т.е. двигаться по винтовой траектории.

Проекция её на плоскость, перпендикулярную вектору $\vec{B}$, – это окружность радиуса $R = mv \sin \alpha / (eB)$.

Совершаемая работа равна нулю, так как сила всё время перпендикулярна перемещению электрона.

Задачи для самостоятельного решения

1. По двум одинаковым металлическим обручам, расположенным один горизонтально, другой вертикально, идут одинаковые токи. Найти направление вектора индукции магнитного поля в их общем центре.

2. Проводник, расположенный перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, весит в одном случае 15 Н, а в другом 10 Н в зависимости от направления тока в нем. Определить массу проводника.

3. Между полюсами магнита на двух тонких вертикальных проволочках подвешен горизонтальный линейный проводник массой $m = 10$ г и длиной $l = 20$ см. Индукция однородного магнитного поля направлена вертикально и равна $B = 0,25$ Тл. Весь проводник находится в магнитном поле. На какой угол α от вертикали отклоняются проволочки, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток силой $I = 2$ А? Массами проволочек пренебречь.

4. Электроны, летящие в телевизионной трубке, ускорены разностью потенциалов $U = 12$ кВ. Трубка ориентирована так, что электроны движутся горизонтально с юга на север. Вертикальная составляющая земного магнитного поля направлена вниз, и его индукция $B = 5,5 \cdot 10^{-5}$ Тл. В каком направлении будет отклоняться электронный луч? Каково ускорение каждого электрона? Насколько отклонится пучок электронов, пролетев $l = 20$ см внутри телевизионной трубки? Удельный заряд электрона $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.