

Лекция 20

Действие магнитного поля на проводник с током и на движущийся заряд

Вопросы. Сила Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов. Контуры с током в магнитном поле. Магнитный момент тока. Действие электрического и магнитного полей на движущиеся заряды. Сила Лоренца. Определение удельного заряда электрона. Эффект Холла и его применение. Принцип работы магнитогидродинамических генераторов.

20.1. Сила Ампера.

Взаимодействие параллельных токов

При исследовании действия магнитного поля на расположенный в нем прямолинейный проводник с током французский физик А. Ампер пришел к выводу, что модуль этой силы можно рассчитать по формуле

$$F_A = IBl \sin \alpha. \quad (20.1)$$

Позднее эта сила была названа силой Ампера, а формула – *законом Ампера*. Направление силы Ампера определяется по *правилу левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы нормальная к проводнику составляющая \vec{B}_\perp вектора индукции магнитного поля \vec{B} входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Ампера, которая действует на проводник с током (рис. 20.1).

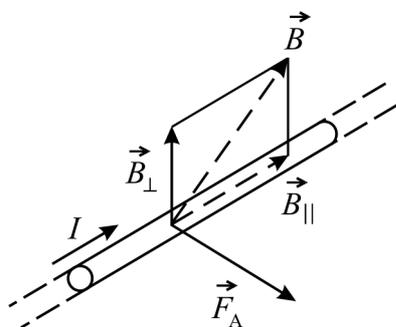


Рис. 20.1

На основе закона Ампера можно объяснить взаимодействие параллельных проводников с током (рис. 20.2).

Ток I_1 создает в месте расположения проводника с током I_2 магнитное поле \vec{B}_1 , которое действует на ток I_2 с силой $F_{12} = B_1 I_2 l$. Ток I_2 в свою очередь также

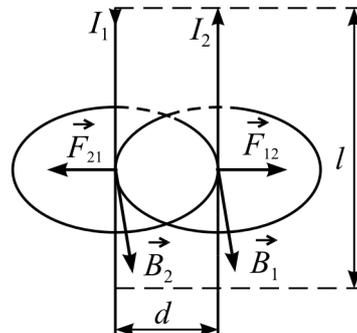
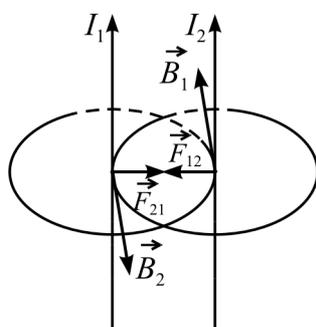


Рис. 20.2

создает магнитное поле, индукция которого в месте расположения проводника с током I_1 равна \vec{B}_2 . Это поле действует на ток I_1 с силой $F_{21} = B_2 I_1 l$. Силы F_{12} и F_{21} находятся в одной плоскости с проводниками и являются силами притяжения, если токи

направлены в одну сторону, и силами отталкивания, если токи направлены в противоположные стороны (рис. 20.2).

Если расстояние между проводниками равно d , то индукция магнитного поля, созданного током I_1 в тех точках пространства, где находится второй проводник,

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}. \quad (20.2)$$

Соответственно индукция магнитного поля, созданного током I_2 в тех точках пространства, где расположен первый проводник,

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}. \quad (20.3)$$

Таким образом, для проводников длиной l :

$$F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \quad (20.4)$$

Если проводники находятся в вакууме ($\mu=1$) на расстоянии $d=1$ м и токи в них одинаковые и равны единице, то сила взаимодействия между участками проводников длиной по 1 м $F_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7}$ Н. Эта формула используется для определения единицы силы тока – ампера – в СИ.

20.2. Контур с током в магнитном поле

Поместим замкнутый контур с током в однородное магнитное поле. Пусть плоскость контура перпендикулярна линиям индукции поля. Если разделить контур на элементы dl , то на каждый из них действует сила $dF = IB dl$, которая лежит в плоскости контура и направлена к его центру (рис. 20.3).

Если изменить направление тока на противоположное, то сила dF будет направлена в противоположную сторону (рис. 20.4).

Значит, силы, которые действуют на замкнутый контур с током в однородном перпендикулярном магнитном поле, могут только деформировать его (растянуть или сжать). Перемещение контура при этом не происходит.

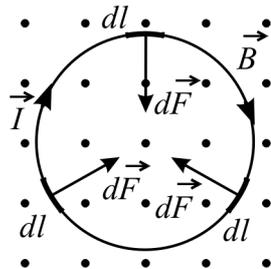


Рис. 20.3

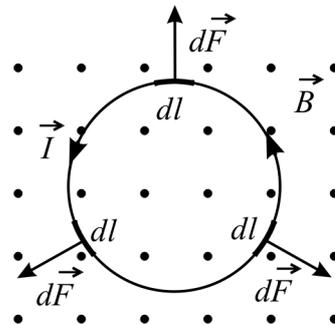


Рис. 20.4

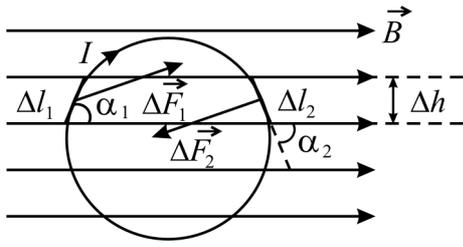


Рис. 20.5

Если расположить контур параллельно направлению линий магнитной индукции (рис. 20.5), то на контур будет действовать вращательный момент сил M . Под действием этого момента контур поворачивается так, чтобы его плоскость стала перпендикулярной линиям магнитной индукции.

Определим величину вращательного момента. Для этого разделим контур на малые элементы Δl . Выделим два элемента Δl_1 и Δl_2 , заключенные между двумя параллельными линиями магнитной индукции, отстоящими друг от друга на расстоянии Δh . На эти элементы со стороны поля действуют силы $\Delta \vec{F}_1$ и $\Delta \vec{F}_2$, направленные соответственно перпендикулярно плоскости контура «от нас» и «к нам». Модули этих сил равны: $\Delta F_1 = IB\Delta l_1 \sin \alpha_1$ и $\Delta F_2 = IB\Delta l_2 \sin \alpha_2$. Если учесть, что $\Delta l_1 \sin \alpha_1 = \Delta h$ а $\Delta l_2 \sin \alpha_2 = \Delta h$, то очевидно, что эти силы равны по модулю и направлены в противоположные стороны. Они образуют пару сил, момент которой $\Delta M = \Delta Fx = IB\Delta hx = IB\Delta S$, где x – среднее расстояние между элементами Δl_1 и Δl_2 ; $\Delta S = \Delta hx$ – площадь, ограниченная линиями магнитной индукции и элементами контура Δl_1 и Δl_2 . Очевидно, что весь контур состоит из суммы всех пар элементов. Поэтому суммарный момент действующий на контур, равен

$$M = \sum \Delta M = IB \sum \Delta S = IBS.$$

Если контур расположен в магнитном поле так, что угол между его нормалью \vec{n} и вектором магнитной индукции \vec{B} поля равен β , то под действием проекции вектора \vec{B} на нормаль к контуру равную $B_{\perp} = B \cos \beta$ контур будет растягиваться (сжиматься), а под действием проекции \vec{B} на плоскость контура $B \sin \beta$ – поворачиваться.

Поэтому в общем случае формула расчета вращательного момента имеет вид:

$$M = IBS \sin \beta. \quad (20.5)$$

Как уже отмечалось, величину $p_m = IS$ называют магнитным моментом контура с током. Это величина векторная, и она совпадает по направлению с единичным вектором нормали \vec{n} : $\vec{p}_m = IS\vec{n}$. Тогда формулу (20.5) можно записать в векторном виде:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]. \quad (20.6)$$

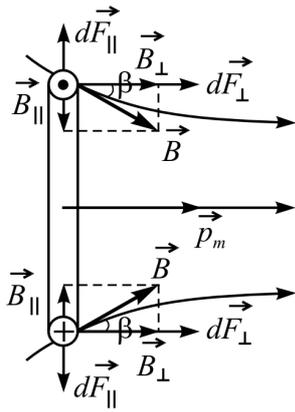


Рис. 20.6

Если контур с током поместить в неоднородное магнитное поле, то кроме ориентирующего действия вращательного момента на контур будет действовать сила \vec{f} в направлении возрастания магнитного поля (рис. 20.6).

Эта сила является равнодействующей всех сил $d\vec{F}_\perp$ на каждый элемент тока со стороны составляющей поля \vec{B}_\parallel . Расчет показывает, что модуль силы, которая действует на весь контур, равен:

$$f = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha, \quad (20.7)$$

где α – угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} ; $\frac{\partial B}{\partial x}$ – градиент индукции магнитного поля.

20.3. Сила Лоренца

Как уже отмечалось, на проводник с током, который находится в магнитном поле, действует сила Ампера $F_A = IB \sin \alpha$. Поскольку ток представляет упорядоченное движение свободных электрических зарядов, то это означает, что магнитное поле действует на каждый из этих зарядов. Сила, действующая на заряд, который движется в магнитном поле, называется *силой Лоренца*. Х. Лоренц (1853–1928), нидерландский физик, создатель классической электронной теории.

Если учесть, что сила тока в проводнике

$$I = qn\nu S,$$

где q – заряд носителей тока; n – концентрация носителей тока; ν – скорость их упорядоченного движения; S – площадь поперечного сечения проводника, то формула (20.1) примет вид:

$$F_A = qn\nu S l B \sin \alpha.$$

Силу Лоренца можно выразить, как

$$F_E = \frac{F_A}{N},$$

где N – общее количество носителей тока в проводнике. С учетом того, что $Sl = V$ (V – объем проводника):

$$F_E = q\nu B \sin \alpha, \quad (20.8)$$

где α – угол между направлением вектора индукции магнитного поля и направлением вектора скорости движения положительного заряда. Направление силы Лоренца, как и силы Ампера, также определяется по правилу левой руки.

20.4. Определение удельного заряда электрона

Под действием силы Лоренца частицы, обладающие электрическим зарядом, движутся в магнитном поле по криволинейным траекториям. Причем если скорость частицы $\vec{v} \perp \vec{B}$, то траектория ее движения в магнитном поле представляет окружность (рис. 20.7).

Определив радиус этой окружности, скорость частицы и величину индукции магнитного поля, можно рассчитать удельный заряд этой частицы. Этот метод используется для определения удельного заряда электрона.

Так, ввиду малости величины силы тяжести, действующей на электрон, движущийся в перпендикулярном магнитном поле, можно записать в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$F_{\vec{E}} = ma \text{ или } eBv = m \frac{v^2}{R},$$

откуда радиус окружности равен

$$R = \frac{mv}{eB},$$

а удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{RB}. \quad (20.9)$$

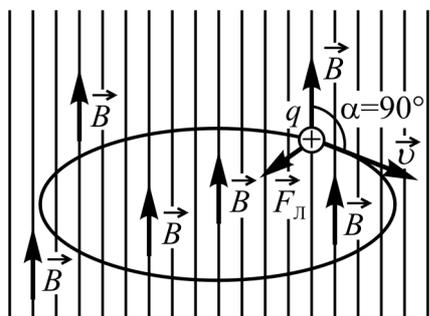


Рис. 20.7

Для определения скорости необходимо знать ускоряющую разность потенциалов электрического поля. Известно, что на заряженную частицу со стороны электрического поля действует сила

$$\vec{F}_y = q\vec{E},$$

где q – заряд частицы, \vec{E} – напряженность электрического поля. Если скорость частицы $v \ll c$ и электрическое поле является однородным, то она будет двигаться в поле с постоянным ускорением.

Если скорость частицы в момент включения электрического поля равна нулю, то изменение ее кинетической энергии происходит за счет работы сил поля, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} = qU,$$

где U – напряжение между точками входа и выхода частицы из электрического поля. Поэтому скорость частицы при выходе из электрического поля

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (20.10)$$

С учетом (20.10) выражение (20.9) примет вид:

$$\frac{\dot{a}}{m} = \frac{2U}{R^2 B}. \quad (20.11)$$

Опыты, проведенные таким образом, позволили рассчитать отношение

$$\frac{e}{m} \approx 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}.$$

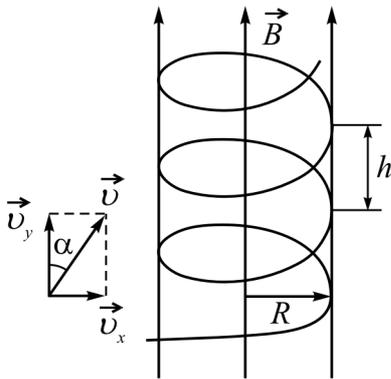


Рис. 20.8

Если заряженная частица влетает в магнитное поле так, что направление ее скорости \vec{v} образует с вектором индукции магнитного поля \vec{B} угол α (причем $\alpha \neq 0$, $\alpha \neq \pi$), то траектория движения частицы представляет винтовую линию (рис. 20.8). На частицу, которая движется вдоль линий индукции магнитного поля со скоростью v_y , сила Лоренца не действует.

Перпендикулярная составляющая скорости v_x обеспечивает движение частицы по окружности радиуса R . Таким образом, под действием двух составляющих скорости v_y и v_x частица движется по винтовой линии.

Радиус винтовой траектории согласно формуле (20.9) будет равен:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}, \quad (20.12)$$

а шаг винта

$$h = (vT \cos \alpha), \quad (20.13)$$

где $T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$ – период обращения по окружности радиуса R .

Как уже отмечалось ранее, электрическое и магнитное поля являются частями единого электромагнитного поля. Поэтому в произвольной системе отсчета полная сила, с которой электромагнитное поле действует на заряженную частицу, равна векторной сумме электрической \vec{F}_y и магнитной \vec{F}_i составляющих, т. е.

$$\vec{F} = \vec{F}_y + \vec{F}_i.$$

20.5. Эффект Холла

Если пластинку, вдоль которой течет постоянный ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между гранями, параллельными направлению тока и поля, возникает разность потенциалов. Это явление впервые исследовал американский физик Е. Холл (1811–1890) в 1879 г., и оно впоследствии было названо *эффектом Холла* (рис. 20.9).

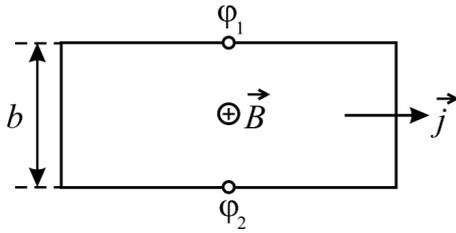


Рис. 20.9

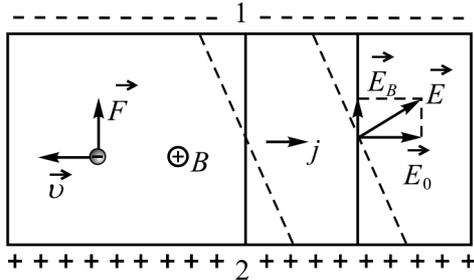


Рис. 20.10

Экспериментально определено, что разность потенциалов Холла определяется по формуле:

$$\Delta\varphi = RbjB, \quad (20.14)$$

где b – ширина пластинки, j – плотность тока, B – магнитная индукция поля, R – коэффициент пропорциональности, который называется *постоянной Холла*.

Эффект Холла можно объяснить согласно электронной теории. Если магнитное поле отсутствует, ток в пластинке обусловлен электрическим полем \vec{E}_0 (рис. 20.10).

Потенциал во всех точках поверхности одинаков, в том числе и в точках 1 и 2. Электроны как носители отрицательного заряда двигаются со скоростью \vec{v} против вектора плотности тока \vec{j} .

При включении магнитного поля на каждый электрон действует сила Лоренца, направленная вдоль стороны b и численно равная $F_{\vec{E}} = evB$. Поэтому электроны приобретают составляющую скорости, которая направлена к верхней грани пластинки. Значит, на этой грани накапливается отрицательный заряд, на нижней – положительный. Таким образом, возникает поперечное электрическое поле \vec{E}_B . Если сила $\vec{F}_B = e\vec{E}_B$ уравновесит силу Лоренца $\vec{F}_{\vec{E}} = e\vec{v}\vec{B}$, то установится стационарное равновесие: $eE_B = evB$. Откуда $E_B = vB$. Результирующее поле \vec{E} равно векторной сумме полей \vec{E}_0 и \vec{E}_B . Так как эквипотенциальные линии перпендикулярны вектору напряженности поля \vec{E} , то точки 1 и 2, которые ранее лежали на одной эквипотенциальной поверхности, уже имеют разный потенциал.

Значит, разность потенциалов между этими точками равна:

$$\Delta\varphi = bE_B = bvB = b\frac{j}{ne}B. \quad (20.15)$$

Сравнивая выражения (20.14) и (20.15), определим постоянную Холла:

$$R = \frac{1}{ne}. \quad (20.16)$$

Из формулы (20.14) следует, что величина постоянной Холла, как и разности потенциалов Холла, зависит от концентрации носителей заряда в проводящей пластинке. Так как концентрация носителей тока в полупроводниках значительно меньше, чем в металлах, то и эффект Холла в полупроводниках наблюдать легче.

Эффект Холла используется в датчиках Холла, которые используют для измерения напряженности постоянных и переменных магнитных полей, силы и мощности электрического тока, превращения постоянного ток в переменный, модулирования и детектирования сигналов, анализа спектра частот, «чтения» магнитных записей и во многих элементах автоматики и вычислительной техники.

20.6. Принцип работы магнитогидродинамических генераторов

Магнитогидродинамический (МГД) генератор – энергетическая установка, в которой тепловая энергия рабочего тела (плазмы) превращается в электрическую. Принцип работы МГД-генератора основан на взаимодействии магнитного поля с заряженными частицами, которые движутся в нем (рис. 20.11).

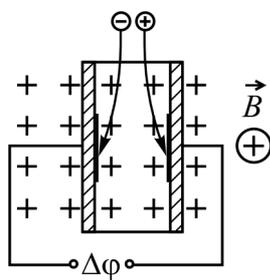


Рис. 20.11

Если создать поток плазмы в магнитном поле, линии индукции \vec{B} которого перпендикулярны скорости зарядов \vec{U} , то под действием силы Лоренца произойдет их разделение. Это значит, положительные заряды магнитным полем будут отклоняться в одну сторону, а отрицательные – в другую. В результате один электрод заряжается положительно, а второй – отрицательно. Между ними возникает разность потенциалов. Если электроды соединить проводником, то в нем возникнет электрический ток.

Использование МГД-генераторов является перспективным направлением развития тепловой энергетики, так как позволяет получать КПД 60 %, в то время как КПД тепловых станций достигает 40 %. Органическое топливо, которое используется в МГД-генераторах, вместе с нагретым воздухом поступает в камеру сгорания с температурой 3000 °С. Там они превращаются в плазму. С целью увеличения электропроводности плазмы в нее могут добавлять специальные присадки – соли калия или цезия, уменьшающие выброс серы в атмосферу, тем самым решая часть экологических проблем.