

ЛЕКЦИЯ 3.

ПЛАН ЛЕКЦИИ

- 1. Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов.*
- 2. Контур с током в магнитном поле.*
- 3. Эффект Холла (**самостоятельно**).*
- 4. Движение заряженных частиц в постоянном магнитном поле (**самостоятельно**).*

ЗАКОН АМПЕРА

Электрические токи создают магнитное поле. В свою очередь каждый носитель тока испытывает действие магнитной силы. Действие этой силы передается проводнику, по которому заряды движутся. В результате магнитное поле действует с определенной силой на сам проводник с током. Определим эту силу.

Воспользуемся моделью *единичных элементов тока*.

Задача: определить силу dF , действующую на единичный элемент тока dl стороны магнитного поля, созданного другим элементом тока.

ЗАКОН АМПЕРА

На движущийся со скоростью \vec{v} заряд q действует магнитная сила

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

Если провод, по которому течет ток, поместить в магнитное поле, эта сила действует на каждый из носителей тока.

Пусть n - число носителей тока, содержащихся в единице объема проводника.

Тогда в элементе провода dl содержится $nSdl$ носителей заряда (S - площадь поперечного сечения проводника в том месте, где располагается элемент тока).

На каждый из носителей тока будет действовать магнитная сила $\langle \vec{F} \rangle$ во всех направлениях в пределах dl

$$d\vec{F} = \langle \vec{F} \rangle nSdl$$

$\langle \vec{u} \rangle$ - средняя скорость упорядоченного движения носителей тока.

ЗАКОН АМПЕРА

$$d\vec{F} = ne \langle \vec{u}, \vec{B} \rangle S dl$$

Внесем постоянные величины ne под знак векторного произведения и, учтя, что $ne \langle \vec{u}, \vec{B} \rangle = j$ получим

$$d\vec{F} = \langle \vec{j}, \vec{B} \rangle dV$$

$dV = S dl$ - объем элемента провода.

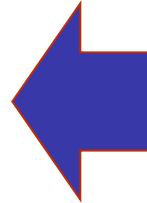
Для тонкого проводника $j dV = I dl$. Следовательно:

$$d\vec{F} = I \langle dl, \vec{B} \rangle$$

Выделенные формулы – это различные формы записи *закона Ампера*. Силы, действующие на токи в магнитном поле, - *силы Ампера*.

ЗАКОН АМПЕРА

$$d\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}]dV$$



$\vec{j}dV$ - объемные элементы тока.

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$$

Интегрирование выражений по объемным или линейным элементам тока даст

магнитную силу, действующую на объем проводника или его линейный участок.

Направление силы Ампера:

векторы $d\vec{l}$, \vec{B} и $d\vec{F}$ образуют правовинтовую ортогональную тройку векторов.

Модуль силы Ампера: $dF = IB dl \sin \alpha$

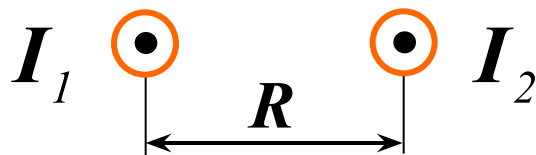
α - угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} .

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов

Рассмотрим два бесконечных прямолинейных проводника с токами I_1 и I_2 , расстояние между которыми равно R .

Пусть токи в проводниках текут в одном направлении, «к нам».

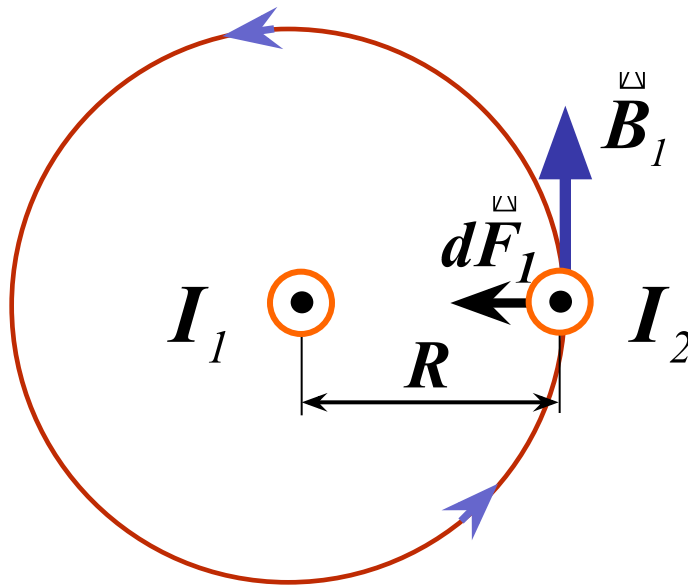


Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует в соответствии с законом Ампера на другой проводник с током.

Определим силу, с которой действует магнитное поле тока I_1 на элемент dl второго проводника с током I_2 .

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



Ток I_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции которого - concentric окружности.

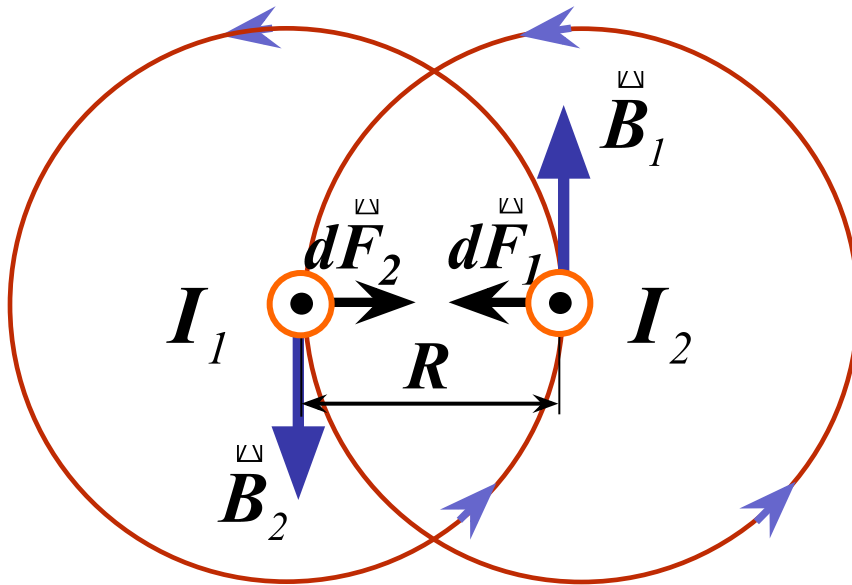
Направление линий магнитной индукции определяется правилом правого винта, модуль вектора B_1 равен

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}$$

Направление силы $d\vec{F}_1$, с которой поле \vec{B}_1 действует на элемент $d\vec{l}$ тока I_2 , определяется из закона Ампера $d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



Ток I_2 создает вокруг себя такое же магнитное поле, что и I_1 .

Выражение для модуля силы Ампера:

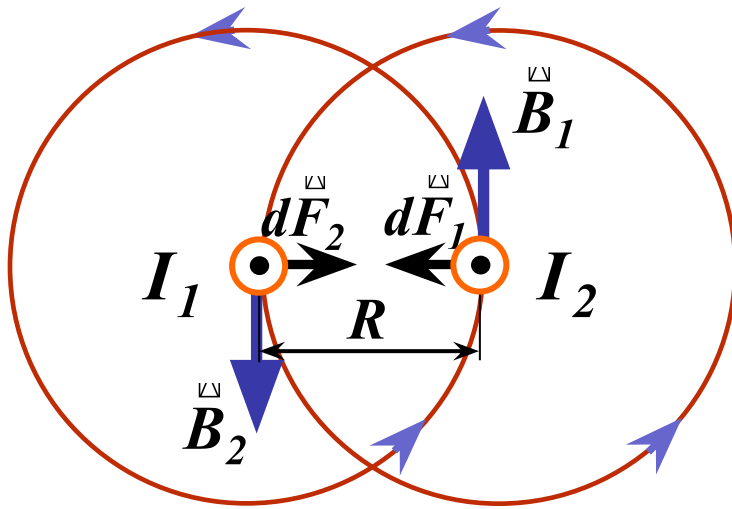
$$dF_1 = I_2 B_1 dl \sin \alpha$$

Поскольку угол α между элементом тока dl и вектором \vec{B}_1 прямой, модуль силы dF_1 равен

$$dF_1 = I_2 B_1 dl$$

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



$$dF_1 = I_2 B_1 dl \quad B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}$$

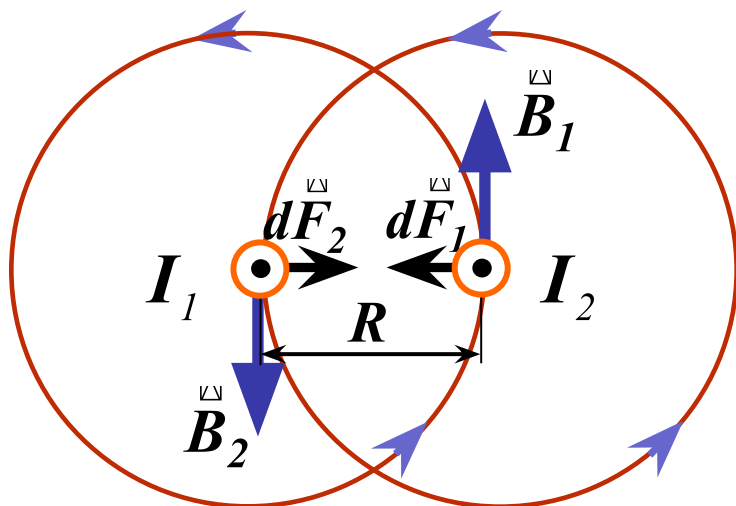
$$dF_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} dl$$

Выражение для модуля силы dF_2 , с которой магнитное поле тока I_2 действует на элемент dl первого проводника с током I_1 :

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} dl$$

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



$$dF_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

Сила dF_2 направлена в сторону, противоположную силе dF_1

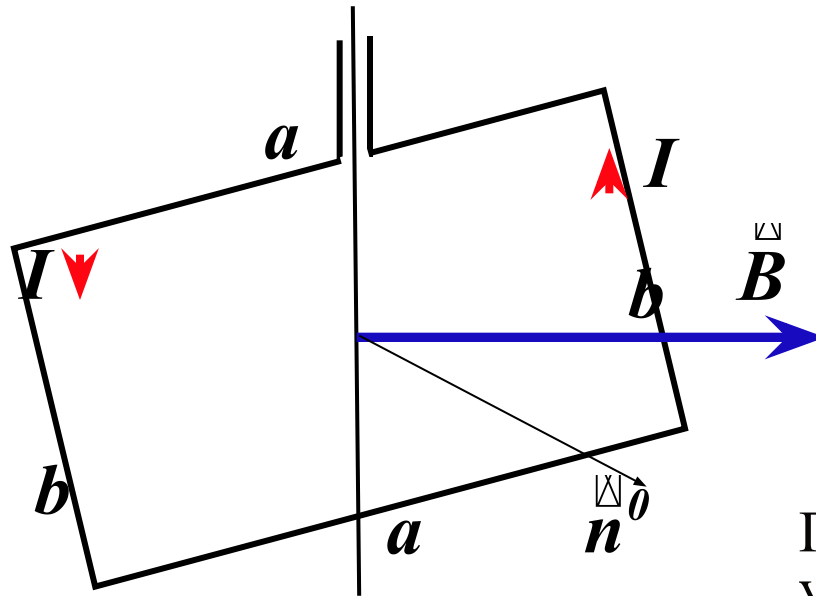
Эти силы равны по модулю: $dF_1 = dF_2$

Следовательно, два проводника притягивают друг друга с силой

Если токи в проводниках направлены встречно, то между ними действует сила отталкивания, равная по модулю силе dF .

$$dF = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

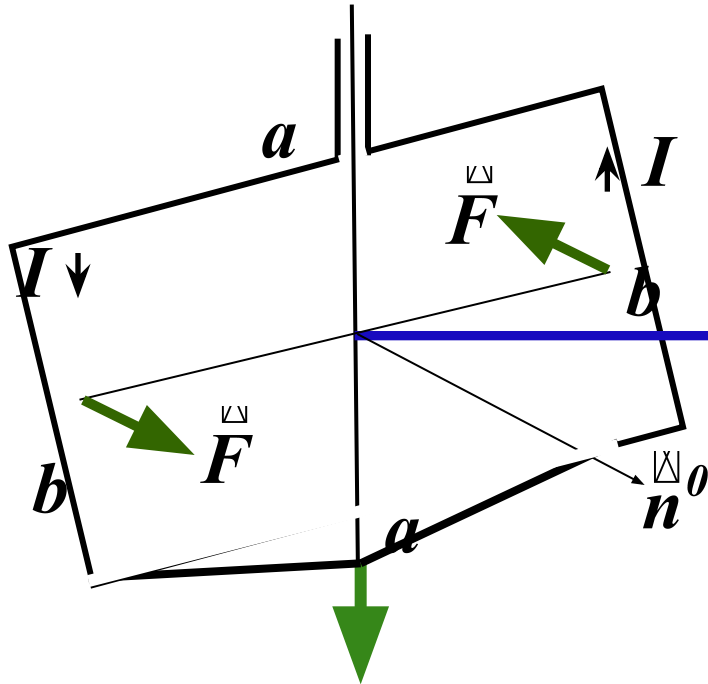


Рамка со сторонами a и b имеет возможность вращаться вокруг оси, проходящей через середины ее сторон длиной a .

Поместим рамку под некоторым углом по отношению к линиям индукции магнитного поля.

Рассмотрим действие сил Ампера на каждую из сторон рамки.

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



Силы Ампера, действующие на стороны a контура, направлены в противоположные стороны вдоль оси контура.

\vec{B}

Действие этих сил приводит к деформации (сжатию или растяжению) контура.

Силы Ампера, действующие на стороны b контура, \perp плоскости, в которой лежат векторы $d\vec{l}$ и \vec{B} .

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

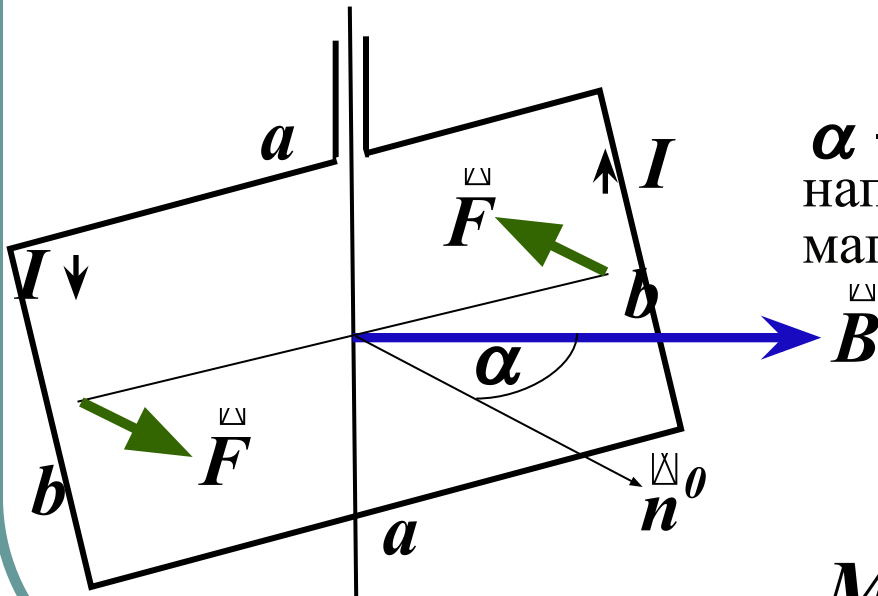
Численное значение сил Ампера:

$$F = IbB$$

Из рисунка видно, что силы, действующие на стороны b контура, создают вращающий момент M , модуль которого равен

$$M = Fa \sin \alpha$$

α - угол между нормалью к контуру и направлением силовых линий магнитного поля, $a \sin \alpha$ - плечо силы.



Подставив выражение для силы $F = IbB$, получим

$$M = IBabs \sin \alpha$$

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

$$M = Iab \sin \alpha$$

ab - это площадь, ограниченная контуром, а $Iab = p_m$ - модуль магнитного момента контура с током.

В итоге получим выражение вида

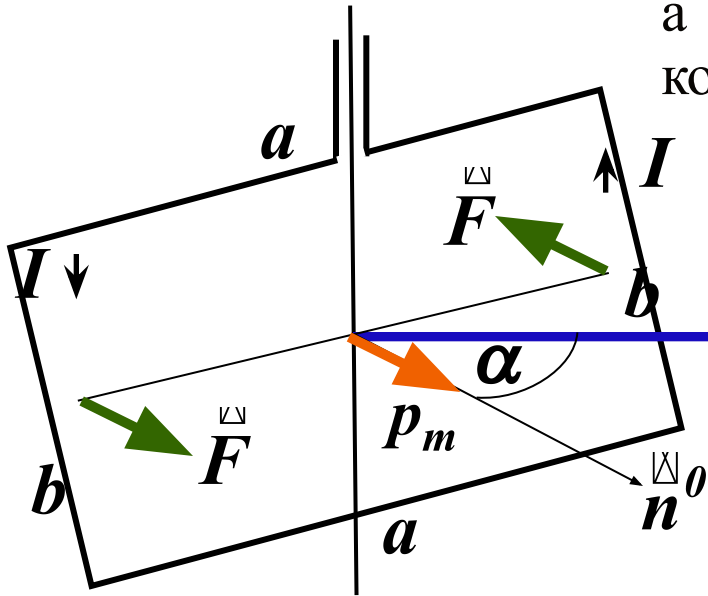
$$M = p_m B \sin \alpha$$

Магнитный момент \vec{p}_m контура с током по направлению совпадает с положительной нормалью контура

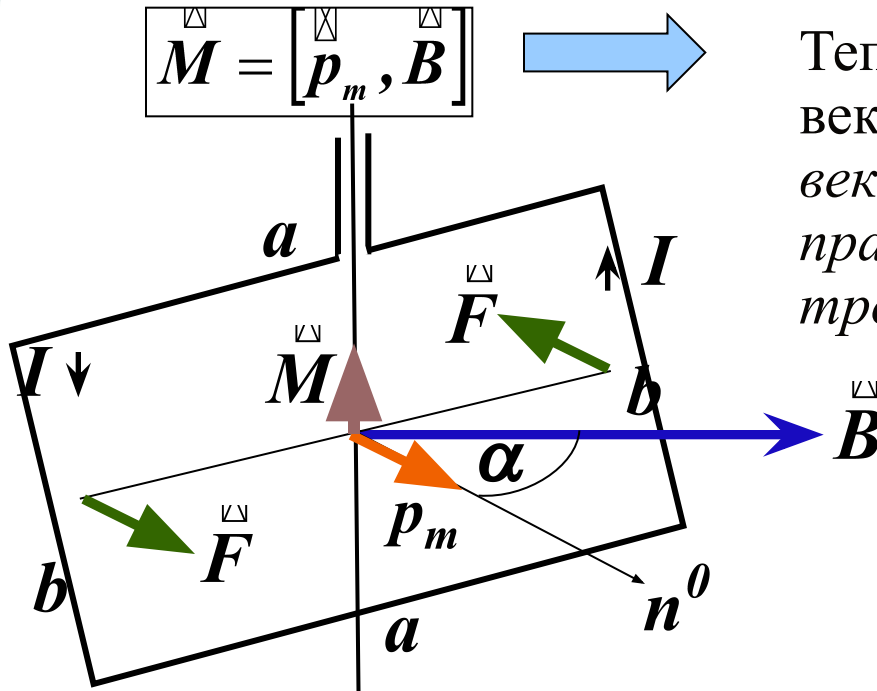
$$Iab \vec{n}_0 = \vec{p}_m$$

Выражение для вращающего момента в векторной форме:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$



КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



Теперь легко определить направление вектора \underline{M} , вспомнив правило: векторы \underline{p}_m , \underline{B} и \underline{M} образуют правовинтовую ортогональную тройку векторов.

Вращающий момент направлен по оси вращения контура, \perp плоскости, в которой размещаются векторы магнитного момента и магнитной индукции.

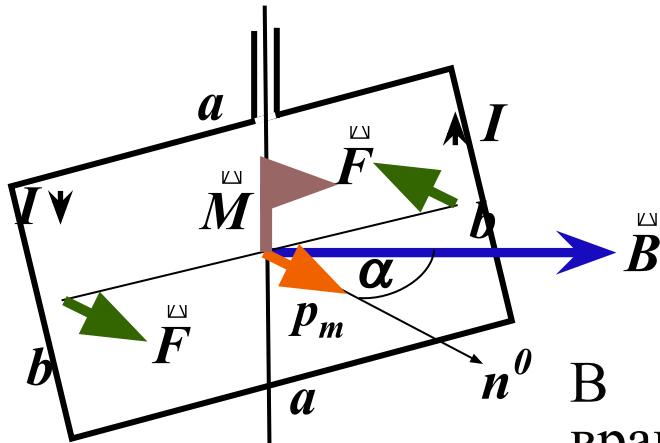
Вращающий момент, действующий в однородном магнитном поле на контур с током, стремится сориентировать его перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля.

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$



Эта формула применима к плоскому витку произвольной формы.



Кроме того, она может использоваться для расчета вращающего момента контура в неоднородном магнитном поле.

В неоднородном магнитном поле кроме вращающего момента, стремящегося повернуть рамку, будет действовать сила, вызывающая поступательное перемещение рамки с током.

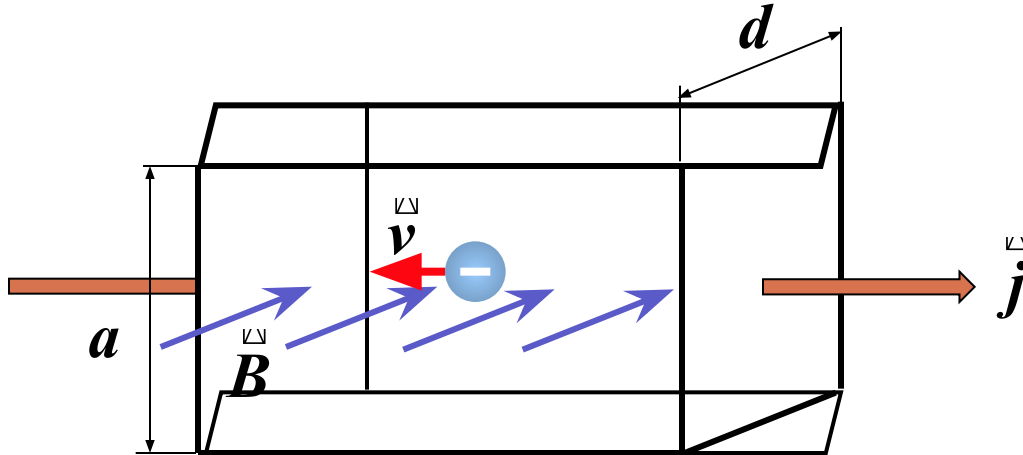
В зависимости от ориентации магнитного момента по отношению к направлению силовых линий магнитного поля контур будет выталкиваться в область более сильного либо более слабого поля.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

ИЗУЧИТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНО.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов. Это *эффект Холла*.



Поместим металлическую пластинку с плотностью тока \vec{j} в магнитное поле \vec{B} , перпендикулярное \vec{j} .

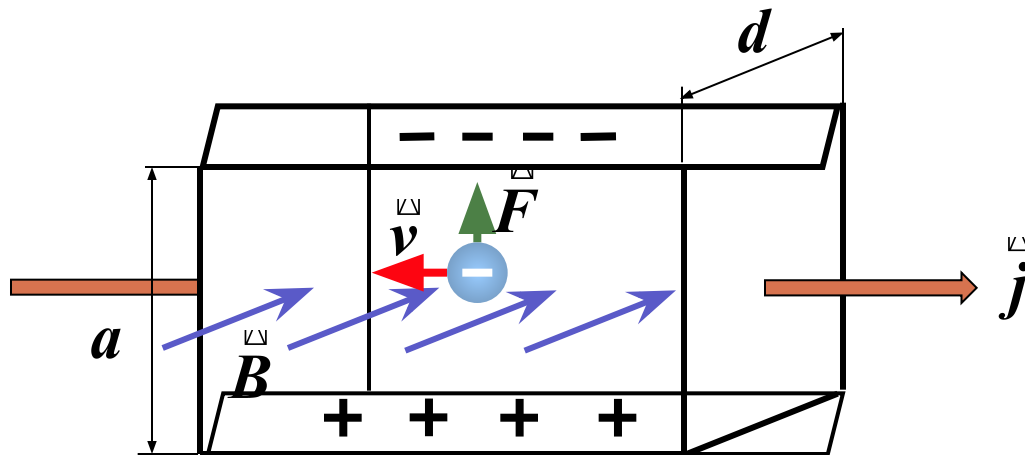
В металле носителями тока являются свободные электроны.

Их скорость \vec{v} направлена против вектора \vec{j} .

Электроны испытывают действие силы Лоренца.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Сила Лоренца направлена вверх (направление определяется векторным произведением $[\vec{v}, \vec{B}]$, с учетом того, что ток переносится электронами).

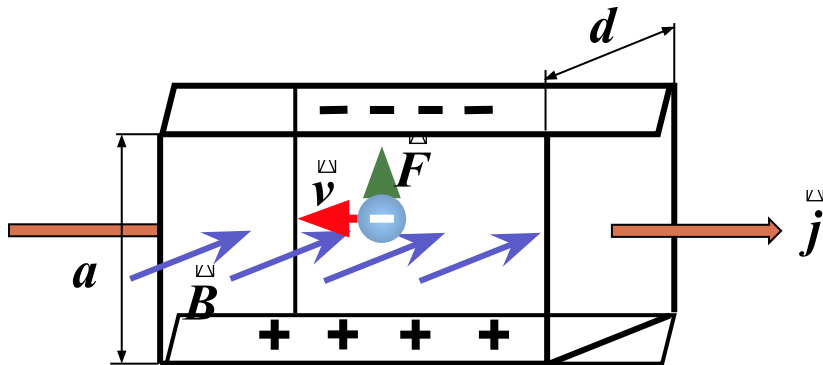


В результате действия силы Лоренца у электронов появится составляющая скорости, направленная вверх.

У верхней грани пластины образуется избыток отрицательных, у нижней — избыток положительных зарядов.

В результате возникает поперечное электрическое поле.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

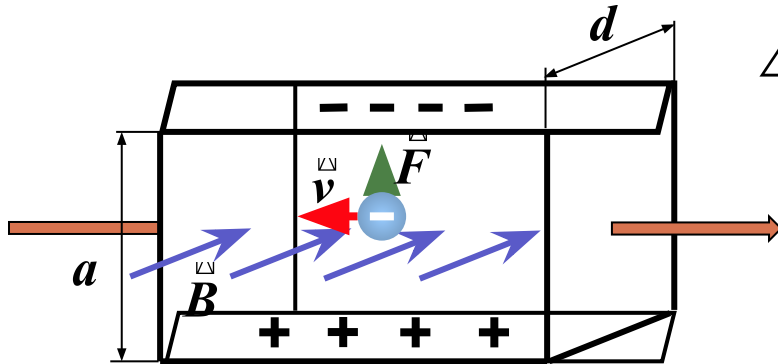


Стационарное распределение зарядов в поперечном направлении установится при таком значении напряженности электрического поля E , что его действие на заряды будет уравнивать силу Лоренца.

Возникшую при этом поперечную холловскую разность потенциалов $\Delta\varphi$ можно вычислить из условия установившегося стационарного распределения зарядов:

$$eE = e\Delta\varphi/a = evB, \text{ отсюда } \Delta\varphi = vBa, \quad a - \text{высота пластинки}$$

ЭФФЕКТ ХОЛЛА



$$\Delta\varphi = vBa$$

Учитывая, что сила тока в пластинке $I = jS = envS$ получим:

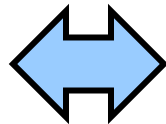
$$\Delta\varphi = \frac{I}{enS} Ba$$

$S = ad$ - площадь поперечного сечения пластинки.

Величина $1/en = R$ - постоянная Холла, зависящая от вещества.

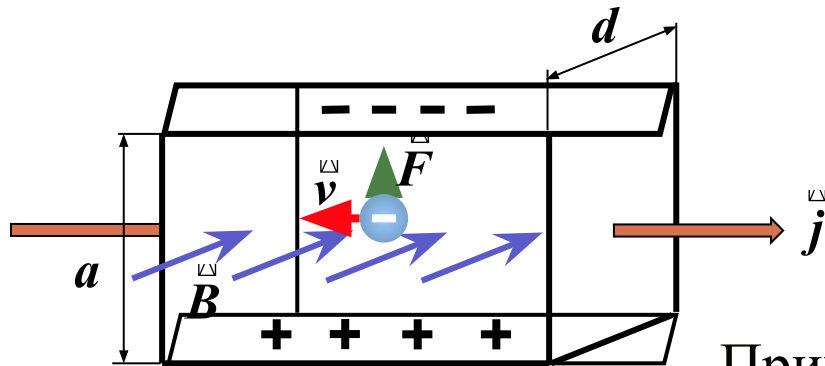
Окончательно получим:

$$\Delta\varphi = R \frac{IB}{d}$$



выражение для поперечной холловской разности потенциалов.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА



$$\Delta\varphi = R \frac{IB}{d}$$

$$1/en = R$$

Примеры использования эффекта Холла.

Знание постоянной Холла позволяет:

- а) найти концентрацию и подвижность носителей тока в веществе;
- б) судить о природе проводимости полупроводников (знак постоянной Холла совпадает со знаком заряда носителей тока).

Датчики Холла используются для измерения величины магнитного поля, применяются в измерительной технике для иных целей.

Самостоятельно: *движение заряженных частиц в постоянном магнитном поле.*