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 $d\vec{F}$, действующую на единичный элемент тока $d\vec{l}$ со стороны магнитного поля $\vec{B}$, созданного другим элементом тока $d\vec{l}$.

ЗАКОН АМПЕРА

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

$$\vec{F}_м = q\left[\vec{v},\ \vec{B}\right]$$

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 $n\,S\,dl$ носителей заряда (S - площадь поперечного сечения проводника в том месте, где располагается элемент тока).

На каждый из носителей тока будет действовать магнитная сила

$$\langle\vec{F}\rangle = e\left[\langle\vec{u}\rangle, \vec{B}\right]$$

На все носители в пределах dl -

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

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

ЗАКОН АМПЕРА

$$d\vec{F} = ne\left[\langle\vec{u}\rangle, \vec{B}\right]Sdl$$

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

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

$dV = Sdl$ - объем элемента провода.

Для тонкого проводника $\vec{j}dV = Id\vec{l}$. Следовательно:

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

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

ЗАКОН АМПЕРА

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

$\vec{j}dV$ - объемные элементы тока.

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

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: $dF = IB\,dl\,\sin\alpha$

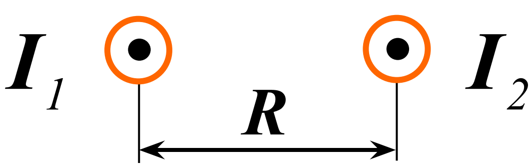
α - угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{B}$.

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов

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

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

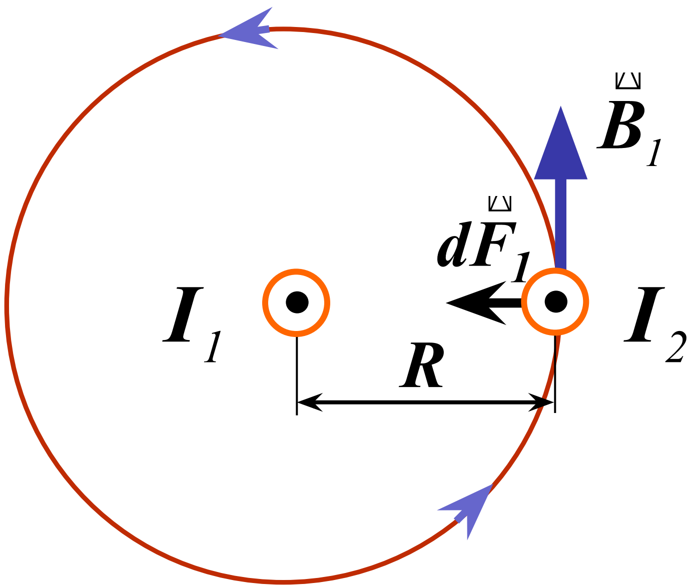


Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует в соответствии с законом Ампера на другой проводник с током.

Определим силу, с которой действует магнитное поле тока I_1 на элемент $d\vec{l}$ 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 - концентрические окружности.

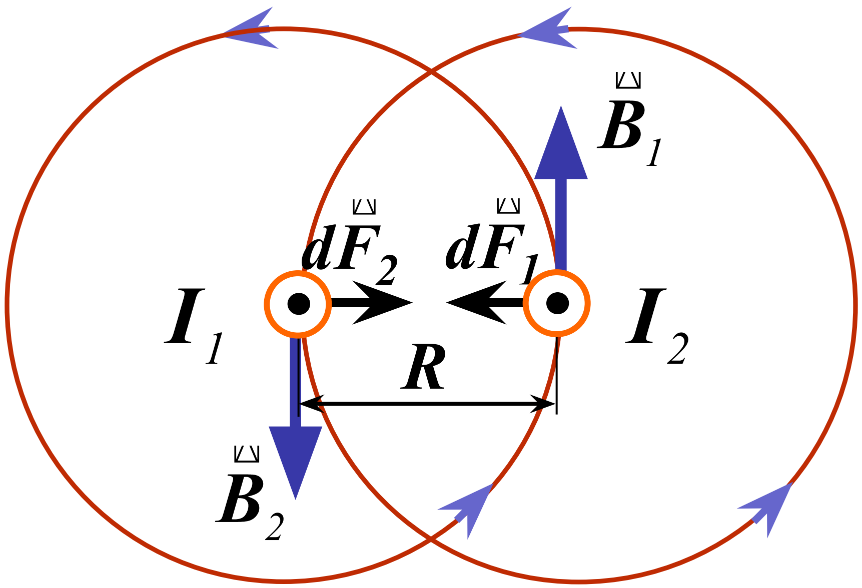
Направление линий магнитной индукции определяется правилом правого винта, модуль вектора $\vec{B}_1$ равен

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

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

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:

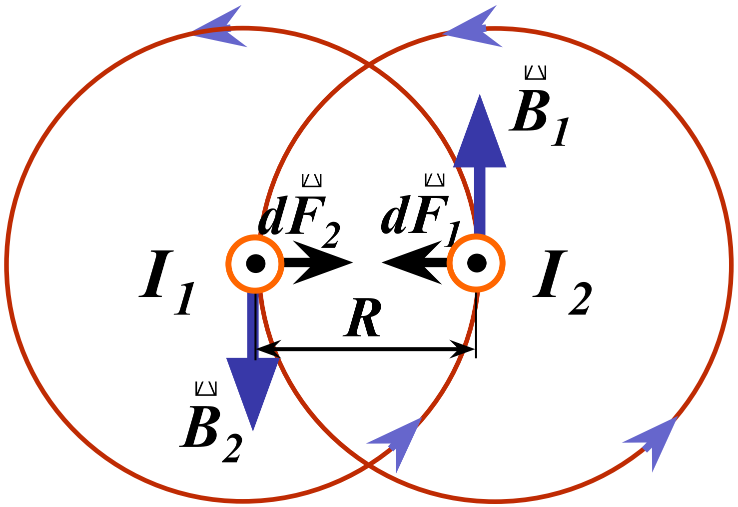
$$dF_1 = I_2 B_1 \, dl \sin\alpha$$

Поскольку угол α между элементом тока $d\vec{l}$ и вектором $\vec{B}_1$ прямой, модуль силы $d\vec{F}_1$ равен

$$dF_1 = I_2 B_1 \, dl$$

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



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

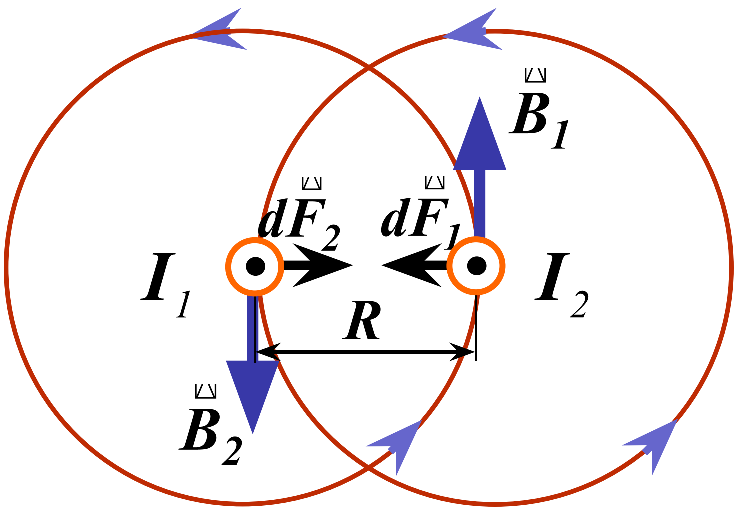
$$dF_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{R} dl$$

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

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

ЗАКОН АМПЕРА

Сила взаимодействия двух параллельных токов



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

Сила $d\vec{F}_2$ направлена в сторону, противоположную силе $d\vec{F}_1$

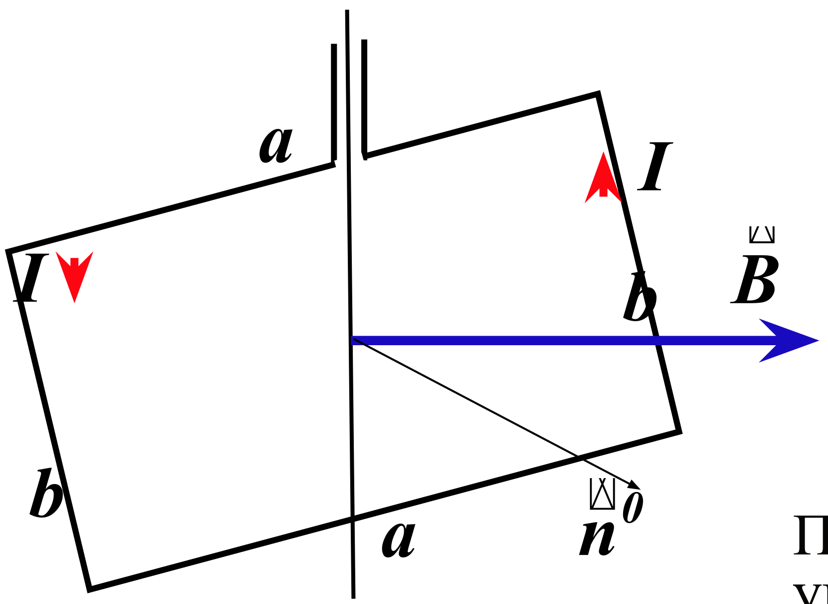
Эти силы равны по модулю: $dF_1 = dF_2$

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.

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

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

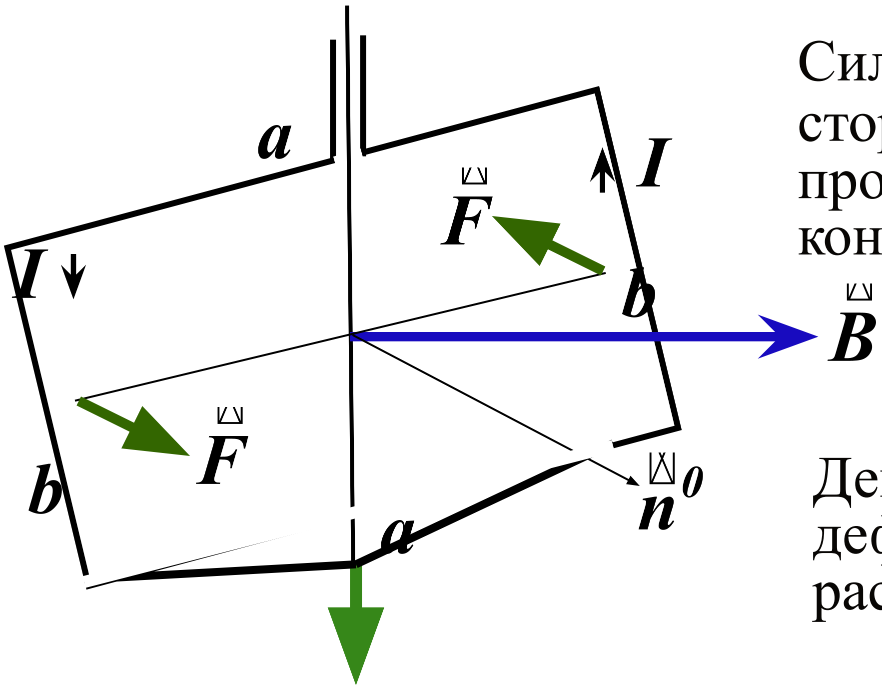


Рамка со сторонами ***a*** и ***b*** имеет возможность вращаться вокруг оси, проходящей через середины ее сторон длиной ***a***.

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.

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

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

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

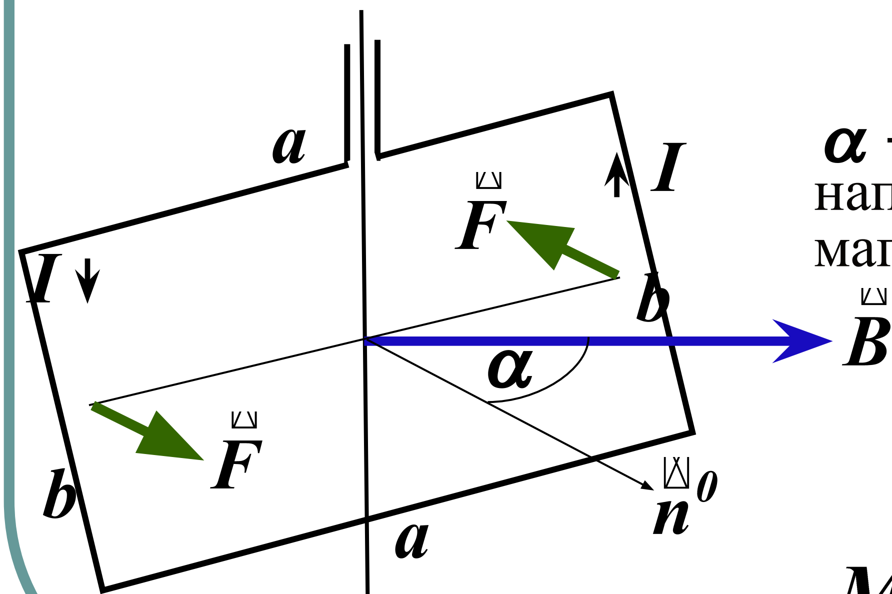
Численное значение сил Ампера:

$$F = IbB$$

Из рисунка видно, что силы, действующие на стороны b контура, создают вращающий момент $\vec{M}$, модуль которого равен

$$M = Fa\sin\alpha$$

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



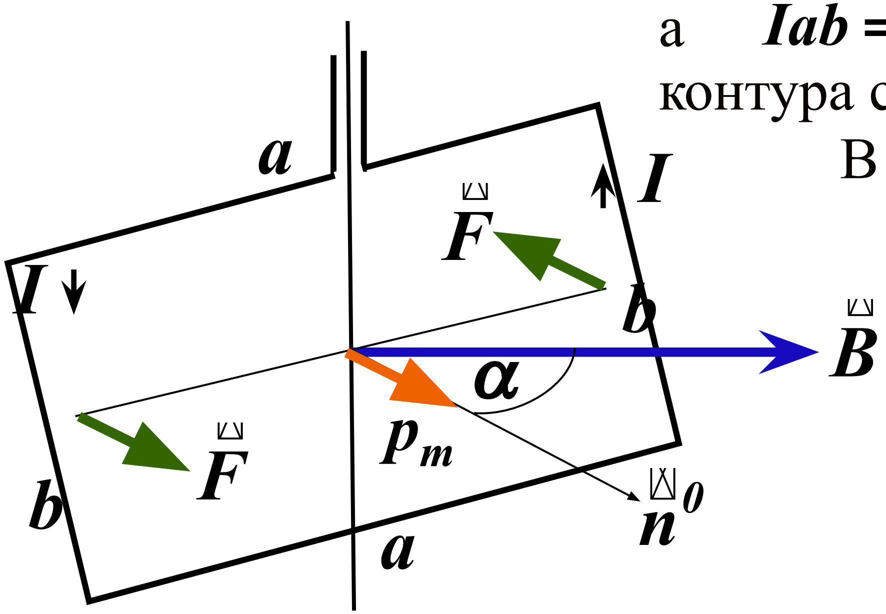
Подставив выражение для силы $F = IbB$, получим

$$M = IBab\sin\alpha$$

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

$$M = IBab\sin\alpha$$

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

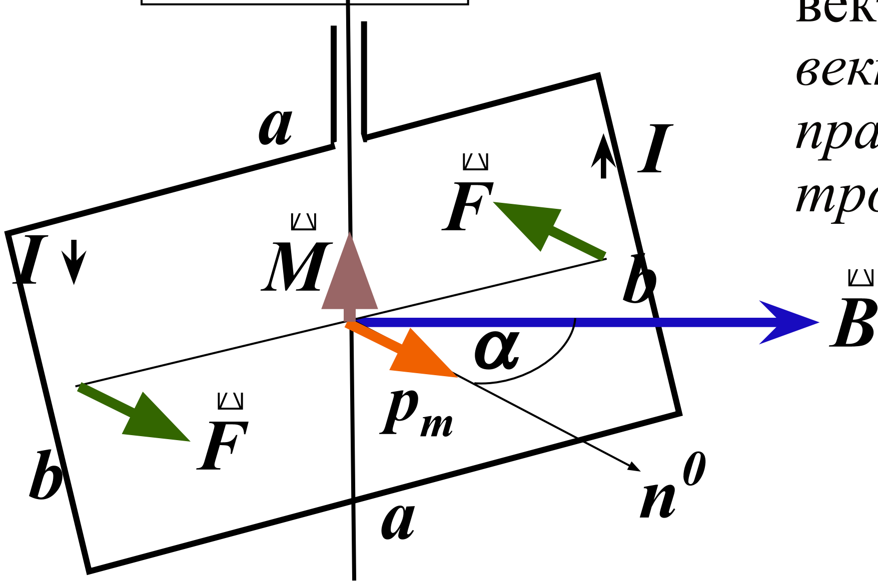
$$Iab\vec{n}^0 = \vec{p}_m$$

Выражение для вращающего момента в векторной форме:

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

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

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



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

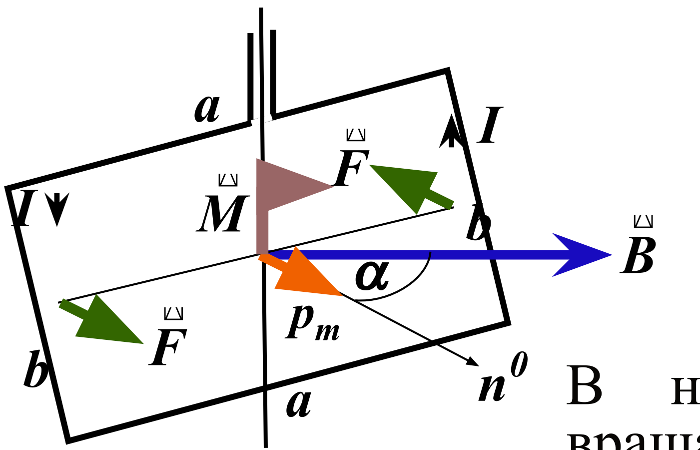
Вращающий момент направлен по оси вращения контура, $\perp$ плоскости, в которой размещаются векторы магнитного момента и магнитной индукции.

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

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

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.

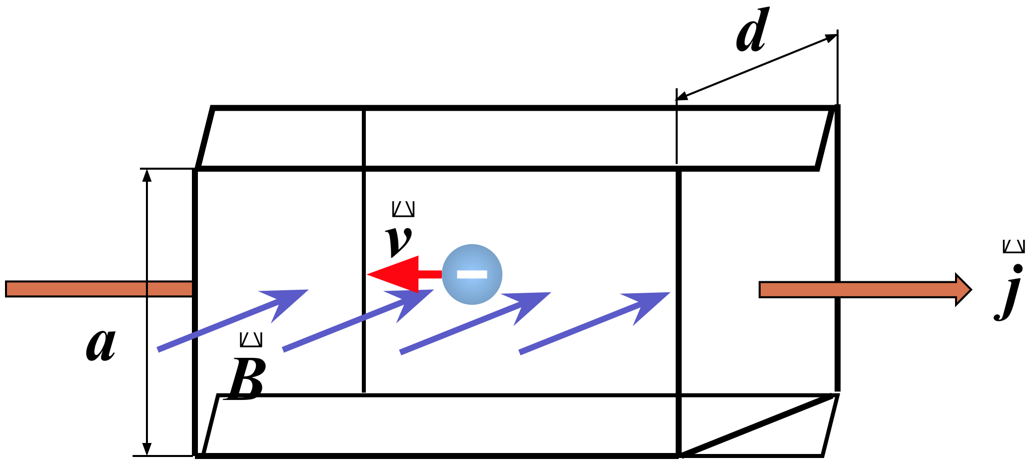
В зависимости от ориентации магнитного момента по отношению к направлению силовых линий магнитного поля контур будет выталкиваться в область более сильного либо более слабого поля.

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 $\vec{j}$.

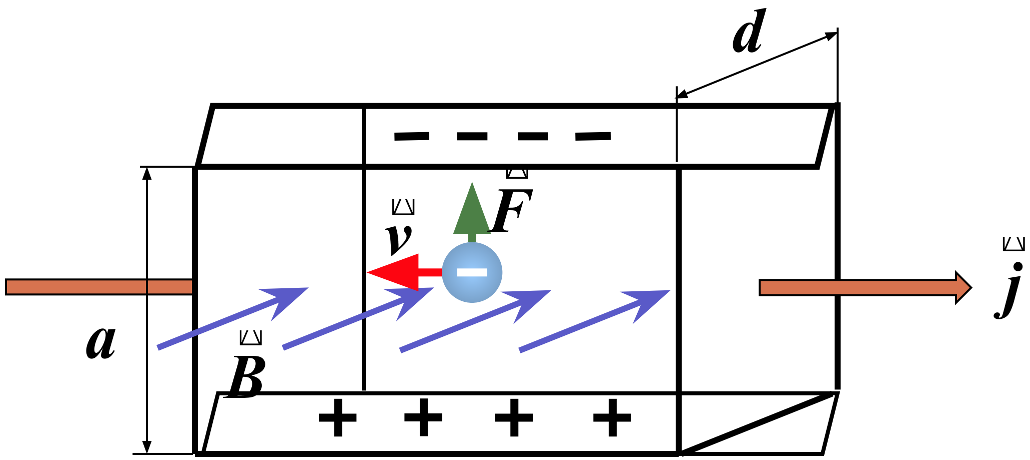
В металле носителями тока являются свободные электроны.

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).

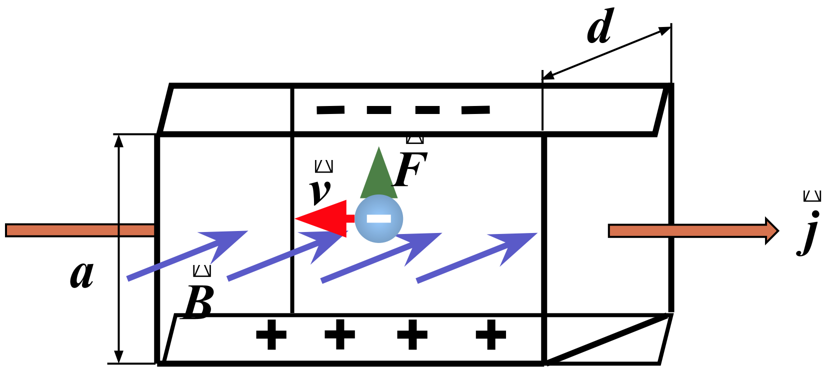


В результате действия силы Лоренца у электронов появится составляющая скорости, направленная вверх.

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

В результате возникает поперечное электрическое поле.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

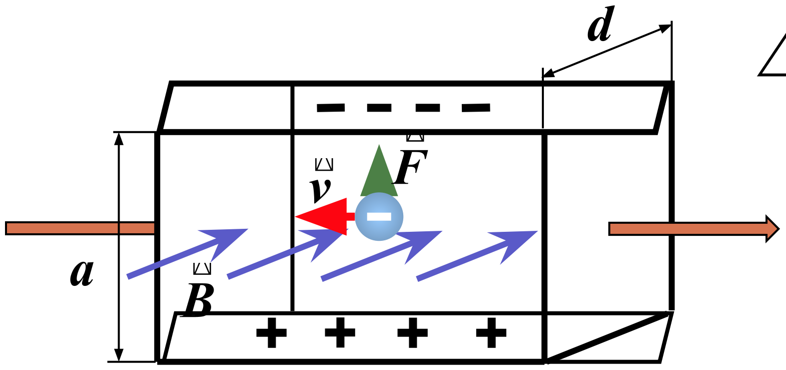


Стационарное распределение зарядов в поперечном направлении установится при таком значении напряженности электрического поля $\vec{E}$, что его действие на заряды будет уравновешивать силу Лоренца.

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

$eE = e\Delta\varphi / a = evB$, отсюда $\Delta\varphi = vBa$, a - 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.

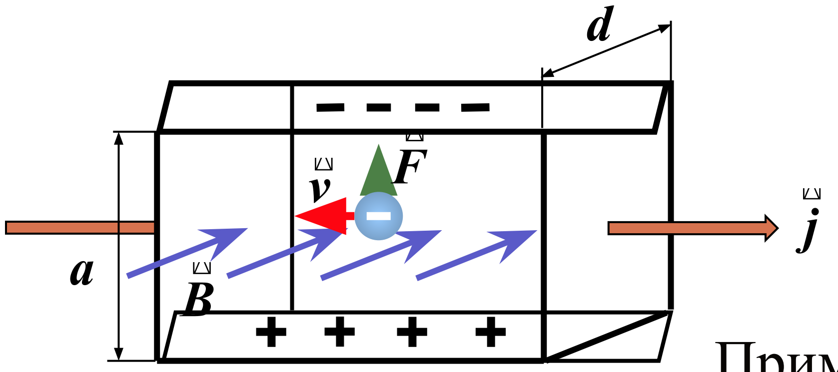
Величина $1/en = R$ - постоянная Холла, зависящая от вещества.

Окончательно получим:

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

⇔ выражение для поперечной холловской разности потенциалов.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА



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

$$1/en = R$$

<u>Примеры использования эффекта Холла.</u>

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.***