

Магнитное взаимодействие токов

Магнитные явления были известны еще в древнем мире. Компас был изобретен более 4500 лет тому назад. В Европе он появился приблизительно в XII веке новой эры. Однако только в XIX веке была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом и возникло представление о **магнитном поле**.

Первыми экспериментами (проведены в 1820 г.), показавшими, что между электрическими и магнитными явлениями имеется глубокая связь, были опыты датского физика **Х. Эрстеда**. Эти опыты показали, что на магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся ее повернуть. В том же году французский физик **А. Ампер** наблюдал силовое взаимодействие двух проводников с токами и установил закон взаимодействия токов.

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля.

Источниками магнитного поля являются **движущиеся электрические заряды (токи)**. Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается электрическими микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества (гипотеза Ампера).

Ученые XIX века пытались создать теорию магнитного поля по аналогии с электростатикой, вводя в рассмотрение так называемые **магнитные заряды** двух знаков (например, северный *N* и южный *S* полюса магнитной стрелки). Однако опыт показывает, что изолированных магнитных зарядов не существует.

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля. Магнитное поле, в отличие от электрического, оказывает силовое действие **только** на движущиеся заряды (токи).

Для описания магнитного поля необходимо ввести силовую характеристику поля,

$$\vec{E}$$

аналогичную вектору **напряженности** электрического поля. Такой характеристикой

$$\vec{B},$$

является **вектор магнитной индукции** который определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле.

$$\vec{B}$$

За положительное **направление вектора** принимается направление от южного полюса *S* к северному полюсу *N* магнитной стрелки, свободно ориентирующийся в магнитном поле. Таким образом, исследуя магнитное поле, создаваемое током или постоянным магнитом, с помощью маленькой магнитной стрелки, можно в каждой точке пространства

$$\vec{B}.$$

определить направление вектора. Такое исследование позволяет наглядно представить пространственную структуру магнитного поля. Аналогично **силовым линиям** в электростатике можно построить **линии магнитной индукции**, в каждой точке которых

$$\vec{B}$$

вектор $\vec{B}$ направлен по касательной. Пример линий магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током приведен на рис.1.

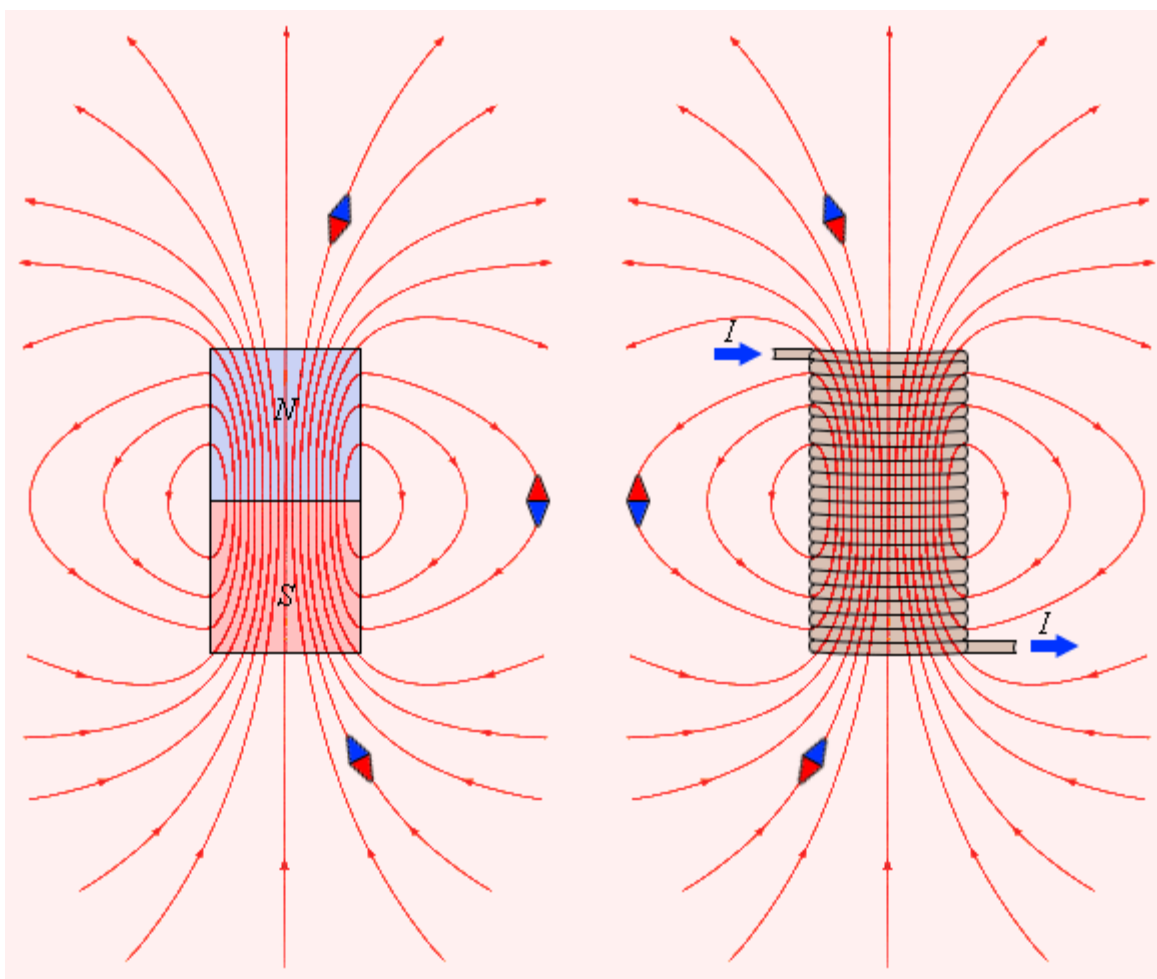


Рисунок 1.

Линии магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током. Индикаторные магнитные стрелки ориентируются по направлению касательных к линиям индукции

Обратите внимание на аналогию магнитных полей постоянного магнита и катушки с током. Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются **вихревыми**. Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Для того, чтобы количественно описать магнитное поле, нужно указать способ

$\vec{B}$,

определения не только направления вектора $\vec{B}$ но и его модуля. Проще всего это сделать, внося в исследуемое магнитное поле проводник с током и измеряя силу, действующую на отдельный прямолинейный участок этого проводника. Этот участок проводника должен иметь длину Δl , достаточно малую по сравнению с размерами областей неоднородности магнитного поля. Как показали опыты Ампера, сила, действующая на участок проводника, пропорциональна силе тока I , длине Δl этого участка и синусу угла α между направлениями тока и вектора магнитной индукции:

$$F \sim I \Delta l \sin \alpha.$$

Эта сила называется **силой Ампера**. Она достигает максимального по модулю значения $F_{\max}$, когда проводник с током I ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции $\vec{B}$.

Модуль вектора $\vec{B}$ определяется следующим образом:

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока I в проводнике и его длине Δl :

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}.$$

В общем случае сила Ампера выражается соотношением:

$$F = IB \Delta l \sin \alpha.$$

Это соотношение принято называть **законом Ампера**.

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется **тесла** (Тл).

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Тесла – очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5 Тл.

Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции $\vec{B}$ и направлению тока, текущего по проводнику. Для определения направления силы Ампера обычно используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции $\vec{B}$ входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис.2).

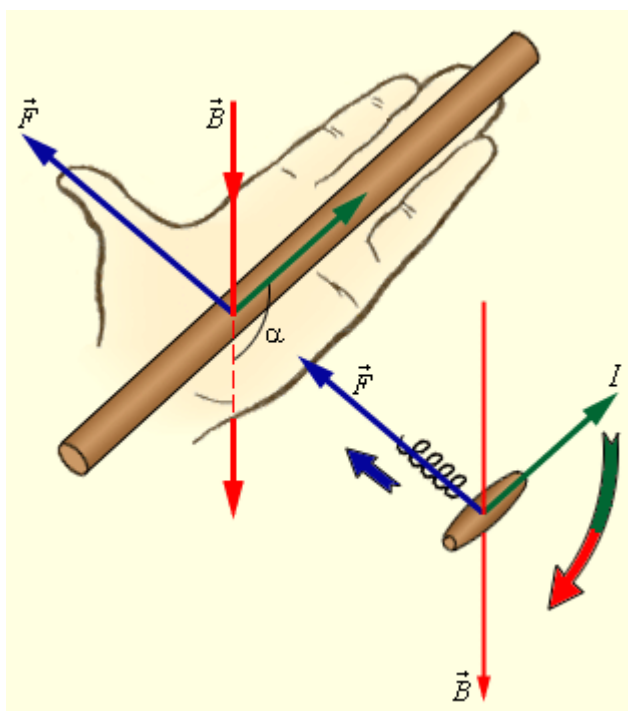


Рисунок 2.
Правило левой руки и правило буравчика

Если угол α между направлениями вектора $\vec{B}$ и тока в проводнике отличен от 90° , то для определения направления силы Ампера более удобно пользоваться **правилом буравчика**: воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор $\vec{B}$ и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора $\vec{B}$. Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера (рис. 2). Правило буравчика часто называют **правилом правого винта**.

Одним из важных примеров магнитного взаимодействия является взаимодействие параллельных токов. Закономерности этого явления были экспериментально установлены **Ампером**. Если по двум параллельным проводникам электрические токи текут в одну и ту же сторону, то наблюдается взаимное притяжение проводников. В случае, когда токи текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются.

Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями: магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.

Опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной Δl каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока I_1 и I_2 в проводниках, длине отрезка Δl и обратно пропорционален расстоянию R между ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}.$$

В Международной системе единиц СИ коэффициент пропорциональности k принято записывать в виде:

$$k = \mu_0 / 2\pi,$$

где μ_0 – постоянная величина, которую называют **магнитной постоянной**. Введение магнитной постоянной в СИ упрощает запись ряда формул. Ее численное значение равно

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2.$$

Формула, выражающая закон магнитного взаимодействия параллельных токов, принимает вид:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta l}{2\pi R}.$$

Отсюда нетрудно получить выражение для индукции магнитного поля каждого из прямолинейных проводников. Магнитное поле прямолинейного проводника с током должно обладать осевой симметрией и, следовательно, замкнутые линии магнитной индукции могут быть только концентрическими окружностями, располагающимися в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Это означает, что

$$\vec{B}_1 \quad \vec{B}_2$$

векторы и магнитной индукции параллельных токов I_1 и I_2 лежат в плоскости, перпендикулярной обоим токам. Поэтому при вычислении сил Ампера, действующих на проводники с током, в законе Ампера нужно положить $\sin \alpha = 1$. Из закона магнитного взаимодействия параллельных токов следует, что модуль индукции B магнитного поля прямолинейного проводника с током I на расстоянии R от него выражается соотношением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Для того, чтобы при магнитном взаимодействии параллельные токи притягивались, а антипараллельные отталкивались, линии магнитной индукции поля прямолинейного проводника должны быть направлены по часовой стрелке, если смотреть вдоль

$$\vec{B}$$

проводника по направлению тока. Для определения направления вектора магнитного поля прямолинейного проводника также можно пользоваться правилом буравчика:

$$\vec{B},$$

направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением вектора если при вращении буравчик перемещается в направлении тока (рис.3).

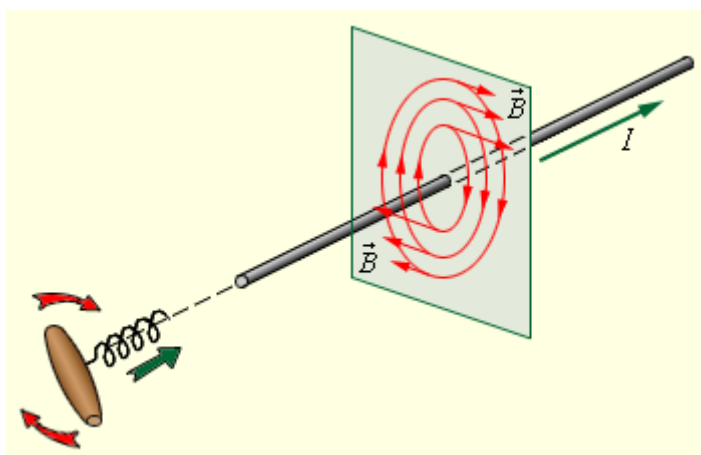


Рисунок 3.
Магнитное поле прямолинейного проводника с током

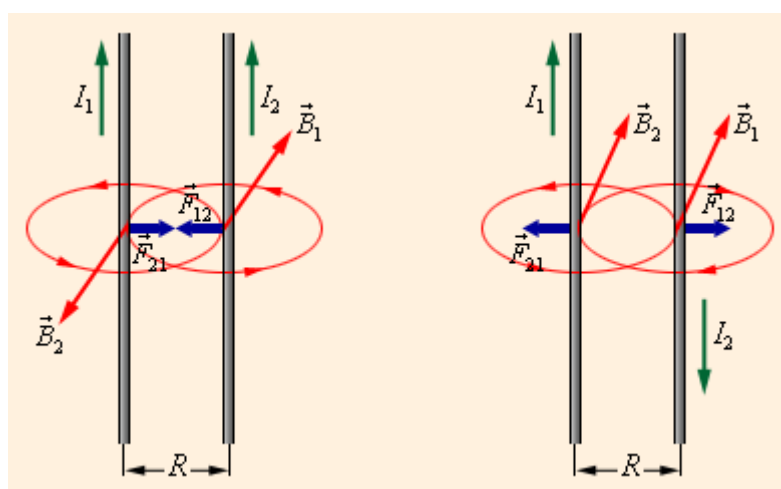


Рисунок 4.
Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов

Рис. 4 поясняет закон взаимодействия параллельных токов.

Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц (СИ) для определения единицы силы тока – ампера:

Ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.