

Электромагнетизм

Взаимодействие токов. Магнитное поле.

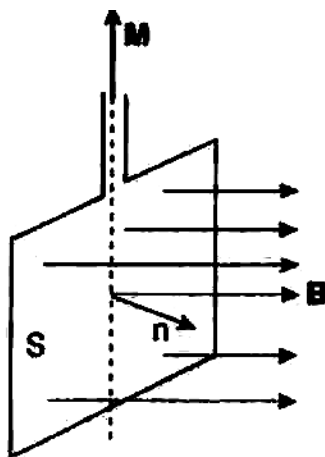
Еще в глубокой древности была известна руда, обладающая свойством притягивать железо. Такая руда представляет собой химическое соединение железа с кислородом и является природным магнитом.

В технике применяются не природные, а искусственные постоянные магниты. Искусственным магнитом называется намагниченный кусок специального сплава или керамического материала. Постоянные магниты могут иметь различную форму: прямоугольную, подковообразную, кольцеобразную и т. д.

Каждый постоянный магнит имеет два полюса - северный и южный. С помощью компаса легко убедиться в том, что магнитная стрелка, вращающаяся на острие, устанавливается всегда так, что один ее полюс направлен на север, а другой - на юг. Полюс, направленный на север, обозначается буквой N, а полюс, направленный на юг, - буквой S. Магниты взаимодействуют между собой - одноименные полюсы магнитов взаимно отталкиваются, а разноименные - притягиваются.

В 1820г. А. Ампер (1775-1836) установил, что если токи в двух прямолинейных параллельных проводниках имеют одинаковые направления, то они притягивают друг друга, если же направления токов противоположны, то проводники отталкивают друг друга. Взаимодействие токов осуществляется посредством поля, которое было названо магнитным. Электрический ток создает в окружающем пространстве магнитное поле. В отличие от электростатического поля, которое создается неподвижными электрическими зарядами, магнитное поле появляется лишь при движении зарядов. Название поля связано с тем, что, как обнаружил в 1820г. Х. Эрстед (1777-1851), поле, возбуждаемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку.

Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} величина которого определяет силу, действующую в данной точке поля на движущийся заряд, или момент сил, действующий на замкнутый контур (рамку) с током.



Если в магнитное поле с индукцией B внести рамку с током, то величина вращательного момента сил, действующего на рамку,

$$M = ISB \sin a,$$

где a - угол между вектором нормали к рамке n и B ; S - площадь рамки. Когда $a=90^\circ$, $\sin a=1$ и момент сил принимает максимальное значение

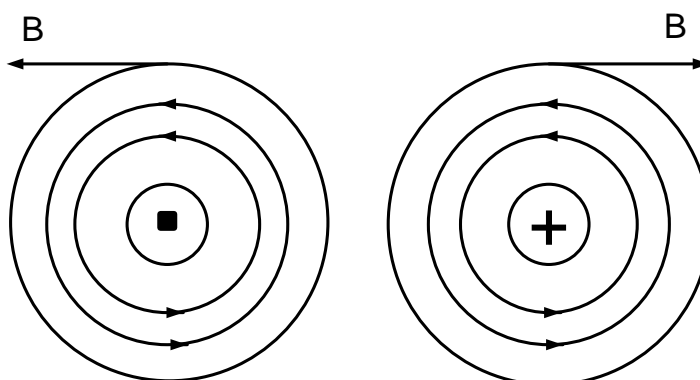
$$M_{\max} = ISB, \quad \text{откуда}$$

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

Таким образом, магнитная индукция - это величина, численно равная единичному максимальному вращательному моменту, действующему на рамку, имеющую единичную площадь, если в рамке течет единичный ток.

Магнитная индукция измеряется в тесла (Тл). 1 Тл - индукция такого магнитного поля, в котором на рамку площадью 1 м² при силе тока в 1 А действует максимальный вращательный момент сил 1 Н • м.

Магнитное поле изображают линиями магнитной индукции аналогично линиям напряженности электростатического поля. Это такие линии, касательные к которым направлены так же, как вектор B в данной точке поля. Принято считать, что магнитные силовые линии направлены от северного полюса к южному. Направление магнитных силовых линий создаваемых током, а следовательно, и направление вектора B определяют с помощью правила буравчика, которое формулируется следующим образом: *если поступательное движение правого буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции совпадает с направлением вращательного движения его рукоятки*. Например, линии индукции поля прямого тока представляют систему охватывающих проводник концентрических окружностей.



Важнейшей особенностью линий магнитной индукции является их замкнутость, а это отражает тот факт, что в природе нет магнитных зарядов, на которых начинались бы или заканчивались линии магнитной индукции, т.е. в противоположность электростатическому полю магнитное поле не имеет источников.

На проводник с током в магнитном поле действует сила. Ампер установил, что на прямолинейный проводник длиной l , по которому течет ток с силой I , в магнитном поле с индукцией B действует сила

$$F = IlB \sin \alpha$$

где α - угол между направлением тока и вектором магнитной индукции B , F - сила Ампера. Уравнение называют законом Ампера. Направление силы F определяется с помощью правила левой руки: *если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии вектора магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то большой палец, отогнутый на 90°, укажет направление силы Ампера*.

Согласно закону Ампера, на проводник с током в магнитном поле действует сила. Так как ток представляет упорядоченное движение зарядов, то, и на всякий движущийся заряд в магнитном поле действует сила. Ее называют *силой Лоренца*.

Если концентрация зарядов в проводнике - n_0 , а средняя скорость их упорядоченного движения - v , то сила тока

$$I = qn_0 vS$$

где q - заряд, S - площадь поперечного сечения проводника. Если проводником является металл, то $q = e$, где e - заряд электрона. Подставляя, получим

$$F = Bn_0evSl\sin a = Bn_0evV\sin a$$

где $V=Sl$ – объем проводника, $n_0V=N$ – число зарядов (электронов) в объеме V . Таким образом,

$$F=BevN\sin a$$

Разделив обе части формулы на N , получим силу, действующую на один электрон:

$$f=Bev\sin a$$

Это и есть сила Лоренса. В формуле a – угол между векторами v и B . Вектор f перпендикулярен и вектору v , и вектору B . Направление силы f можно определить, используя правило левой руки.

Из формулы видно, что магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях:

- 1) когда частица неподвижна ($v=0$);
- 2) когда частица движется вдоль линий индукции магнитного поля ($\sin a=0$, $a=0$, $v\parallel B$).

Магнитные свойства веществ

Опыт показывает, что все вещества в магнитном поле намагничиваются, изменяя тем самым первоначальное внешнее поле. Их называют магнетиками. При этом одни вещества ослабляют внешнее поле, их называют диамагнетиками, а другие усиливают его. Их называют парамагнетиками. Подавляющее большинство веществ - диамагнетики (например, фосфор, сера, углерод, золото, серебро, медь, свинец и др.). Парамагнетиками являются кислород, азот, алюминий, платина и др. Причина диа- и парамагнетизма состоит в следующем.

В атомах любого вещества имеются круговые, или орбитальные, токи, образованные движением электронов вокруг ядер (эта идея была впервые высказана Ампером и получила название гипотезы Ампера). Орбитальному току соответствует определенный магнитный момент, который называется орбитальным магнитным моментом:

$$P_m=I_eS$$

где I_e - сила орбитального (электронного) тока, S - площадь орбиты электрона. Помимо этого, электроны обладают собственным, или спиновым, магнитным моментом. Первоначально предполагалось, что спиновый магнитный момент обусловлен вращением электрона вокруг своей оси. В дальнейшем выяснилось, что спиновый магнитный момент является таким же неотъемлемым свойством электрона, как его масса и заряд. Собственным магнитным моментом обладает и ядро атома.

Геометрическая сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов и собственного магнитного момента ядра образует магнитный момент атома. У диамагнетиков магнитный момент атома равен нулю, так как орбитальные, спиновые и ядерные моменты скомпенсированы. Под воздействием внешнего магнитного поля у атомов диамагнетика появляется магнитный момент, направленный против внешнего поля. Диамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, направленное против внешнего поля и ослабляющее его. При исчезновении внешнего поля магнитные моменты атомов исчезают и диамагнетик размагничивается.

В парамагнетиках атомы всегда обладают магнитным моментом. Однако эти магнитные моменты направлены беспорядочно и парамагнетик в целом не намагничен. Внешнее поле ориентирует магнитные моменты преимущественно в направлении поля. Парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. При исчезновении внешнего поля парамагнетик размагничивается.

Если в вакууме существует магнитное поле с индукцией B , то при заполнении некоторой средой результирующее поле либо ослабляется, либо усиливается.

Величина, показывающая, во сколько раз индукция результирующего поля в магнетике B , больше или меньше индукции внешнего магнитного поля, называется относительной магнитной проницаемостью магнетика:

$$\mu = \frac{B'}{B}$$

Относительная магнитная проницаемость μ - безразмерная величина. Она характеризует магнитные свойства магнетика (среды), его способность намагничиваться под действием внешнего поля. Для вакуума - $\mu = 1$, у диамагнетиков - $\mu < 1$, у парамагнетиков - $\mu \geq 1$. Магнитная проницаемость у диамагнетиков и парамагнетиков мало отличается от единицы. Например, у одного из самых сильных диамагнетиков - висмута - $\mu = 0,999824$, у наиболее сильных парамагнетиков - жидкого кислорода и платины - соответственно $\mu = 1,0034$ и $\mu = 1,00036$.

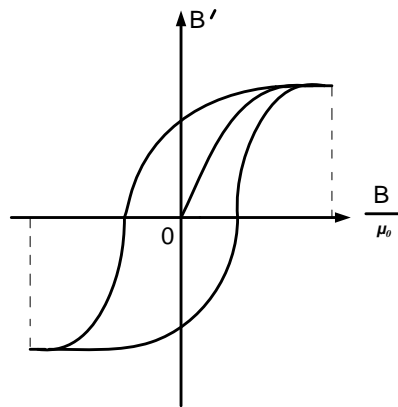
Среди парамагнетиков резко выделяется группа веществ, вызывающих большое усиление внешнего поля. Их называют ферромагнетиками. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт и их соединения. У ферромагнетиков магнитный момент отличен от нуля в отсутствие внешнего магнитного поля не только у отдельных атомов, но и у целых областей магнетика размерами порядка 10^{-2} - 10^3 см. Это явление называется ферромагнетизмом.

Области самопроизвольного намагничивания ферромагнетика называются доменами. Магнитные моменты всех доменов по всему объему ферромагнетика ориентированы беспорядочно, поэтому результирующий магнитный момент всего ферромагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных доменов получают преимущественную ориентацию в направлении поля. Чем больше индукция внешнего поля B , тем сильнее эта ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик.

При некоторой достаточной величине внешнего поля все магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль поля, т.е. наступает состояние *насыщения*. При этом собственное магнитное поле ферромагнетика превосходит во много раз внешнее поле, поэтому результирующее магнитное поле в ферромагнетике значительно больше внешнего. Если ферромагнетик вынести из внешнего поля, то размагничивания не произойдет, хотя результирующее по мере ослабления внешнего поля будет уменьшаться. Когда индукция внешнего магнитного поля станет равной нулю, индукция магнитного поля ферромагнетика будет больше нуля.

Величина индукции магнитного поля ферромагнетика, оставшегося после снятия внешнего магнитного поля, называется остаточной намагниченностью $B_{ост}$. Чтобы ферромагнетик полностью размагнитить, нужно изменить направление внешнего поля на противоположное и постепенно увеличивать его. При некоторой величине этого поля ферромагнетик окажется полностью размагниченным. Величина такого поля называется коэрцитивной силой ферромагнетика B_k . Если дальше увеличивать индукцию магнитного поля, направленного противоположно первоначальному, то вновь будет достигнуто состояние насыщения.

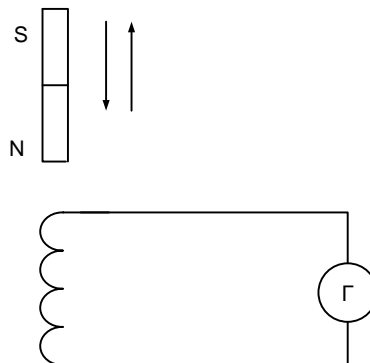
Если теперь уменьшить внешнее поле до нуля, а затем, изменив еще раз его направление, т.е. сделав его прежним, вновь его увеличить, то на графике $B' = f(B/\mu_0)$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная, получим замкнутую кривую, которая называется *петлей гистерезиса*.



Величина коэрцитивной силы B_k/μ_0 зависит от свойств ферромагнетика. Бывают ферромагнетики с малой коэрцитивной силой. Их называют мягкими. Они имеют узкую петлю гистерезиса и применяются для изготовления сердечников трансформаторов, в статорах и роторах электродвигателей и генераторов тока. Ферромагнетики с большой коэрцитивной силой имеют широкую петлю гистерезиса. Их называют жесткими. В отличие от мягких жесткие ферромагнетики перемагничиваются с трудом. При определенной для каждого ферромагнетика температуре, называемой точкой Кюри, они теряют свои магнитные свойства. Например, у железа точка Кюри - 770°C , а у никеля - 360°C . При температуре выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик.

Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца

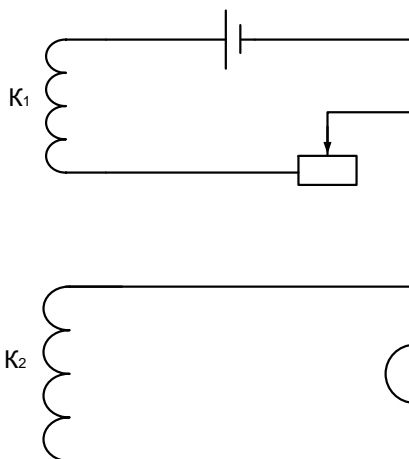
Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г. Опыты Фарадея показали, что во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении числа линий магнитной индукции, проходящих через него, возникает электрический ток. Этот ток был назван индукционным током. Например, в момент сдвигания магнита и в момент его выдвижения из катушки наблюдается отклонение стрелки гальванометра.



Отклонения стрелки при сдвигании и выдвижении магнита противоположны. Отклонения тем больше, чем быстрее движется магнит. Если вдвигать и выдвигать в катушку магнит другим полюсом, то отклонения стрелки будут противоположны первоначальным.

В другом опыте одна из катушек K_1 находится внутри другой катушки K_2 .

В момент включения или выключения тока через катушку K_1 или его изменения, или при перемещении катушек друг относительно друга наблюдаются отклонения стрелки гальванометра.



Полное число линий магнитной индукции через площадь контура представляет *магнитный поток*. Таким образом, *причиной возникновения индукционного тока является изменение магнитного потока через контур*. Если контур расположен в однородном магнитном поле, индукция которого B , то магнитный поток через контур, площадь которого S ,

$$\Phi = B S \cos \alpha$$

где α - угол между вектором B и нормалью n к поверхности контура.

Магнитный поток - скалярная величина. Если линии вектора B выходят из площадки, то магнитный поток считается положительным. Если же они входят в площадку, то отрицательным.

В системе СИ единицей магнитного потока является *вебер* (Вб). 1 Вб - это магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем индукцией 1 Тл сквозь площадку 1 м², перпендикулярную линиям индукции: 1 Вб = 1 Тл·м².

Возникновение индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока Φ в контуре возникает ЭДС индукции. Она определяется скоростью изменения магнитного потока, т.е.

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Формула выражает закон электромагнитной индукции, или закон Фарадея. Знак минус есть математическое выражение правила Ленца, которое гласит, что индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Иначе говоря, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающего ЭДС индукции.

Самоиндукция. Индуктивность.

Если в контуре течет переменный ток, то в этом контуре возникает ЭДС индукции, так как ток создает через контур переменный магнитный поток, величина которого изменяется в соответствии с изменениями тока. Возникающая ЭДС создает дополнительный ток в контуре. Это явление называется самоиндукцией, а дополнительные токи - экстратоками самоиндукции. Индукция магнитного поля пропорциональна току, следовательно, величина магнитного потока через контур также пропорциональна току:

$$\Phi = LI,$$

где L - коэффициент самоиндукции или индуктивность контура, зависящая от формы и размеров, а также от свойств окружающей среды. Применяя к явлению самоиндукции закон электромагнитной индукции Фарадея, получим:

$$e = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в контуре при изменении тока в нем, прямо пропорциональна скорости изменения этого тока.

Индуктивность контура численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в нем при изменении тока на единицу за единицу времени.

Индуктивность является аналогом массы, так как чем больше индуктивность, тем труднее изменить силу тока в контуре.

В системе СИ индуктивность измеряется в генри (Гн). 1 Гн - это индуктивность такого контура, в котором возникает ЭДС самоиндукции 1 В при изменении тока в нем на 1 А за 1 с.

В качестве примера вычислим индуктивность катушки (соленоида). Пусть число витков соленоида - N , площадь поперечного сечения витка - S , длина соленоида - l , а полость соленоида заполнена средой с относительной магнитной проницаемостью μ . При протекании по обмотке соленоида тока I внутри соленоида возникает однородное поле, индукция которого

$$B = \mu\mu_0 nI$$

где $n = N/l$ - число витков на единицу длины катушки. Магнитный поток через каждый из витков равен BS , а через все витки

$$\Phi = NBS = n l B S.$$

Подставляя значение B , получим:

$$\Phi = \mu\mu_0 n^2 l S I.$$

Сравнивая, имеем

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S = \mu\mu_0 n^2 V$$

где $V = lS$ - объем соленоида, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.