

Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца

Как Вы уже знаете, силовые свойства магнитного поля характеризует вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции создают наглядную картину поля, причем их «густота» позволяет судить о модуле вектора \vec{B} в данной точке пространства. Для вычисления работы магнитных сил необходимо знать не только индукцию магнитного поля, но и характеристики контура с током: его размеры и ориентацию по отношению к вектору \vec{B} . Для этой цели вводится понятие магнитного потока через контур.

Магнитный поток — скалярная физическая величина, характеризующая число линий магнитной индукции поля, пронизывающих замкнутый контур. Магнитный поток Φ однородного поля через плоскую поверхность равен произведению модуля магнитной индукции на площадь поверхности S и на косинус угла α между вектором B и нормалью n к поверхности:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad [\Phi] = 1 \text{ Вб (вебер)}$$

Магнитный поток в 1 Вб создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через плоскую поверхность площадью 1 м^2 , размещенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Магнитный поток, пронизывающий проводящий контур, может изменяться как вследствие изменения магнитной индукции поля B , так и вследствие изменения площади контура S или угла, определяющего ориентацию контура по отношению к вектору B . Возможно и одновременное изменение всех указанных величин.

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

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

$$\Delta \Phi = B_2 S_2 \cos \alpha_2 - B_1 S_1 \cos \alpha_1$$

Рассмотрим прямоугольный контур, одна из сторон которого длиной l не закреплена и может свободно скользить по направляющим, увеличивая площадь контура. Если по контуру

проходит постоянный ток I и контур находится в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , перпендикулярном плоскости контура, то на свободный проводник будет действовать сила Ампера, направленная влево. Таким образом, для перемещения проводника вправо необходимо приложить внешнюю силу, равную по модулю и противоположную по направлению силе Ампера. При перемещении проводника на расстояние Δx эта внешняя сила совершит работу:

$$A = F \Delta x = B I l \Delta x = B I \Delta S = I \Delta \Phi$$

При этом работа силы Ампера A'

$$A' = -A = -I \Delta \Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2)$$

Следовательно, работа магнитного поля определяется через изменение магнитного потока, пронизывающего контур.

С другой стороны, работа поля определяется разностью энергий контура с током в начальном и конечном положениях, поэтому формулу для работы можно переписать в следующем виде:

$$A' = \Delta E = -(E_2 - E_1) = E_1 - E_2$$

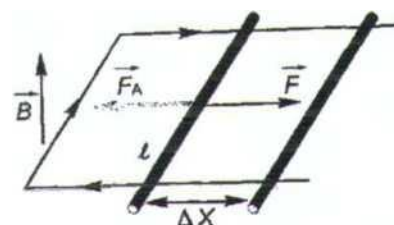
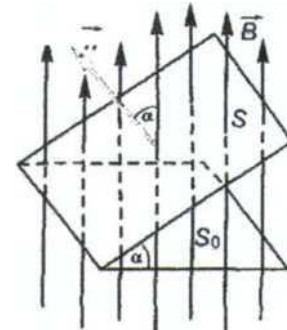
Сравнивая полученные выражения, видим, что энергия контура с током в магнитном поле определяется магнитным потоком, пронизывающим его:

$$E = I \Phi$$

Таким образом, магнитный поток Φ можно считать энергетической характеристикой магнитного поля.

Вам уже известно, что электрический ток и движущиеся заряды создают магнитное поле. А можно ли с помощью магнитного поля получить электрический ток? Именно такую задачу поставил перед собой английский физик Майкл Фарадей в 1821 г., записав в дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Через 10 лет эта задача была успешно им решена.

Следующим важным шагом в развитии электродинамики после опытов Ампера было открытие явления электромагнитной индукции. Открыл явление электромагнитной индукции



английский физик Майкл Фарадей (1791-1867).

Фарадей, будучи еще молодым ученым, так же как и Эрстед, думал, что все силы природы связаны между собой и, более того, что они способны превращаться друг в друга. Интересно, что эту мысль Фарадей высказывал еще до установления закона сохранения и превращения энергии. Фарадей знал об открытии Ампера, о том, что он, говоря образным языком, превратил электричество в магнетизм. Раздумывая над этим открытием, Фарадей пришел к мысли, что если «электричество создает магнетизм», то и наоборот, «магнетизм должен создавать электричество». И вот еще в 1823 г. он записал в своем дневнике: «Обратить магнетизм в электричество». В течение восьми лет Фарадей работал над решением поставленной задачи. Долгое время его преследовали неудачи, и, наконец, в 1831 г. он решил ее - открыл явление электромагнитной индукции.

Во-первых, Фарадей обнаружил явление электромагнитной индукции для случая, когда катушки намотаны на один и тот же барабан. Если в одной катушке возникает или пропадает электрический ток в результате подключения к ней или отключения от нее гальванической батареи, то в другой катушке в этот момент возникает кратковременный ток. Этот ток обнаруживается гальванометром, который присоединен ко второй катушке.

Затем Фарадей установил наличие индукционного тока в катушке, когда к ней приближали или удаляли от нее катушку, в которой протекал электрический ток.

Наконец, третий случай электромагнитной индукции, который обнаружил Фарадей, заключался в том, что в катушке появлялся ток, когда в нее вносили или же удаляли из нее магнит.

Открытие Фарадея привлекло внимание многих физиков, которые также стали изучать особенности явления электромагнитной индукции. На очереди стояла задача установить общий закон электромагнитной индукции. Нужно было выяснить, как и от чего зависит сила индукционного тока в проводнике или от чего зависит значение электродвижущей силы индукции в проводнике, в котором индуцируется электрический ток.

Эта задача оказалась трудной. Она была полностью решена Фарадеем и Максвеллом позже в рамках развитого ими учения об электромагнитном поле. Но ее пытались решить и физики, которые придерживались обычной для того времени теории дальнего действия в учении об электрических и магнитных явлениях.

Кое-что этим ученым удалось сделать. При этом им помогло открытое петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем (1804-1865) правило для нахождения направления индукционного тока в разных случаях электромагнитной индукции. Ленц сформулировал его так: «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении».

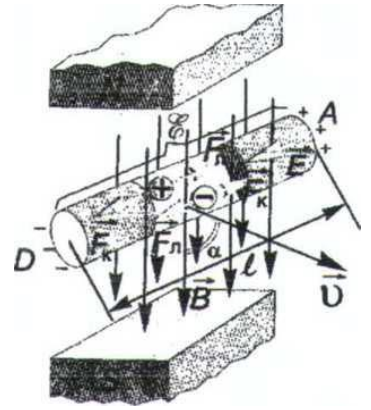
Это правило очень удобно для определения направления индукционного тока. Им мы пользуемся и сейчас, только оно сейчас формулируется несколько иначе, с употреблением понятия электромагнитной индукции, которое Ленц не использовал.

Но исторически главное значение правила Ленца заключалось в том, что оно натолкнуло на мысль, каким путем подойти к нахождению закона электромагнитной индукции. Дело в том, что в этом правиле устанавливается связь между электромагнитной индукцией и явлением взаимодействия токов. Вопрос же о взаимодействии токов был уже решен Ампером. Поэтому установление этой связи на первых порах дало возможность определить выражение электродвижущей силы индукции в проводнике для ряда частных случаев.

В общем виде закон электромагнитной индукции, как мы об этом сказали, был установлен Фарадеем и Максвеллом.

Подчеркнем, что сила Лоренца (магнитная сила) действует только на движущиеся заряды. При хаотическом движении заряженных частиц среднее значение силы Лоренца (и среднее смещение частиц) равно нулю. Следовательно, для того чтобы магнитное поле вызвало направленное движение зарядов (электрический ток) в проводнике, его необходимо перемещать в поле.

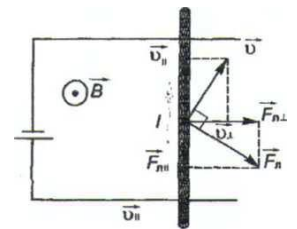
При движении проводника в магнитном поле вместе с ним перемещаются и находящиеся в нем свободные электроны. Под действием силы Лоренца они будут смещаться вдоль проводника к его концу D. (Направление силы можно определить по правилу левой руки.) Между концами проводника A и D возникнет разность потенциалов. Если проводник разомкнут, то при определенной скорости его движения положительный заряд на одном конце и равный ему отрицательный заряд на другом достигнут такой величины, что сила, действующая на каждый электрон со стороны возникшего электрического поля, уравнивает силу Лоренца, действующую на него в противоположную сторону. Заряды будут находиться в равновесии под действием этих сил, и дальнейшее их разделение прекратится. Созданная таким образом разность потенциалов в разомкнутой цепи получила название ЭДС электромагнитной индукции.



$$\Delta\varphi = \xi_i$$

Явление возникновения ЭДС индукции в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, называется явлением электромагнитной индукции.

Сторонней силой, создающей эту ЭДС, является сила Лоренца, действующая на свободные электроны в движущемся проводнике. Подчеркнем, что в движущемся проводнике сила Лоренца, действующая на заряды, может совершать работу, поскольку она имеет составляющую вдоль проводника.



Если проводник замкнуть расположенным вне магнитного поля проводом, то по этому проводу от D к A будут перемещаться электроны под действием ЭДС электромагнитной индукции. Существование ЭДС индукции приводит к появлению в замкнутом контуре *индукционного тока*. Таким образом, электроны в проводнике движутся от A к D против сил электрического поля под действием силы Лоренца, а от D к A по проводу (во внешней цепи) их движение происходит под действием сил электрического поля.

Индукционный ток будет нагревать проводник, по которому он проходит. Выделяющаяся в виде тепла энергия поступает в цепь благодаря работе, которую совершает внешняя сила, двигая проводник против сил поля. Когда проводник с индуцированным током движется в магнитном поле, то оно действует на проводник с силой Ампера $F_A = IBl$. Для определения направления этой силы применим правило левой руки. Направление силы противоположно направлению движения проводника. Следовательно, индукционный ток, взаимодействуя с магнитным полем, создает силу, тормозящую движение проводника. Таким образом, для движения проводника необходима внешняя сила, совершающая работу против силы Ампера.

Эксперимент 1

Гальванометр подсоединяем к катушке, и будем выдвигать из нее постоянный магнит. Наблюдаем отклонение стрелки гальванометра, появился ток (индукционный). Ток в проводнике возникает, когда проводник оказывается в области действия переменного магнитного поля.

Переменное магнитное поле Фарадей представлял как изменение числа силовых линий, пронизывающих поверхность, ограниченную данным контуром. Это число зависит от индукции B магнитного поля, от площади контура S и его ориентации в данном поле.

Индукционный ток может иметь разные направления, которые зависят от того, убывает или возрастает магнитный поток, пронизывающий контур. Правило, позволяющее определить направление индукционного тока, было сформулировано в 1833 г. Э. Х. Ленцем.

Эксперимент 2

В легкое алюминиевое кольцо вдвигаем постоянный магнит. Кольцо отталкивается от него, а при выдвигании притягивается к магниту. Результат не зависит от полярности магнита. Отталкивание и притягивание

объясняется возникновением в нем индукционного тока.

При вдвигании магнита магнитный поток через кольцо возрастает: отталкивание кольца при этом показывает, что индукционный ток в нем имеет такое направление, при котором вектор индукции его магнитного поля противоположен по направлению вектору индукции внешнего магнитного поля.

Правило Ленца: индукционный ток имеет всегда такое направление, что его магнитное поле препятствует любым изменениям магнитного потока, вызывающим появление индукционного тока.