

ТЕМА 13.. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

13.1. Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

13.2. Величина ЭДС индукции. Природа ЭДС индукции

13.3. Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

13.4. Применение электромагнитной индукции. Токи Фуко. Скин-эффект

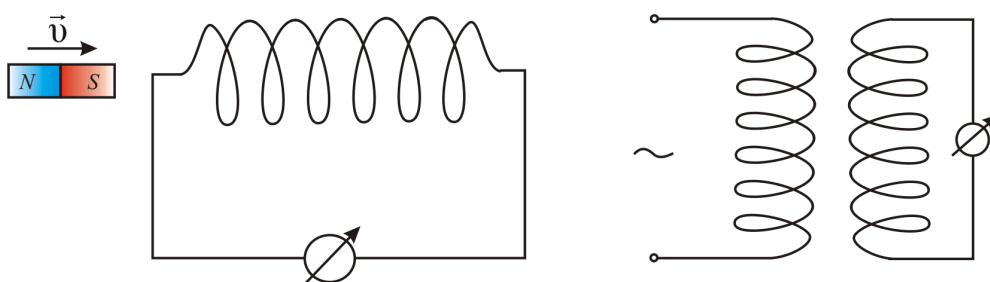
13.1. Опыты Фарадея. Индукционный ток. Правило Ленца

С момента открытия связи магнитного поля с током (что является подтверждением симметрии законов природы), делались многочисленные попытки получить *ток с помощью магнитного поля*. Задача была решена Майклом Фарадеем в 1831 г. (Американец Джозеф Генри тоже открыл, но не успел опубликовать свои результаты. Ампер также претендовал на открытие, но не смог представить свои результаты).

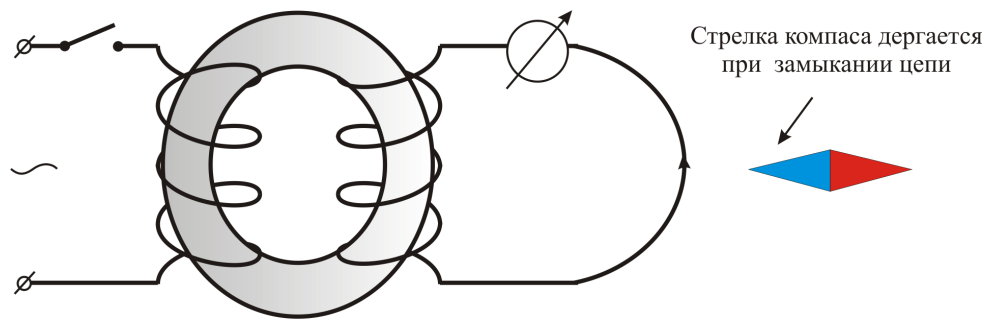


Фарадей Майкл (1791–1867) – знаменитый английский физик. Исследования в области электричества, магнетизма, магнитооптики, электрохимии. Создал лабораторную модель электродвигателя. Открыл экстрапоки при замыкании и размыкании цепи и установил их направление. Открыл законы электролиза, первый ввел понятия поля и диэлектрической проницаемости, в 1845 г. употребил термин «магнитное поле». Кроме всего прочего, М. Фарадей открыл явления диа- и парамагнетизма. Он установил, что все материалы в магнитном поле ведут себя по-разному: ориентируются по полю (пара- и ферромагнетики) или поперек поля – диамагнетики.

Из школьного курса физики опыты Фарадея хорошо известны, например катушка и постоянный магнит.



Если подносить магнит к катушке или наоборот, то в катушке возникнет электрический ток. То же самое происходит с двумя близко расположенными катушками: если к одной из катушек подключить источник переменного тока, то в другой также возникнет переменный ток, но лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником.



По определению Фарадея общим для этих опытов является следующее: *если поток вектора индукции, пронизывающий замкнутый, проводящий контур, меняется, то в контуре возникает электрический ток.*

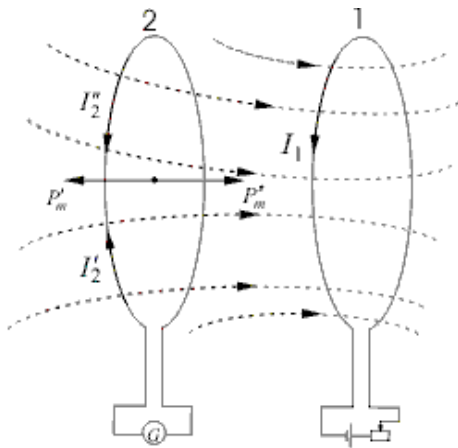
*Это явление называют **явлением электромагнитной индукции**, а ток – **индукционным**. При этом явление совершенно не зависит от способа изменения потока вектора магнитной индукции.*

Итак, получается, что *движущиеся заряды (ток) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле и собственно индукционный ток.*

Для каждого конкретного случая Фарадей указывал направление индукционного тока.

Заполнение всего пространства однородным магнетиком приводит, при прочих равных условиях, к увеличению индукции в μ раз. Этот факт подтверждает то, что индукционный ток обусловлен изменением потока вектора магнитной индукции \vec{B} , а не потока вектора напряженности \vec{H} .

Явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменениях магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции ε_i . Величина ε_i не зависит от способа, которым осуществляется изменение магнитного потока Φ , и определяется лишь скоростью изменения Φ , т.е., значением $\frac{d\Phi}{dt}$. При изменении знака $\frac{d\Phi}{dt}$ направление ε_i также меняется. Например, если увеличивать ток I_1 в контуре 1, поток магнитной индукции через контур 2 будет расти. Это приведет к появлению в контуре 2 индукционного тока I_2 , регистрируемого гальванометром. Уменьшение тока I_1 , обусловит убывание магнитного потока через второй контур, что приведет к появлению в нем тока иного направления, чем в первом случае. Индукционный ток I_2 можно вызвать также приближая контур 2 к контуру 1, или удаляя второй контур от первого. В обоих случаях направления возникающего тока противоположны. Наконец, электромагнитную индукцию можно вызвать, не перемещая контур 2 поступательно, а поворачивая его так, чтобы изменялся угол между нормалью и направлением поля.

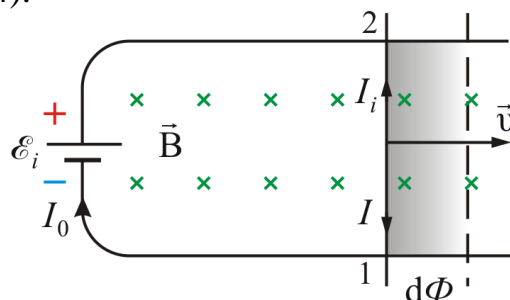


Русский физик Э. Х. Ленц (1804 – 1865) в 1833 г. установил правило, позволяющее найти направление индукционного тока. Правило Ленца: Индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине его вызывающей. Если, например, изменение Φ вызвано перемещением контура, то возникает индукционный ток такого направления, что сила взаимодействия с первым контуром противиться движению контура. При приближении контура 2 к контуру 1 возникает ток I_2' , магнитный момент которого направлен противоположно полю тока I_1 . Следовательно, на контур 2 будет действовать сила, отталкивающая его от контура 1, согласно формуле ($f = P_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha$). При удалении контура 2 от контура 1 возникает ток I_2'' , момент которого P_m'' совпадает по направлению с полем тока I_1 , так что сила, действующая на контур 2, направлена к контуру 1. Если оба контура неподвижны и ток в контуре 2 индуцируется при увеличении I_1 , возникает ток I_2' , создающий поток, направленный влево. При уменьшении I_1 возникает ток I_2'' , собственный магнитный поток которого направлен вправо (чтобы поддержать внешний поток неизменным).

13.2. Электродвижущая сила индукции. Природа ЭДС индукции

Для создания тока в цепи необходимо наличие электродвижущей силы. Поэтому явление электромагнитной индукции свидетельствует о том, что при изменении магнитного потока в контуре возникает электродвижущая сила индукции ε_i . Наша задача, используя законы сохранения энергии, найти величину ε_i и выяснить ее природу.

Рассмотрим перемещение подвижного участка 1–2 контура с током в магнитном поле \vec{B} (рис. 3.4).



Пусть сначала магнитное поле \vec{B} отсутствует. Батарея с ЭДС равной ε_0 создает ток I_0 . За время dt , батарея совершает работу:

$$dA = \varepsilon_0 I_0 dt. \quad (1)$$

Эта работа будет переходить в тепло, которое можно найти по закону Джоуля–Ленца:

$$Q = dA = \varepsilon_0 I_0 dt = I_0^2 R dt,$$

здесь $I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R}$, R – полное сопротивление всего контура.

Поместим контур в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} . Линии $\vec{B} \parallel \vec{n}$ и связаны с направлением тока «правилом буравчика». Поток Φ , сцепленный с контуром – положителен.

Каждый элемент контура испытывает механическую силу $d\vec{F}$. Подвижная сторона рамки будет испытывать силу \vec{F}_0 . Под действием этой силы участок 1–2 будет перемещаться со скоростью $v = dx/dt$. При этом изменится и поток магнитной индукции. Тогда в результате электромагнитной индукции, ток в контуре изменится и станет равным: $I = I_0 - I_i$.

Изменится и сила \vec{F}_0 , которая теперь станет равной результирующей силе \vec{F} . Эта сила за время dt произведет работу dA :

$$dA = F dx = I d\Phi.$$

Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является ε_0 .

При неподвижном контуре эта работа сводилась только лишь к выделению тепла. В нашем случае тепло тоже будет выделяться, но уже в другом количестве, так как ток изменился. Кроме того, совершается механическая работа. Общая работа за время dt равна:

$$\varepsilon_0 I dt = I^2 R dt + I d\Phi. \quad (2)$$

Умножим левую и правую часть выражения (2) на $\frac{1}{IR dt}$, получим

$$\frac{\varepsilon_0}{R} = I + \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отсюда

$$I = \frac{\varepsilon_0 - \frac{d\Phi}{dt}}{R}. \quad (3)$$

Полученное выражение (3) мы вправе рассматривать **как закон Ома для контура**, в котором, кроме источника ε_0 , действует ε_i , равная:

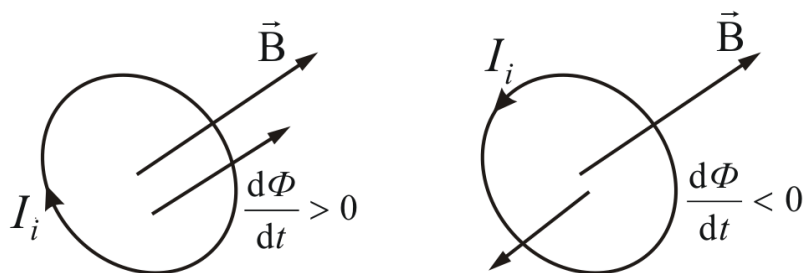
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

ЭДС индукции контура (ε_i) равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающей этот контур.

Это выражение (4) для ЭДС индукции контура является совершенно универсальным, не зависящим от способа изменения потока магнитной индукции и носит название **закон Фарадея**.

Знак минус – математическое выражение **правила Ленца о направлении индукционного тока: индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим полем противодействовать изменению начального магнитного поля.**

Направление индукционного тока и направление $\frac{d\Phi}{dt}$ связаны «правилом буравчика».



Если контур состоит из нескольких витков, то надо пользоваться понятием **потокосцепления** (полный магнитный поток):

$$\Psi = \Phi N,$$

где N – число витков.

Итак, если

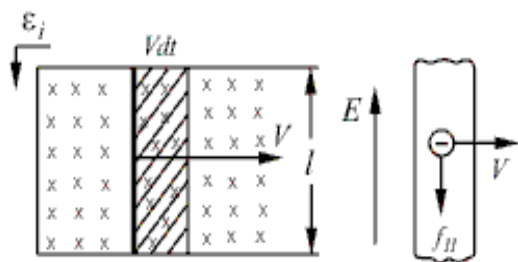
$$\varepsilon_i = -\sum_{i=1}^N \frac{d\Phi_i}{dt} = -\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \Phi_i,$$

$$\sum \Phi_i = \Psi.$$

Тогда **закон Фарадея** можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (5)$$

Какова природа возникновения ЭДС индукции? Для ответа на этот вопрос рассмотрим силы, действующие на свободные электроны проводника, помещенного в магнитное поле. Найдем связь ε_i и скоростью изменения магнитного потока Φ .



Поместим контур с подвижной перемычкой в однородное магнитное поле, перпендикулярное к плоскости контура и направленное за чертёж. Поле изображено крестиком.

Если подвижную часть контура привести в движение со скоростью \vec{V} , то с той же скоростью начнут перемещаться относительно поля и носители заряда в проводнике – электроны. В результате на каждый электрон начнет действовать магнитная сила, равная по модулю:

$$f_{II} = eVB. \quad (6)$$

Индекс “II” указывает на то, что сила направлена вдоль провода.

Действие этой силы эквивалентно действию электрической силы, обусловленной полем напряженности:

$$E = VB,$$

имеющим направление, указанное на рисунке. Это поле не электростатического происхождения. Его циркуляция по контуру дает величину ЭДС, индуцируемой в контуре:

$$\varepsilon_i = -\oint E_l dl = -El = -vBl = -B \frac{lv dt}{dt} = -B \frac{dS}{dt}, \quad (7)$$

где $dS = lv dt$ – приращение площади контура за время dt . (Это приращение равно заштрихованной площади (см. рисунок). При вычислении циркуляции мы учли, что E_l отлично от нуля лишь на участке длины l , причем на этом участке всюду $E_l = E$.

$BdS = d\Phi$ – приращение потока магнитной индукции через контур. Таким образом, ЭДС индукции ε_i , возникающая в замкнутом контуре, равна скорости изменения во времени потока магнитной индукции Φ , пронизывающего контур. Это равенство принято записывать в виде:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Знак минус в этой формуле соответствует правилу Ленца. Единицей потока магнитной индукции в “Си” служит вебер (Вб), который представляет собой поток через поверхность в 1 м^2 , пересекаемую нормальными к ней линиями магнитного поля с B , равной 1 тесла. При скорости изменения потока равной 1 Вб/с, в контуре индуцируется ЭДС, равная 1 В.

В рассуждениях, которые привели нас к формуле (4), роль сторонних сил, поддерживающих ток в контуре, играют магнитные силы. Работа этих сил над единичным положительным зарядом, равная по определению ЭДС, оказывается отличной от нуля. Однако, магнитная сила работы над зарядом совершать не может. Противоречие устраняет, если учесть, что сила (1) представляет собой не полную магнитную силу, действующую на электрон, а лишь параллельную проводу составляющую этой силы, обусловленную скоростью \vec{V} .

Рассмотренное объяснение возникновения ЭДС индукции относится к случаю, когда магнитное поле постоянно, а изменяется лишь геометрия контура. Однако, магнитный поток через контур может изменяться также за счет изменения \vec{B} . В этом случае объяснения возникновения ЭДС оказывается в принципе другим. Анализируя явление электромагнитной индукции, Максвелл (Д.К. Максвелл (1831 – 1879) английский физик, сформулировавший теорию электромагнитного поля) заключил, что причина появления ЭДС индукции заключается в возникновении электрического поля, вследствие изменения магнитного поля. **Всякое изменения магнитного поля всегда сопровождается появлением электрического поля и, наоборот, всякое изменение электрического поля приводит к появлению магнитного поля.** Это взаимное превращение электрического и магнитного полей было открыто в начале второй половины XIX века Максвеллом, который развил общую теорию электромагнитного поля в покоящихся средах.

Под действием возникающего электрического поля, вследствие изменения магнитного поля, электроны проводимости в проводнике приходят в движение. Если проводник замкнут, в нем возникает индукционный ток, т.е., проводник играет роль индикатора, обнаруживающего электрическое поле. **Электрическое поле, возникающее при электромагнитной индукции, имеет непрерывные силовые линии, т.е., представляет собой вихревое поле.** Такое поле вызывает в проводнике движение электронов по замкнутым траекториям и приводит к возникновению электродвижущей силы, т.е., сторонними силами являются силы вихревого электрического поля. Электрическое напряжение по замкнутому контуру в таком поле не равно нулю. Его значение между двумя какими – либо точками уже не определяется только положением этих точек, как было в случае электростатического поля, не зависит еще от формы контура (проводника), соединяющего данные точки.

Таким образом, углубленное истолкование явления электромагнитной индукции приводит к следующему выводу: всякое изменение магнитного поля вызывает появление вихревого электрического поля.

13.3. Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме

Воспользуемся теоремой Стокса и запишем закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме.

Формула Стокса: $\oint_L (\vec{A} d\vec{l}) = \int_S (\text{rot} \vec{A} d\vec{S})$, тогда

$$\varepsilon_i = \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} d\vec{S}).$$

Контур не изменяет форму, следовательно, операции дифференцирования и интегрирования можно поменять местами и перейти к частной производной:

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\int_S \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \right) \Rightarrow \oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = \int_S \underbrace{(\text{rot} \vec{E} d\vec{S})}_{-\int_S \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \right)}$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (8)$$

13.4. Применение электромагнитной индукции

1. Применение электромагнитной индукции для измерения величины индукции магнитного поля.

Обычно, для измерения величины магнитного поля применяют небольшую катушку, содержащую достаточно большое количество витков тонкого

медного провода, которую помещают в магнитное поле так, чтобы вектор \vec{B} оказался перпендикулярным к плоскости витков катушки.

Наиболее просто производятся измерения переменного магнитного поля. Для этого используют выражения (3) и (4). Полный магнитный поток, сцепленный с катушкой, будет равен:

$$\Psi = N\Phi,$$

где $\Phi = BS \cos \omega t$ – магнитный поток, пронизывающий каждый виток катушки,

S – площадь витка,

ω – циклическая частота переменного тока.

Изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, под действием которого в витках катушки возникает индуцированный ток. ЭДС, индуцируемая в катушки:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(NBS \cos \omega t) = NBS\omega \sin \omega t.$$

Отсюда максимальное значение ЭДС:

$$\varepsilon_m = NBS\omega.$$

Таким образом, измеряя с помощью вольтметра значение ЭДС, можно определить значение магнитной индукции исследуемого магнитного поля в том месте, где находится измерительная катушка по формуле:

$$B = \frac{\varepsilon_m}{NS\omega},$$

так как с помощью вольтметра измеряется действующее значение, то и определяемое значение B также является действующим.

Для измерения постоянного магнитного поля применяют флюксометр, устройство, состоящее из небольшой плоской проволочной катушки, соединенной с баллистическим гальванометром.* При измерениях катушку флюксометра ориентируют перпендикулярно к направлению магнитной индукции. Тогда магнитный поток через катушку равен $\Phi = BSN$, где S – площадь катушки, а N – число витков проволоки. Затем магнитный поток через катушку быстро уменьшают до нуля, выдергивая катушку из области магнитного поля или выключая токи, создающие магнитное поле, или поворачивая катушку на 90° .

Мгновенное значение ЭДС в процессе исчезновения магнитного потока выражается формулой $\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt}$. Следовательно, согласно закону Ома мгновенное

значение силы тока есть:

$$I = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt},$$

где R – полное сопротивление цепи. Величина прошедшего заряда:

* Баллистический гальванометр – гальванометр с большим периодом собственных колебаний

$$q = \int Idt = -\frac{1}{R} \int_{\Psi}^0 d\Psi = \frac{\Psi}{R}. \quad (9)$$

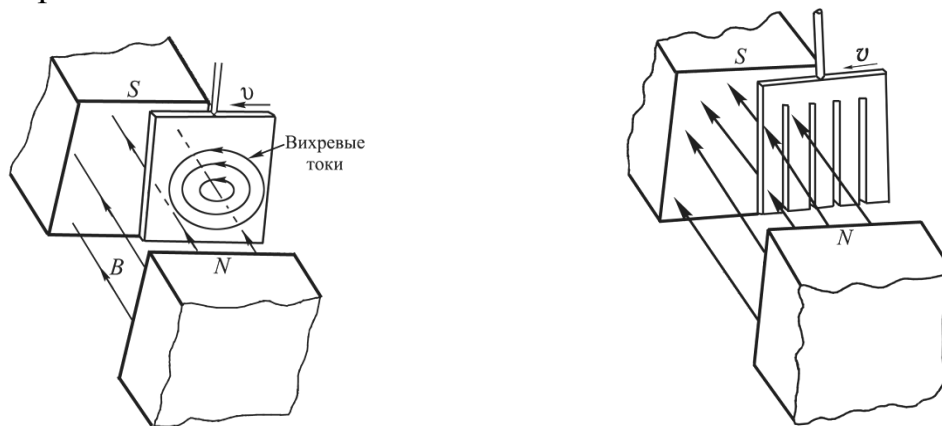
Измеряя заряд q баллистическим гальванометром, можно определить магнитную индукцию, поскольку $\Psi = BSN$.

Полученное соотношение (9) выражает закон электромагнитной индукции в форме, найденной Фарадеем, который из своих опытов заключил, что величина заряда, прошедшего по цепи, пропорциональна полному числу линий магнитной индукции, пересеченных проводником, и обратно пропорциональна сопротивлению цепи.

2. Токи Фуко (вихревые токи)

До сих пор мы рассматривали индукционные токи в линейных проводниках. Но индукционные токи будут возникать и в толще сплошных проводников при изменении в них потока вектора магнитной индукции \vec{B} . Они будут циркулировать в веществе проводника (напомним, что линии \vec{E}' – замкнуты). Так как электрическое поле вихревое, то и токи называются вихревыми токами, или *токами Фуко*.

Если медную пластину отклонить от положения равновесия и отпустить так, чтобы она вошла со скоростью v в пространство между полосами магнита, то пластина практически остановится в момент ее вхождения в магнитное поле.



Замедление движения связано с возбуждением в пластине вихревых токов, препятствующих изменению потока вектора магнитной индукции. Поскольку пластина обладает конечным сопротивлением, токи индукции постепенно затухают и пластина медленно движется в магнитном поле. Если электромагнит отключить, то медная пластина будет совершать обычные колебания, характерные для маятника.

Сила и расположение вихревых токов очень чувствительны к форме пластины. Если заменить сплошную медную пластину «гребенкой» – медной пластиной с пропилами, то вихревые токи в каждой части пластины возбуждаются меньшими потоками. Индукционные токи уменьшаются, уменьшается и торможение. Маятник в виде гребенки колеблется в магнитном поле почти без сопротивления. Этим опытом объясняется, почему сердечники электромагнитов,

трансформаторов делают не из сплошного куска железа, а набранными из тонких пластин, изолированных друг от друга. В результате уменьшаются токи Фуко и выделяемое ими тепло.

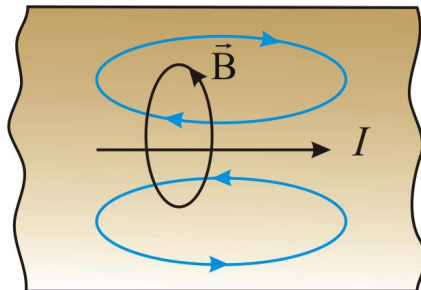
Если взять медный диск диаметром ≈ 5 см и толщиной ≈ 5 мм и уронить его между полюсами электромагнита, то при выключенном магните диск падает с обычным ускорением. При включении магнитного поля ≈ 1 Тл падение диска резко замедляется и его движение напоминает падение тела в очень вязкой среде.

Тормозящее действие тока Фуко используется для создания магнитных успокоителей – демпферов. Если под качающейся в горизонтальной плоскости магнитной стрелкой расположить массивную медную пластину, то возбуждаемые в медной пластине токи Фуко будут тормозить колебание стрелки. Магнитные успокоители такого рода используются в сейсмографах, гальванометрах и других приборах.

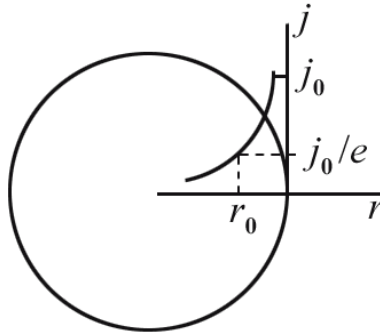
Токи Фуко применяются в электрометаллургии для плавки металлов. Металл помещают в переменное магнитное поле, создаваемое током частотой $500 \div 2000$ Гц. В результате индуктивного разогрева металл плавится, а тигль, в котором он находится, при этом остается холодным. Например, при подведенной мощности 600 кВт тонна металла плавится за 40–50 минут.

3. Скин-эффект

Если быстропеременный высокочастотный ток протекает по проводнику, то вихревые токи, индуцируемые в проводнике, препятствуют равномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводника – плотность тока на оси провода оказывается меньше, чем у его поверхности. Ток как бы вытесняется на поверхность провода, при этом вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении. Это явление называется скин-эффектом (от англ. *skin* – кожа, оболочка). Впервые это явление описано в 1885–1886 гг. английским физиком О. Хевисайдом, а обнаружено на опыте его соотечественником Д. Юзом в 1886 г.



При нарастании тока в проводе ЭДС индукции направлена против тока. Электрическое поле самоиндукции максимально на оси провода, что приводит к неравномерному распределению плотности тока. Плотность тока убывает от поверхности к оси провода примерно по экспоненциальному закону.



При частоте $\nu = 50$ Гц, $r_0 = 10$ мм – ток практически равномерно распределен по объему проводов, исключая очень толстые кабели. Но при высокочастотных колебаниях $\nu \approx 100$ МГц $= 10^8$ Гц глубина проникновения $r_0 \approx 7 \cdot 10^{-3}$ мм и ток почти целиком течет по поверхности провода. По этой причине с целью уменьшения потерь поверхность высокочастотных контуров серебрят. Провода для переменных токов высокой частоты, учитывая скин-эффект, сплетают из большого числа тонких проводящих нитей, изолированных друг от друга эмалевым покрытием – *литцендратом*.

ВЧ-токи используются для закалки поверхностей деталей: поверхностный слой разогревается быстро в ВЧ-поле, закаливается и становится прочным, но не хрупким, так как внутренняя часть детали не разогревалась и не закаливалась.