

Электромагнитная индукция



Явление электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция – явление возникновения тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего его.

Явление электромагнитной индукции было открыто М. Фарадеем.

Опыты Фарадея

- На одну непроводящую основу были намотаны две катушки: витки первой катушки были расположены между витками второй. Витки одной катушки были замкнуты на гальванометр, а второй – подключены к источнику тока. При замыкании ключа и протекании тока по второй катушке в первой возникал импульс тока. При размыкании ключа также наблюдался импульс тока, но ток через гальванометр тек в противоположном направлении.
- Первая катушка была подключена к источнику тока, вторая, подключенная к гальванометру, перемещалась относительно нее. При приближении или удалении катушки фиксировался ток.
- Катушка замкнута на гальванометр, а магнит движется – вдвигается (выдвигается) – относительно катушки.



Опыты показали, что индукционный ток возникает только при изменении линий магнитной индукции. Направление тока будет различно при увеличении числа линий и при их уменьшении. Сила индукционного тока зависит от скорости изменения магнитного потока. Может изменяться само поле, или контур может перемещаться в неоднородном магнитном поле.

Объяснения возникновения индукционного тока

Ток в цепи может существовать, когда на свободные заряды действуют сторонние силы. Работа этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура равна ЭДС. Значит, при изменении числа магнитных линий через поверхность, ограниченную контуром, в нем появляется ЭДС, которую называют ЭДС индукции.

Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Его называют **вихревым электрическим полем**. Представление о вихревом электрическом поле было введено в физику великим английским физиком Дж. Максвеллом в 1861 году.

Свойства вихревого электрического поля:

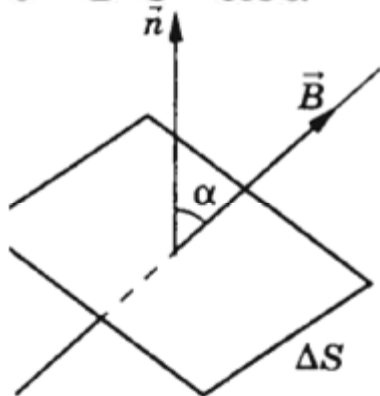
- источник – переменное магнитное поле;
- обнаруживается по действию на заряд;
- не является потенциальным;
- линии поля замкнутые.

Работа этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике.

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитным потоком через площадь S контура называют скалярную физическую величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции B , площади поверхности S , пронизываемой данным потоком, и косинуса угла α между направлением вектора магнитной индукции и вектора нормали (перпендикуляра к плоскости данной поверхности):

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



Обозначение – Φ , единица измерения в СИ – вебер (Вб).

Магнитный поток в 1 вебер создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Магнитный поток можно наглядно представить как величину, пропорциональную числу магнитных линий, проходящих через данную площадь.

В зависимости от угла α магнитный поток может быть положительным ($\alpha < 90^\circ$) или отрицательным ($\alpha > 90^\circ$). Если $\alpha = 90^\circ$, то магнитный поток равен 0.

Изменить магнитный поток можно меняя площадь контура, модуль индукции поля или расположение контура в магнитном поле (поворачивая его).

В случае неоднородного магнитного поля и неплоского контура магнитный поток находят как сумму магнитных потоков, пронизывающих площадь каждого из участков, на которые можно разбить данную поверхность.

Закон электромагнитной индукции Фарадея

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея):

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Знак « \leftrightarrow » в формуле позволяет учесть направление индукционного тока. Индукционный ток в замкнутом контуре имеет всегда такое направление, чтобы магнитный поток поля, созданного этим током сквозь поверхность, ограниченную контуром, уменьшал бы те изменения поля, которые вызвали появление индукционного тока.

Если контур состоит из N витков, то ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Сила индукционного тока в замкнутом проводящем контуре с сопротивлением R :

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R}.$$

При движении проводника длиной l со скоростью v в постоянном однородном магнитном поле с индукцией B ЭДС электромагнитной индукции равна:

$$\mathcal{E}_i = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами B и v .

Возникновение ЭДС индукции в движущемся в магнитном поле проводнике объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.

Движущийся в магнитном поле проводник, по которому протекает индукционный ток, испытывает магнитное торможение. Полная работа силы Лоренца равна нулю.

Количество теплоты в контуре выделяется либо за счет работы внешней силы, которая поддерживает скорость проводника неизменной, либо за счет уменьшения кинетической энергии проводника.

Важно!

Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам:

- магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. Это случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле;
- вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, – изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Явление электромагнитной индукции в неподвижных проводниках, возникающее при изменении окружающего магнитного поля, также описывается формулой Фарадея.

Таким образом, явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках протекают одинаково, но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной:

- в случае движущихся проводников ЭДС индукции обусловлена силой Лоренца;
- в случае неподвижных проводников ЭДС индукции является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.

Правило Ленца

Направление индукционного тока определяется по **правилу Ленца**: индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

Алгоритм решения задач с использованием правила Ленца:

- определить направление линий магнитной индукции внешнего магнитного поля;
- выяснить, как изменяется магнитный поток;
- определить направление линий магнитной индукции магнитного поля индукционного тока: если магнитный поток уменьшается, то они сонаправлены с линиями внешнего магнитного поля; если магнитный поток увеличивается, – противоположно направлению линий магнитной индукции внешнего поля;
- по правилу буравчика, зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока, определить направление индукционного тока.

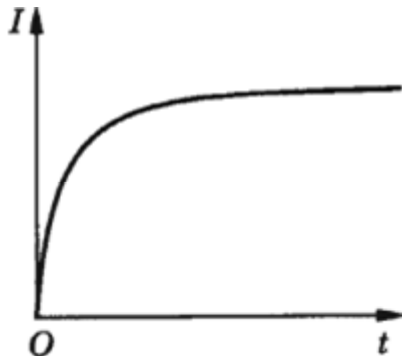
Правило Ленца имеет глубокий физический смысл – оно выражает закон сохранения энергии.

Самоиндукция

Самоиндукция – это явление возникновения ЭДС индукции в проводнике в результате изменения тока в нем.

При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, должно вызывать появление ЭДС индукции в катушке.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении и убыванию силы тока при выключении цепи.

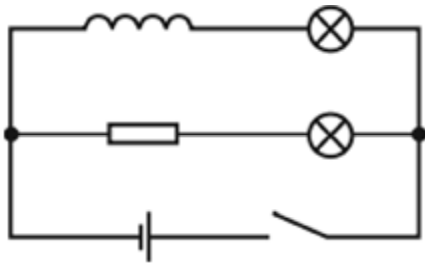


Это приводит к тому, что при замыкании цепи, в которой есть источник тока с постоянной ЭДС, сила тока устанавливается через некоторое время.

При отключении источника ток также не прекращается мгновенно. Возникающая при этом ЭДС самоиндукции может превышать ЭДС источника.

Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, резистора, двух одинаковых ламп накаливания и источника тока. Резистор должен иметь такое же электрическое сопротивление, как и провод катушки.

катушки.



Опыт показывает, что при замыкании цепи электрическая лампа, включенная последовательно с катушкой, загорается несколько позже, чем лампа, включенная последовательно с резистором. Нарастанию тока в цепи катушки при замыкании препятствует ЭДС самоиндукции, возникающая при возрастании магнитного потока в катушке.

При отключении источника тока вспыхивают обе лампы. В этом случае ток в цепи поддерживается ЭДС самоиндукции, возникающей при убывании магнитного потока в катушке.

ЭДС самоиндукции ϵ_{is} , возникающая в катушке с индуктивностью L , по закону электромагнитной индукции равна:

$$\epsilon_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в катушке.

Индуктивность

Электрический ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Магнитный поток Φ через контур из этого проводника пропорционален модулю индукции B магнитного поля внутри контура, а индукция магнитного поля, в свою очередь, пропорциональна силе тока в проводнике.

Следовательно, магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI.$$

Индуктивность – коэффициент пропорциональности L между силой тока I в контуре и магнитным потоком Φ , создаваемым этим током:

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Индуктивность зависит от размеров и формы проводника, от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Единица индуктивности в СИ – генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 генри, если при силе постоянного тока 1 ампер магнитный поток через контур равен 1 вебер:

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}.$$

Можно дать *второе определение единицы индуктивности*: элемент электрической цепи обладает индуктивностью в 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока в цепи на 1 ампер за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 вольт.

Энергия магнитного поля

При отключении катушки индуктивности от источника тока лампа накаливания, включенная параллельно катушке, дает кратковременную вспышку. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции.

Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Для создания тока в контуре с индуктивностью необходимо совершить работу на преодоление ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля тока вычисляется по формуле:

$$W_{\text{маг}} = \frac{L \cdot I^2}{2}.$$

Основные формулы раздела «Электромагнитная индукция»

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad - \text{ магнитный поток}$$
$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad - \text{ закон электромагнитной индукции}$$
$$\varepsilon_i = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha \quad - \text{ ЭДС индукции в движущемся проводнике}$$
$$\varepsilon_{is} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad - \text{ ЭДС самоиндукции}$$
$$\Phi = LI \quad - \text{ магнитный поток}$$
$$L = \frac{\Phi}{I} \quad - \text{ индуктивность}$$
$$W_{\text{мг}} = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad - \text{ энергия магнитного поля}$$

Алгоритм решения задач по теме «Электромагнитная индукция»:

1. Внимательно прочитать условие задачи. Установить причины изменения магнитного потока, пронизывающего контур.
2. Записать формулу:
 - закона электромагнитной индукции;
 - ЭДС индукции в движущемся проводнике, если в задаче рассматривается поступательно движущийся проводник; если в задаче рассматривается электрическая цепь, содержащая источник тока, и возникающая на одном из участков ЭДС индукции, вызванная движением проводника в магнитном поле, то сначала нужно определить величину и направление ЭДС индукции. После этого задача решается по аналогии с задачами на расчет цепи постоянного тока с несколькими источниками.
3. Записать выражение для изменения магнитного потока и подставить в формулу закона электромагнитной индукции.
4. Записать математически все дополнительные условия (чаще всего это формулы закона Ома для полной цепи, силы Ампера или силы Лоренца, формулы кинематики и динамики).
5. Решить полученную систему уравнений относительно искомой величины.
6. Решение проверить.