Направление индукционного тока. Рассмотрим следующий опыт. Возьмём катушку и присоединим её к гальванометру. Если магнит приближать к катушке, то стрелка гальванометра отклоняется, в ней появляется индукционный ток такого направления, при котором магнит отталкивается.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, при котором магнит притягивается.

В чём состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, а), а во втором случае уменьшается (рис. 2.5, б). Причём в первом случае линии индукции В магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены чёрным цветом.

Аналогичные выводы можно сделать с помощью опыта, показанного на рисунке 2.6. На концах стержня, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом. Если поднести магнит к кольцу без разреза, то в нём возникнет индукционный ток и направлен он будет так, что это кольцо оттолкнётся от магнита и стержень повернётся. Если удалять магнит от кольца, то оно, наоборот, притянется к магниту. С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока.

Отталкивает или притягивает катушка магнит, зависит от направления индукционного тока в ней.

При увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле с индукцией В' препятствует усилению магнитного потока через витки катушки.

Если же магнитный поток ослабевает, то индукционный ток создаёт магнитное поле с индукцией В', увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

Направление индукционного тока определяется по правилу, которое было установлено русским физиком Э. X. Ленцем.

Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.

Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом:

Индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции В внешнего магнитного поля.

2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром (ДФ > 0), или уменьшается (ДФ < 0).

3. Установить направление линий магнитной индукции В' магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции В при ДФ > 0 и иметь одинаковое с ними направление при ДФ < 0.

4. Зная направление линий магнитной индукции В', найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

Закон электромагнитной индукции. Магнитный поток, как мы знаем, можно графически представить как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S. Чем больше индукция магнитного поля, тем большее число линий магнитной индукции пронизывает эту поверхность. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время At магнитный поток меняется на ДФ, то скорость ДФ

изменения магнитного потока равна — . Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так:

Сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Причиной возникновения индукционного тока в цепи является ЭДС, называемая ЭДС индукции.

Обозначают её буквой.

Согласно закону Ома для замкнутой цепи /, = —. Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, соотношение (2.3) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна.

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, так как сила тока зависит и от свойств проводника, а ЭДС определяется только изменением магнитного потока.

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

На рисунке 2.7 изображён замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль гС к контуру образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция В внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда Ф > 0 и —— > 0. Согласно правилу Ленца индукционный ток создаёт магнитный поток Ф' < 0. Вектор индукции В' поля, созданного индукционным током, в центре кольца направлен в сторону, противоположную векторам Вий\* (см. рис. 2.7). Следовательно, индукционный ток согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в формуле для закона электромагнитной индукции должен стоять знак, указывающий на то, что имеют разные знаки:

Отметим, что линии напряжённости поля, вызывающего движение зарядов, в этом случае замкнуты, направление напряжённости изменяется. Такое поле называется вихревым (подробно о вихревом поле мы поговорим в § 35). Работа по перемещению заряда по замкнутому контуру в вихревом поле не равна нулю.

Индукционные токи в массивных проводниках. Особенно большого числового значения индукционные токи достигают в массивных проводниках из-за того, что их сопротивление мало.

Такие токи, называемые токами Фуко по имени исследовавшего их французского физика, можно использовать для нагревания проводников. На этом принципе основано устройство индукционных печей, например используемых в быту СВЧ-печей. Также этот принцип используется для плавки металлов. Кроме этого, явление электромагнитной индукции используется в детекторах металла, устанавливаемых при входах в здания аэровокзалов, театров и т. д.

Однако во многих устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным и даже нежелательным потерям энергии на выделение тепла. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей, генераторов и т. д. делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряжённости вихревого электрического поля. Сопротивление электрическому току пластин будет при этом максимальным, а выделение тепла — минимальным.

Применение ферритов. Радиоэлектронная аппаратура работает в области очень высоких частот (миллионы колебаний в секунду). Здесь применение сердечников катушек из отдельных пластин уже не даёт нужного эффекта, так как большие токи Фуко возникают в каждой пластине.

В § 6 отмечалось, что существуют магнитные изоляторы — ферриты. При перемагничивании в ферритах не возникают вихревые токи. В результате потери энергии на выделение в них тепла сводятся к минимуму. Поэтому из ферритов делают сердечники высокочастотных трансформаторов, магнитные антенны транзисторов и др. Ферритовые сердечники изготовляют из смеси порошков исходных веществ. Смесь прессуется и подвергается сильной термической обработке.

При быстром изменении магнитного поля в обычном ферромагнетике возникают индукционные токи, магнитное поле которых в соответствии с правилом Ленца препятствует изменению магнитного потока в сердечнике катушки. Из-за этого поток магнитной индукции практически не меняется и сердечник не перемагничивается. В ферритах вихревые токи очень малы, поэтому их можно быстро перемагничивать.