

Движение магнитных полей

Нечипуренко Николай Алексеевич

г. Энергодар, Украина

Связь с автором: E-mail: nikola-nech@yandex.ua.

В предлагаемой к рассмотрению статье приводятся доказательства того, что в процессе изменения значения индукции магнитного поля, магнитные силовые линии, с помощью которых изображается это поле, находятся в состоянии движения.

§5.10. ЭДС взаимной индукции

Экспериментально установлено, что любые изменения значения тока I , текущего в прямолинейном проводнике $П1$, сопровождаются наведением ЭДС e в параллельно расположенном проводнике $П2$ (рис. 5.6). ЭДС, наведенная в проводнике $П2$, получила название *ЭДС взаимной индукции*.

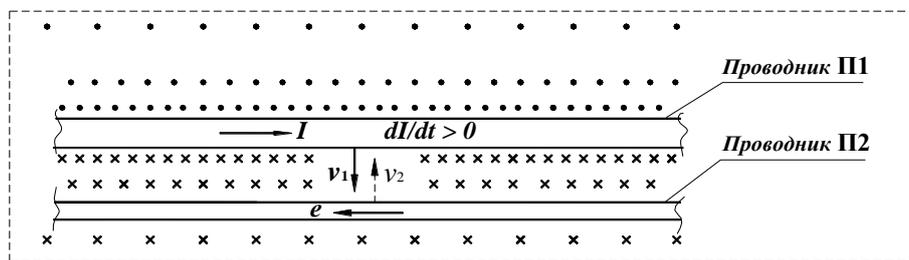


Рис. 5.6. Наведенная в проводнике $П2$ ЭДС взаимной индукции e

Направление наведенной в проводнике $П2$ ЭДС взаимной индукции (рис. 5.6) оказывается таким, как если бы при **увеличении** значения тока I , текущего в проводнике $П1$, наведенное этим током **магнитное поле**, двигаясь в направлении вектора v_1 , **удаляется от проводника $П1$** , а при **уменьшении** значения тока наведенное **магнитное поле** перемещается в **сторону этого проводника**. Для определения направления ЭДС, наведенной в проводнике, который движется в **неподвижном** магнитном поле, используется **правило правой руки** {§5.6} а для определения ЭДС наведенной в проводнике, находящемся в движущемся магнитном поле используется **правило левой руки**. *Примечание:* если здесь и в дальнейшем номер формулы, рисунка или параграфа заключен в фигурные {} скобки, то это означает, что указанная формула рисунок или параграф содержится в учебном пособии «Основы электротехники», полный текст которого размещен на сайте <http://sites.google.com/site/nikolanech/>.

Правило левой руки: если левую руку расположить так, что в ее раскрытую ладонь направлены силовые линии движущегося магнитного поля, а отогнутый большой палец указывает направление движения этого поля, то остальные четыре пальца укажут направление ЭДС, наведенной в неподвижном проводнике, который находится в движущемся магнитном поле. Однако все инерциальные системы отсчета равнозначны между собой. Следовательно, можно предполагать, что магнитное поле, наведенное увеличивающимся током I (рис. 5.6), остается неподвижным, а проводник $П2$ движется в направлении вектора v_2 , в этом случае направление ЭДС e , наведенной в проводнике $П2$, определяется с помощью уже знакомого нам правила **правой руки** {рис. 5.3}.

§5.11. ЭДС самоиндукции

Проводник электрического тока может состоять из множества тонких проволок – это придает проводнику необходимую эластичность, поэтому многопроволочные проводники имеют весьма широкое распространение. На рис 5.7 показано поперечное сечение проводника $П3$, который состоит из пучка тонких проволок. Там же темным цветом выделено поперечное сечение одной из проволок, которая является составляющей проводника $П3$, и вместе с тем может рассматриваться как самостоятельный проводник $П4$.

Подобно тому, как при изменении значения тока, текущего в проводнике **П1** (рис. 5.6), в проводнике **П2** наводится ЭДС взаимной индукции, так и при изменении значения тока, текущего в проводнике **П3** (рис. 5.7), в проводнике **П4** наводится ЭДС. Наведенную в проводнике **П4** ЭДС принято называть **ЭДС самоиндукции**.

ЭДС взаимной индукции, и ЭДС самоиндукции имеют одно общее название – **индуктированная ЭДС**.

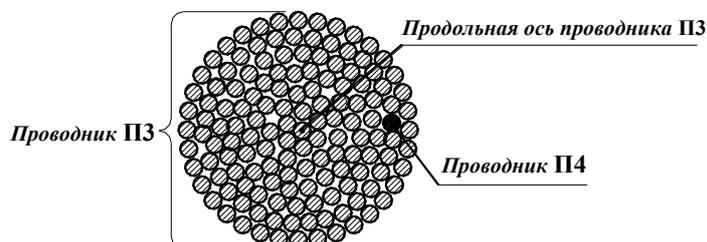


Рис. 5.7. Поперечное сечение многопроволочного проводника

Направление ЭДС самоиндукции оказывается таким, как если бы каждая силовая линия магнитного поля, наведенного текущим в проводнике **П3** током, зарождалась в виде точки на продольной оси проводника **П3**, и по мере увеличения значения тока эта точка, расширяясь, превращалась в окружность, диаметр которой непрерывно увеличивается. Следовательно, при увеличении значения тока, текущего в проводнике **П3**, в проводнике **П4** наводится такая ЭДС, какую смогли бы навести удаляющиеся от продольной оси проводника **П3** магнитные силовые линии. При уменьшении значения тока, текущего в проводнике **П3**, в проводнике **П4**, наводится такая ЭДС, какую могли бы навести магнитные силовые линии, движущиеся в сторону продольной оси проводника **П3**.

Значение ЭДС самоиндукции определяется с помощью уравнения

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (5.8)$$

где e – значение ЭДС самоиндукции – это значение пропорционально силе, действующей на упорядоченно движущиеся заряды проводимости; I – значение текущего в проводнике тока – это значение пропорционально скорости упорядоченного движения зарядов проводимости; $\Delta I / \Delta t$ – ускорение, с которым движутся заряды проводимости; L – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент L или индуктивность участка электрической цепи, в котором наводится ЭДС самоиндукции e , определяет, в каком соотношении находится ЭДС (сила, действующая на заряды проводимости) и ускорение $\Delta I / \Delta t$ – ускорение, с которым движутся заряды проводимости. Следовательно, **ЭДС самоиндукции e , действующая в электрических цепях, подобна силам инерции, действующим в механических системах.**

§5.12. Правило Ленца

При неизменном значении тока, текущего в проводнике **П1** (рис. 5.6) или в проводнике **П3** (рис. 5.7), значение индукции наведенного этим током магнитного поля, остается неизменным, в этом случае ЭДС взаимной индукции и ЭДС самоиндукции **не наводятся**.

При изменении значения тока, текущего в проводнике **П1** (рис. 5.6) или в проводнике **П3** (рис. 5.7), **наводится ЭДС** взаимной индукции или ЭДС самоиндукции. При увеличении значения тока, наведенные ЭДС обретают одно направление, а при уменьшении значения тока, направления индуктированных ЭДС изменяются на противоположное. Под действием наведенных ЭДС оказываются содержащиеся в проводниках заряды проводимости. Иногда возникает необходимость в определении последствий, вызванных действием индуктированных ЭДС. Русский академик Э. Х. Ленц сформулировал универсальное правило для определения характера действия индуктированной ЭДС: **направление индуктированной ЭДС таково, что эта ЭДС или вызванный ею ток и наведенное этим током магнитное поле всегда противодействуют причине, порождающей эту индуктированную ЭДС.**

§5.13. Закон электромагнитной индукции

В первой половине XIX столетия Майкл Фарадей открыл следующую закономерность: *при изменении значения магнитного потока, пронзающего поверхность, ограниченную замкнутым токопроводящим контуром, в контуре появляется электрический ток.* Было установлено, что электрический ток течет, подчиняясь действию наводимой в замкнутом контуре ЭДС, а значение ЭДС пропорционально скорости, с которой изменяется значение магнитного потока, пронзающего охваченную контуром поверхность. Если значение *равномерно* изменяющегося магнитного потока Φ , в течение времени Δt изменяется на величину $\Delta\Phi$, то значение наведенной в контуре ЭДС E определяется с помощью уравнения

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5.9)$$

Уравнение (5.9) – это математическая форма записи *закона Фарадея* или, как его еще называют – *закона электромагнитной индукции.*

Следовательно, ЭДС наводится в двух случаях – при относительном движении проводника и магнитного поля и при изменении значения магнитного потока, то есть при изменении значения магнитной индукции. Однако данные экспериментов указывают на то, что только при относительном взаимном движении магнитного поля и проводника в проводнике наводится ЭДС. Следовательно, наведенная в проводнике ЭДС – это результат движения магнитного поля относительно неподвижного проводника или результат движения проводника относительно неподвижного магнитного поля. Подтверждением этому является разгадка парадокса Геринга и результаты измерения напряжения, действующего на отдельные участки токопроводящего витка, охватывающего магнитную ветвь.

§5.14. Парадокс Геринга

В середине XX века был поставлен эксперимент, в процессе проведения которого было открыто явление, получившее название *парадокс Геринга.*

На рис. 5.8 изображена схема установки Геринга. Упругие токопроводящие пластины $\Pi 1$, $\Pi 2$, переходящие в замкнутый контакт K , совместно с токоизмерительным прибором PA образуют цепь замкнутого токопроводящего контура. Кольцевой постоянный магнит M , проскальзывая между контактом K , может перемещаться из положения 1 в положение 2 и обратно. Магнит изготовлен из токопроводящего материала, поэтому при проскальзывании магнита между двумя подвижными частями контакта K цепь токопроводящего контура, благодаря упругим свойствам пластин $\Pi 1$, $\Pi 2$, остается все время замкнутой.

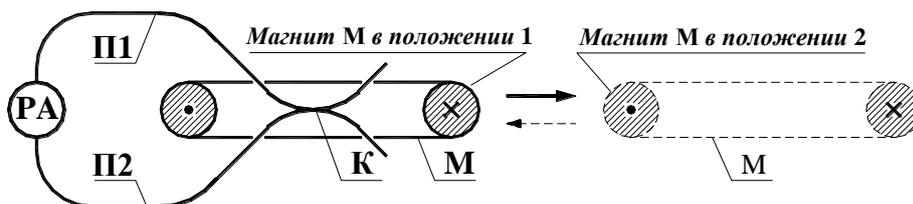


Рис. 5.8. Изменения значения магнитного потока не вызывают наведения ЭДС в замкнутом контуре

Перемещение магнита из положения 1 в положение 2 сопровождается изменением значения магнитного потока пронзающего поверхность, охваченную замкнутым токопроводящим контуром. И это не вызывает всплеска тока, регистрируемого токоизмерительным прибором PA , а это, в свою очередь, свидетельствует об отсутствии ЭДС, наведенной в замкнутом токопроводящем контуре, что, казалось бы, противоречит закону электромагнитной индукции. После обнаружения парадокса Геринга были поставлены и другие опыты, результаты которых указывали на то, что для наведения ЭДС в замкнутом токопроводящем контуре недостаточно одного только изменения значения магнитного потока, пронзающего этот контур.

Дискуссия в отношении парадокса Геринга началась в середине XX века и продолжалась в течение более 20 лет, однако однозначного ответа так и не было найдено. На основании этого и

было сделано заключение о том, что закон электромагнитной индукции, в том виде как он сформулирован, соблюдается не во всех случаях. К настоящему времени парадоксу Геринга нашлось объяснение. Доктор технических наук, профессор Белгородского госуниверситета Константин Борисович Канн на своем сайте electrodynamics.narod.ru/em-waves. дает следующее объяснение парадоксу Геринга.

Магнит M (рис. 5.8), проскальзывая между контактами K , соединяет своим телом эти контакты, сохраняя тем самым целостность замкнутого токопроводящего контура, следовательно, во время проскальзывания магнит M превращается в участок замкнутого токопроводящего контура.

Магнитные силовые линии, принадлежащие кольцевому магниту M , замыкаются внутри магнита, и в случае движения магнита перемещаются вместе с этим магнитом. Следовательно, в процессе проскальзывания магнита между контактами K , принадлежащие магниту магнитные силовые линии, оставаясь внутри магнита, не могут пересекать ни сам магнит, ни какой-либо другой участок замкнутого токопроводящего контура – это и является причиной отсутствия наведенной ЭДС. Следовательно, *наведенная в токопроводящем контуре ЭДС – это результат пересечения контура движущимися магнитными силовыми линиями.*

§5.15. ЭДС, наведенная в витке, охватывающем магнитную ветвь

Можно встретить утверждение, что в случае изменения в магнитной ветви значения магнитной индукцией, в токопроводящем витке, охватывающем магнитную ветвь, наводится *вихревая ЭДС*. Однако утверждения о вихревом характере ЭДС, наведенной в охватывающем магнитную ветвь витке, не согласуются с результатами обмеров этого витка.

При проведении обмеров витка использовался изображенный на рис. 5.9 трансформатор, к первичной обмотке W_1 которого подводится переменное напряжение значением **220 вольт**. На магнитную цепь трансформатора навивается, на время проведения эксперимента, дополнительный виток W_B , на отдельных участках которого и производятся замеры. Выводы вторичной обмотки трансформатора разомкнуты (нагрузка трансформатора отсутствует), следовательно, вторичная обмотка никакого влияния на результаты эксперимента не оказывает, поэтому на рис. 5.9 вторичная обмотка трансформатора не показана.

Первичная обмотка имеет 220 витков, поэтому, если к первичной обмотке W_1 подводится напряжение значением 220 вольт, то каждый виток находится под влиянием напряжения равного одному вольту, и это напряжение уравновешено наведенной в первичной обмотке ЭДС. Следовательно, в каждом витке первичной обмотки W_1 , а соответственно и в дополнительно навитом витке W_B наводится ЭДС равная *одному вольту*.

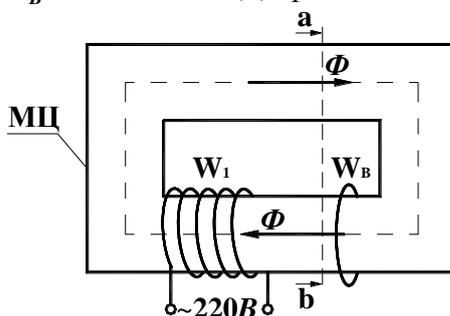


Рис. 5.9. Магнитная цепь МЦ с обмоткой возбуждения W_1 и дополнительным витком W_B

Дополнительный виток W_B , изготовлен из отрезка нихромовой проволоки, диаметр которой равен 0,5 миллиметра – это позволяет избежать перегрева витка во время замеров. Дополнительный виток W_B (рис. 5.9) можно изготовить из любого токопроводящего материала, и это не повлияет на результаты обмеров. Результаты обмеров всецело зависят от значения наведенной в витке ЭДС, а значение ЭДС определяется с помощью закона Фарадея (5.9), и это значение никоим образом не зависит от активного сопротивления витка.

Поверхность поперечного сечения магнитной ветви, которую охватывает дополнительный

виток W_B , имеет форму квадрата, такую же форму имеет и сам виток, поэтому участки дополнительного витка AB , BC , CD , DA (рис. 5.10) имеют одинаковую протяженность.

На рис. 5.10 показаны сечения магнитной цепи, выполненные секущей плоскостью ab (рис. 5.9) и схемы замеров напряжения, присутствующего на отдельных участках витка W_B , а внизу каждой картинке (рис. 5.10) приведены результаты обмеров ($U_{AB} = 0,25 \text{ В}$, $U_{BC} = 0,25 \text{ В}$, $U_{CD} = 0,25 \text{ В}$, $U_{DA} = 0,25 \text{ В}$), эти результаты не противоречат тому, что в короткозамкнутом витке наводится вихревая ЭДС. Однако действие ЭДС распространяется только на внутреннюю цепь источника ЭДС (§3.9, § 5.4), а вольтметр V и подсоединенные к нему измерительные проводники – это внешняя по отношению к источнику ЭДС электрическая цепь, поэтому вольтметр измеряет значение напряжения, а нас интересует значение ЭДС.

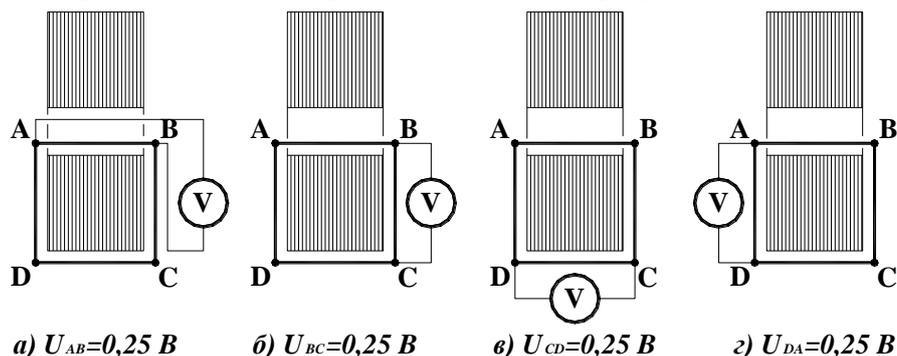


Рис. 5.10. Измерение напряжения на участках короткозамкнутого витка

Разность потенциалов точек $A-B$ можно измерить, пользуясь показанной на рис. 5.10-а схемой, а можно использовать схему, изображенную на рис. 5.11-а. В первом случае вольтметр фиксирует разность потенциалов $U_{AB} = 0,25 \text{ В}$ (рис. 5.10-а), а во втором случае эта разность в три раза больше: $U_{AB} = 0,75 \text{ В}$ (рис. 5.11-а).

Полученные результаты обмеров позволяют сделать предположение, что в отрезке $A-B$ наводится ЭДС $E = 1 \text{ В}$, а из этой ЭДС вычитается падение напряжения $U_{AB} = 0,25 \text{ В}$, то есть отрезок AB как раз и является источником ЭДС, а разность потенциалов $U_{AB} = 0,75 \text{ В}$ (рис. 5.11-а) – это электрическое напряжение на выводах источника ЭДС. Если это так, то значение ЭДС должно быть больше напряжения ($U_{AB} = 0,75 \text{ В}$) на величину падения напряжения внутри источника ЭДС. И это предположение прекрасно подтверждается следующим замером.

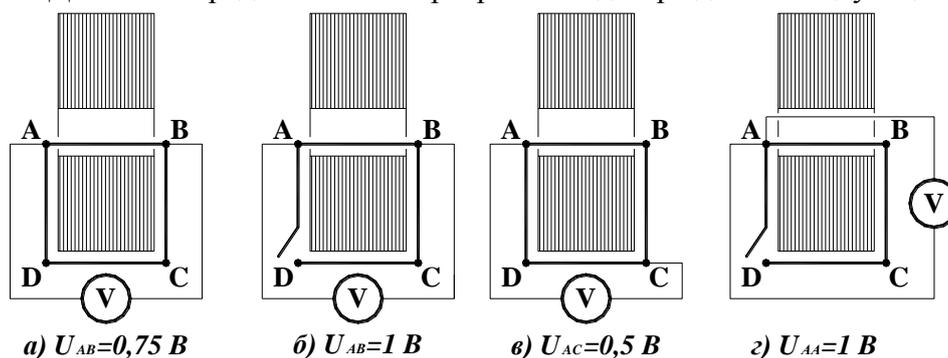


Рис. 5.11. Измерение напряжения на участках витка, находящегося в двух его состояниях

Производя измерения разности потенциалов точек $A-B$ (рис. 5.11-а), необходимо разомкнуть виток. На рис. 5.11-б это размыкание сделано в точке D . В момент размыкания витка разность потенциалов точек $A-B$ скачком изменяется на величину падения напряжения внутри источника ЭДС $U_{AB} = 0,25 \text{ В}$ (рис. 5.10-а) и увеличивается со значения $U_{AB} = 0,75 \text{ В}$ (рис. 5.11-а), до значения $U_{AB} = 1 \text{ В}$ (рис. 5.11-б).

При разомкнутом витке значение наведенной ЭДС E равно значению напряжения U_{AB} ,

присутствующему на выводах источника ЭДС: $U_{AB} = E_{AB} = 1 \text{ В}$ (рис. 5.11-б). Следовательно, ЭДС наводится только в том участке витка, который проходит в окне магнитопровода, но не наводится во всех остальных участках витка.

С помощью схемы, представленной на рис. 5.11-в, измерена разность потенциалов $U_{AC} = 0,5 \text{ В}$. Получается так, что из разности потенциалов $U_{AB} = 0,75 \text{ В}$ (рис. 5.11-а) вычиталась величина падения напряжения $U_{BC} = 0,25 \text{ В}$ (рис. 5.10-б), что является дополнительным подтверждением того, что ЭДС наводится только в участке AB .

Вольтметр, измерительные концы которого подсоединены к одной точке витка, показывает разность потенциалов $U_{AA} = 1 \text{ В}$ (рис. 5.11-г). Однако в одной точке пространства в принципе невозможно существование разности электрических потенциалов. Следовательно, разность потенциалов может появиться только в результате действия ЭДС, наведенной в самих подсоединенных к вольтметру измерительных проводниках. Как бы ни располагались измерительные проводники, подсоединенные к вольтметру и к одной точке витка, пока один из проводников не будет пропущен в окно магнитопровода, показания вольтметра будут нулевыми. Это является подтверждением того, что ЭДС наводится в отрезке подсоединенного к вольтметру проводника предварительно пропущенного в окно магнитопровода.

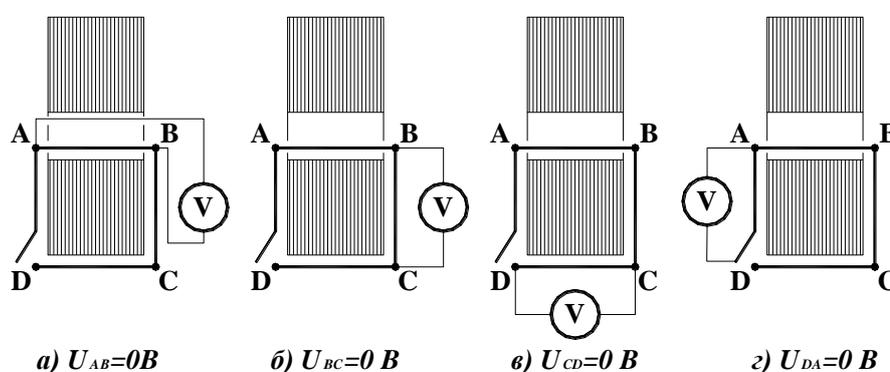


Рис. 5.12. Измерение напряжения на участках разомкнутого витка

Если в отрезке AB наводится ЭДС, то и в любом другом проводнике, пропущенном в окно магнитопровода, будет наводиться такая же ЭДС, и это подтверждается замером, выполненным по представленной на рис. 5.12-а схеме. В этом случае показания вольтметра оказываются нулевыми. Это объясняется тем, что ЭДС, наведенная в участке AB , уравновешена ЭДС, наведенной в измерительном проводнике, который подсоединен к вольтметру и пропущен в окно магнитопровода. И при замере по схеме рис. 5.10-а ЭДС, наведенная на участке AB , уравновешена наведенной в измерительном проводнике ЭДС, а вольтметр фиксирует падение напряжения $U_{AB} = 0,25 \text{ В}$ на участке AB .

Если бы в витке наводилась *вихревая* ЭДС, то она наводилась бы на всех (AB , BC , CD , DA) участках витка независимо от того замкнут этот виток или разомкнут. Однако результаты обмеров (рис. 5.12-б, -в, -г) свидетельствуют о том, что ЭДС наводится только на том участке витка, который пропущен в окно магнитопровода. Следовательно, *в витке, охватывающем магнитную ветвь, наводится потенциальная (невихревая) ЭДС, и ее действие уравновешенно разностью потенциалов, которая существует в потенциальном (невихревом) электрическом поле – вихревые электрические поля в природе не встречаются.*

На рис. 5.13 приведены изображения, которые используются в качестве иллюстрации процессов взаимного преобразования электрических и магнитных полей, наводимых в процессе распространения электромагнитных волн.

На рис. 5.13-в изображена одна из тех электрических силовых линий E , с помощью которых изображается *вихревое электрическое поле*, появляющееся в результате изменения значения магнитной индукции B (рис. 5.13-б). Если предположить, что все точки, расположенные на линии E , обладают одинаковым электрическим потенциалом, то это будет вовсе не электрическая силовая линия, а линия, проведенная на эквипотенциальной

поверхности **потенциального** электрического поля.

Стрелки, нанесенные на окружность электрической силовой линии E , указывают направление, в котором увеличиваются значения положительного потенциала, точек, расположенных на окружности этой электрической силовой линии. Следовательно, если выйти из точки A и обходить окружность E в направлении вектора v (рис. 5.13-в), то электрический потенциал каждой **последующей точки**, встречающейся на окружности E при ее обходе, будет выше потенциала, которым обладала **ранее пройденная точка**.

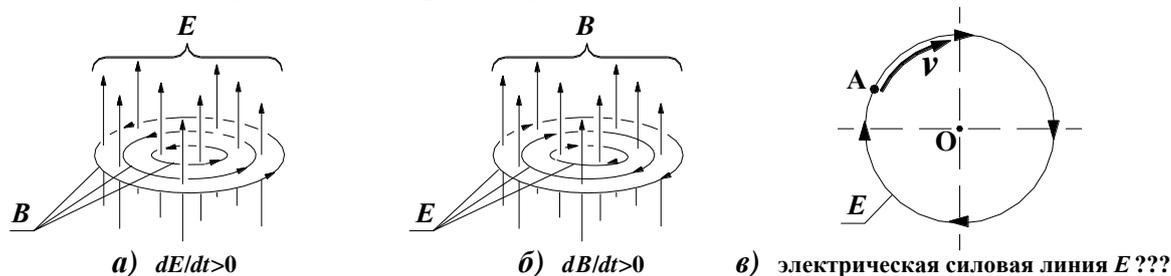


Рис. 5.13. Взаимные преобразования электрических и магнитных полей

Потенциал точки A можно приравнять нулевому значению, и если после этого обходить окружность E , то значение потенциала будет непрерывно увеличиваться и достигнет некоторого положительного значения при возврате в точку A – это означает, что точка A , как и любая другая точка, расположенная на окружности E , должна обладать разностью электрических потенциалов. Это противоречит не только здравому смыслу, но и законам природы. Это означает, что **невозможно графически изобразить вихревое электрическое поле, да и мысленно представить вихревое электрическое поле задача не простая, следовательно, при распространении ЭМ волн наводятся потенциальные (не вихревые) электрические поля**. К тому же при изменении значения магнитной индукции, в соответствии с законом Фарадея (8.9), наводится ЭДС, но никак не вихревое электрическое поле, следовательно, изображения, представленные на рис. 5.13 не соответствуют процессам распространения электромагнитных волн.

Между ЭДС и силами электрического поля существует принципиальная разница. Вспомним еще раз, что действие наведенной в проводнике ЭДС направлено на разделение разноименных электрических зарядов {§5.4}, а наведенное электрическое поле, с его разностью электрических потенциалов, является результатом действия ЭДС, но действие электрического поля (действие разности потенциалов) направлено на слияние разноименных зарядов. И если в проводниках разность электрических потенциалов появляется одновременно с наведенной ЭДС, то при распространении электромагнитных волн в вакууме, ЭДС может создать электрическое поле, только при наличии в вакууме разноименных зарядов, подробнее об этом см. {гл. 12}. Следовательно, при изменении значения магнитной индукции наводится только ЭДС, а электрическое поле эта ЭДС может создать только при наличии разноименных зарядов.

Результаты обмеров витка, охватывающего магнитную ветвь, свидетельствуют о том, что численное значение и направление наведенной в витке ЭДС лишь косвенно зависят от изменений магнитного потока, замыкающегося в магнитной цепи. **Численное значение и направление наведенной в витке ЭДС непосредственно зависят от процессов, происходящих в окне магнитопровода. Разгадка «парадокса» Геринга и результаты обмера витка, охватывающего магнитную ветвь, указывают на то, что в случае изменения значения тока I , текущего в обмотке возбуждения W_1 (рис. 5.9) магнитное поле, наведенное в окне магнитопровода, находится в состоянии движения.**

Для обмеров витка, охватывающего магнитную ветвь, можно использовать любой, оказавшийся под рукой трансформатор, а не тот, первичная обмотка которого состоит из 220 витков, а поперечное сечение магнитной цепи имеет форму квадрата. При использовании другого трансформатора численные значения, полученные в процессе обмеров, будут отличаться от тех, что приведены в данном тексте. Однако вновь полученные результаты будут свидетельствовать о потенциальном характере наведенной ЭДС и о подвижности магнитного

поля, наведенного в окне магнитопровода.

§5.16. Магнитное поле, наведенное прямым и изогнутым соленоидом

Результаты обмера витка, охватывающего магнитную ветвь, свидетельствуют о том, что магнитные силовые линии пресекают только те участки витка, которые проходят в окне магнитопровода, но не пересекают боковых и наружных сторон витка, и этому явлению есть свое объяснение.

На рис. 5.14-а изображен соленоид и симметричное относительно его продольной оси sn магнитное поле, которое наведено постоянным током I , текущим в витках соленоида.

При изгибе соленоида (рис. 5.14-б) магнитные силовые линии, подчиняясь действию магнитных сил продольного натяжения и сил поперечного отталкивания (§4.21), соскальзывают к центру дуги изгиба. Это приводит к тому, что в процессе изгиба соленоида количество магнитных силовых линий, оказавшихся с внутренней стороны изгиба, увеличивается, а с внешней стороны изгиба – уменьшается. Следовательно, *магнитные потоки, подобно электрическим токам, замыкаются по кратчайшему пути (по пути наименьшего сопротивления)*.

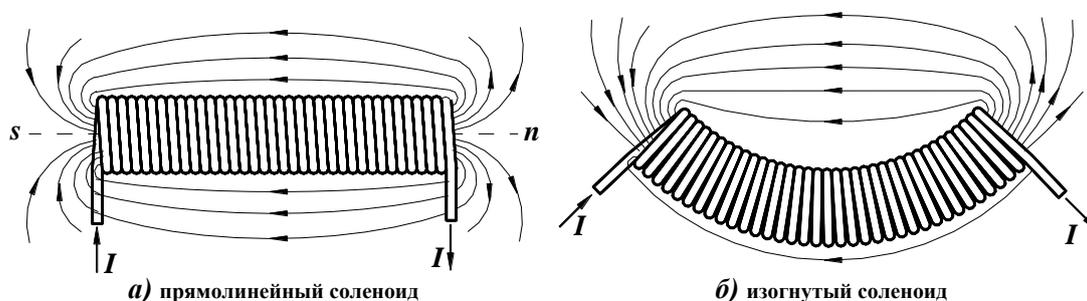


Рис. 5.14. Магнитное поле наведенное током I , текущим в витках соленоида

Если соленоид будет изогнут в кольцо, сечение такого кольца вертикальной плоскостью показано на рис. 5.15, то все магнитные силовые сместятся внутрь кольца, образованного витками соленоида, и не будут выходить за внешние границы этого кольца. Следовательно, при протекании *постоянного* тока I , в витках изогнутого в кольцо соленоида, этими витками наводится магнитное поле, преобладающая часть силовых линий которого замыкается в пространстве, охваченном витками соленоида (линии B_1 , рис. 5.15). Вторая, меньшая часть наведенных магнитных силовых линий замыкается в пространстве, охваченном внутренними участками витков соленоида (линии B_2 , рис. 5.15).

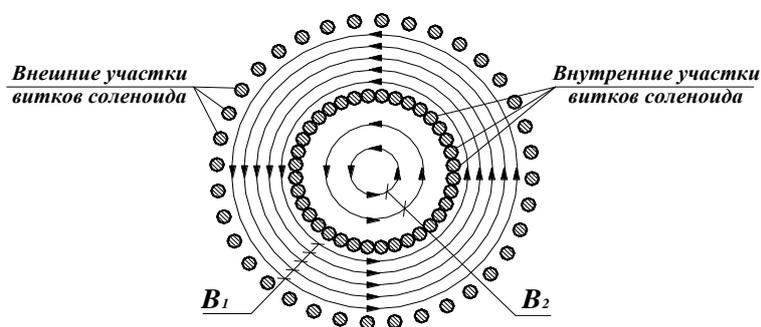


Рис. 5.15. Сечение изогнутого в кольцо соленоида

За внешними границами образованного соленоидом кольца отсутствуют магнитные силовые линии, которые тянутся вдоль всей длины изогнутого в кольцо соленоида. За внешними границами соленоида могут присутствовать *магнитные силовые линии, охватывающие один или несколько витков соленоида – это так называемые магнитные потоки рассеяния*, которые на рис. 5.15 не показаны.

В витках прямолинейного соленоида (рис. 5.14-а) может течь постоянный ток самых

разных значений. И при любом значении тока, в процессе изгиба соленоида, магнитные силовые линии будут соскальзывать в сторону центра дуги изгиба, а после образования кольца за его внешними границами будут отсутствовать магнитные силовые линии, охватывающие всю длину соленоида. Это означает, что *переменный ток I* , текущий в витках изогнутого в кольцо соленоида, наводит *магнитное поле, силовые линии которого в процессе своего движения не выходят за внешние границы соленоида и не пересекают внешних и боковых участков витков, только внутренние участки витков пересекаются магнитными силовыми линиями*. Это утверждение согласуется с теми результатами, которые получены в процессе обмера витка, охватывающего магнитную цепь (§5.15).

При увеличении значения тока, текущего в витках соленоида, увеличивается значение индукции магнитного поля, наведенного внутри витков изогнутого в кольцо соленоида, а это означает, что внутри витков соленоида увеличивается количество магнитных силовых линий. Результаты замеров витка (§5.15) указывают на то, что каждый дополнительно появившейся внутри витков соленоида контур магнитной силовой линии B_2 (рис. 5.15) зарождается внутри пространства, охваченного кольцом соленоида, и этот контур, расширяясь, перемещается внутрь витков соленоида, пересекая при этом внутренние стороны витков.

§5.17. Силы, приводящие в движение магнитное поле

При рассмотрении рис. 5.14 и рис.5.15 было установлено, что всякие изменения значения индукции магнитного поля приводят это поле в состояние движения. Это движение происходит под действием *продольных сил натяжения* и *поперечных сил расширения* {§4.21}. Но помимо этих двух сил существует еще и третья сила, участвующая в процессе движения магнитного поля. Познакомимся и с этой третьей силой.

Экспериментируя с двумя постоянными магнитами, можно убедиться в том, что эти магниты, взаимодействуя между собой посредством собственных магнитных полей, могут приходиться в состояние ускоренного движения. Следовательно, подчиняясь действию сил магнитного поля, магниты, обладающие определенной массой, обретают дополнительную кинетическую энергию. Это можно объяснить только тем, что в любом магнитном поле, как и в любом другом силовом поле, силы которого способны вызвать ускоренное движение массы, заключена энергия, и эта энергия способна преобразовываться в кинетическую энергию движущейся массы или в какой-либо другой вид энергии.

Энергия, является одной из форм существования материи, поэтому энергия не может бесследно исчезнуть или появиться из ничего, подтверждением тому является весьма многочисленные и безуспешные попытки создания вечного двигателя (двигателя обладающего КПД>100%). Энергия не исчезает и не появляется, но может находиться в состоянии взаимобмена между двумя и более объектами. Изменение энергетического состояния любого тела, в том числе и магнитного поля, происходит в процессе совершения работы. При этом количество приобретенной энергии, как и количество энергии, утерянной тем или иным объектом, равно количеству совершенной работы.

Любое магнитное поле находится под действием *продольных сил натяжения* и *поперечных сил расширения*, и как раз эти силы придают ускорение взаимодействующим между собой магнитам. Это означает, что действием продольных и поперечных сил заявляет о себе заключенная в магнитном поле энергия. В статике сила не способна совершить работу, а изменение энергетического состояния любого тела происходит в процессе совершения работы, следовательно, при изменении энергетического состояния магнитного поля это магнитное поле, подчиняясь действующим в его объеме продольным и поперечным силам, приходит в состояние движения.

Силы продольного натяжения стремятся уменьшить длину замкнутого контура каждой магнитной силовой линии до минимально-возможных размеров (до размеров точки), а силы поперечного расширения стремятся раздвинуть соседние магнитные силовые линии, способствуя тем самым увеличению контура каждой магнитной силовой линии до максимально-возможных размеров. Следовательно, *продольные силы находятся в состоянии*

противодействия с поперечными силами.

Пока неизменным остается значение индукции магнитного поля, до тех пор продольные силы, действующие внутри магнитного поля, находятся в состоянии **уравновешенного** противодействия с поперечными силами, а само магнитное поле остается неподвижным. При нарушении равновесного состояния между продольными и поперечными силами, магнитное поле, подчиняясь действию преобладающей силы, приходит в состояние движения, что и является причиной изменения значения магнитной индукции.

При неизменном значении текущего в проводнике тока, остаются неизменными и значения продольных и поперечных сил, действующих на наведенное током магнитное поле. Увеличение значения тока сопровождается увеличением количества магнитных силовых линий, в этом случае силы продольного натяжения, действующие на ранее существовавшие магнитные силовые линии, сохраняют свое значение, а появление дополнительных силовых линий приводит к увеличению значения поперечных сил расширения. Следовательно, при увеличении значения тока, магнитные силовые линии, подчиняясь действию преобладающих поперечных сил, приходят в состояние движения, в процессе которого эти линии удаляются от продольной оси проводящего ток проводника.

При уменьшении значения тока, уменьшается количество наведенных током магнитных силовых линий, что приводит к преобладанию сил натяжения над силами расширения. Следовательно, при уменьшении значения тока, магнитные силовые линии движутся в сторону продольной оси проводящего ток проводника.

Значение индукции B наведенного током I магнитного поля пропорционально значению тока: $B = \mu_0 \mu \cdot I / 2\pi R$ {4.11}, в свою очередь количество энергии W , заключенной в магнитном поле, пропорционально квадрату тока, наводящего это магнитное поле: $W = L \cdot I^2 / 2$ {6.19}, то есть количество энергии W , пропорционально квадрату магнитной индукции. Это означает, что при изменении значения магнитной индукции изменяется количество заключенной в магнитном поле энергии, в этом случае **не могут оставаться не у дел** продольные и поперечные силы потому, что как раз действием этих сил заявляет о себе заключенная в магнитном поле энергия. При изменении значения магнитной индукции продольные и поперечные силы совершают работу, значение которой равно величине, на которую изменилось количество энергии, заключенной в магнитном поле. Сила может совершать работу только в движении – это является еще одним подтверждением того, что при изменении значения магнитной индукции, магнитное поле находится в состоянии движения.

Движение магнитного поля происходит в результате нарушения равновесного состояния между продольными и поперечными силами. Однако третий закон Ньютона соблюдается во всех случаях. Следовательно, в случае нарушения равновесного состояния между продольными и поперечными силами в действие вступает третья сила, которая поддерживает взаимную уравновешенность всех сил, действующих на магнитные силовые линии. Этой третьей силой является сила инерции, действующая на неравномерно движущиеся магнитные силовые линии.

Изменения количества энергии $W = Fvt$, заключенной в магнитном поле, происходят под действием преобладающей (продольной или поперечной) силы F и в процессе преодоления расстояния $s = vt$. Сила не может достигать неограниченно большого значения, а расстояние s не может в процессе движения преодолеться мгновенно. Следовательно, процесс изменения количества энергии – это растянутый во времени процесс – инерционный процесс, такой процесс могут поддерживать только силы инерции. Силы инерции появляются при неравномерном движении, следовательно, **магнитное поле всегда движется с таким ускорением, при котором в состоянии взаимной уравновешенности оказываются три силы – это продольные, поперечные силы и сила инерции.**

Литература

1. Кузнецов М. И. Основы электротехники. Издательство «Высшая школа». Москва, 1970.
2. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. Электротехника. «Энергоатомиздат».

- Москва, 1985 г.
3. Мякишев Я. М., Буховцев В. В. Физика, учебник для 10 класса. Издательство «Просвещение», Москва, 1977 г.
 4. Атабеков Г. И., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С., Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники. В трех частях. Издательство «Энергия», Москва, 1970.
 5. Кухлинг Х. Справочник по физике. Перевод с немецкого. Издательство «Мир», Москва, 1985 г.
 6. Берк Г. Справочное пособие по магнитным явлениям. Перевод с английского. Энергоатомиздат. Москва. 1991.

Более полная информация содержится на сайте <http://sites.google.com/site/nikolanech/>