**ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

**ЭДС индукции в прямоугольной рамке с перемещающейся стороной.** *(Рамка расположена в однородном магнитном поле)*

В

С

 **FЛ**

**n**$ ⨂$

 **V**

а

 ***l***

**В**$ ⨀$

D

А

$$∆x$$

Токопроводящий контур (прямоугольник АВСД) расположен в плоскости страницы. Сторона СД прямоугольника перемещается со скоростью $\overbar{V}$. В зоне расположения контура имеется однородное магнитное поле, вектор магнитной индукции $\overbar{В}$ этого поля направлен перпендикулярно странице в нашу сторону. Кружочек с точкой обозначает вектор направленный от страницы на нас.

В результате перемещения стороны СД возникает сила Лоренца, которая действует на заряды, расположенные в подвижном проводнике. Определим направление действия силы Лоренца на положительные заряды при помощи правила левой руки.

Для этого расположим ладонь левой руки так, что бы вектор магнитного поля $\overbar{В}$ был направлен в ладонь, а четыре пальца левой руки были направлены в направлении вектора скорости $\overbar{V}$. Тогда большой палец покажет направление действия силы Лоренца на положительный заряд. Правило левой руки показывает нам, что сила Лоренца направлена вниз, от точки С к точке Д.

Итак, в подвижном проводнике СД имеется поле сторонних сил. Будем называть электродвижущую силу, характеризующую это поле ЭДС индукции. Обозначим её буквой Ԑи.

Для дальнейших рассуждений необходимо выбрать направление обхода контура АБСД и направление нормали к поверхности, ограниченной контуром АБСД. От выбора направления обхода контура зависит знак ЭДС индукции, а от выбора направления нормали зависит знак потока магнитной индукции. Эти направления связывают между собой правилом буравчика.

Следует заметить, что такой подход к выбору направления нормали и направления обхода связывает между собой знаки ЭДС индукции и магнитного потока.

Будем обходить контур по часовой стрелке, как показывает вектор $\overbar{l}$. Тогда нормаль (вектор $\overbar{n}$) будет направлена от нас, в глубину листа. Кружочек с крестиком означает вектор, направленный от нас.

 Докажем следующее утверждение.

***ЭДС индукции (Ԑи), возникающая в подвижной стороне рамки при её перемещении, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную рамкой, взятой с обратным знаком:***

**Ԑи =** $-\frac{∆Φ}{∆t}$**.**

Доказательство:

$Ԑ\_{и}=Е$*ст*$∙a=$$\frac{F\_{л}}{\left|е\right|}∙a=\frac{\left|е\right|VB}{\left|e\right|}∙a=B∙V∙a=B\frac{∆x}{∆t}∙a=-\frac{B\_{n}∙∆S}{∆t}=-\frac{∆Φ}{∆t}.$

После первого знака равенства запись осуществлена на том основании, что и разность потенциалов и ЭДС индукции при перемещении в однородном электрическом поле вдоль силовых линий по модулю равны произведению абсолютных величин напряжённости поля и перемещения.

Так как направление силы Лоренца совпадает с выбранным нами направлением обхода контура, то выражение после первого знака равенства положительно. В противном случае в этом месте следует ставить знак "минус".

После второго знака равенства запись осуществлена на том основании, что в данном случае модуль напряжённости стороннего поля равен отношению модуля силы Лоренца, действующей на заряд электрона, к модулю заряда электрона.

После третьего знака равенства запись осуществлена на том основании, что модуль силы Лоренца равен произведению модулей заряда электрона, скорости перемещения контура и вектора магнитной индукции.

После четвёртого и пятого знаков равенства преобразования предельно просты и в пояснениях не нуждаются.

После шестого знака равенства заменили модуль вектора магнитной индукции на проекцию вектора на нормаль. А так как в данном случае эта проекция отрицательна, то в следующей записи появился знак минус.

После седьмого знака равенства запись произведена на основании определения потока магнитной индукции.

Итак, мы доказали, что ЭДС индукции в приведённом примере равна скорости изменения потока индукции, взятой с обратным знаком.

Давайте пофилософствуем.

На поверхности воды два судна. Мы знаем, что выполняется закон всемирного тяготения, в соответствии с которым суда притягиваются друг к другу. Но гравитационные силы в этом случае чрезвычайно малы и неощутимы. Давайте спросим себя, а можем ли мы смоделировать такое же явление, как и закон всемирного тяготения, но только добиться того, чтобы силы притяжения были ощутимы?

Кто-то скажет, что это бред. Но, извините, я скажу, что можем.

Давайте сформулируем новый закон всемирного тяготения. Для этого подберём гравитационную постоянную такую чтобы сил взаимного тяготения судов стали такими, какими мы захотим. Составим таблицу зависимости этих сил от расстояния между судами, соответствующую нашему закону.

А теперь берём два буксира, два троса и два динамометра. Даём указание командам буксиров при помощи тросов и динамометров создать усилия, приложенные к судам, соответствующие нашему закону.

Улыбаетесь? А может быть сердитесь? Тогда объясните мне устройство реального механизма, осуществляющего реальный закон всемирного тяготения. Не можете? Тогда не улыбайтесь и не сердитесь.

Мы знаем, что закон всемирного тяготения действует. И больше о нём ничего не знаем.

Так же и закон Кулона. Для нас это экспериментально установленный факт. Единственно установлено, что материально существуют гравитационное, электрическое и магнитное поля. Но механизм, приводящий в действие закон тяготения и закон Кулона, остаётся для нас тайной.

На этом проблемы взаимодействия масс зарядов и полей не исчерпываются. Мы ещё не толковали о силе Лоренца. Чтобы действовала сила Лоренца, необходимо устройство, котороё определяет количество электричества, магнитную индукцию, скорость перемещения заряда. По этим данным надо определить величину и направление силы Лоренца и воспроизвести её.

Не будем ломать голову, как смоделировать силу Лоренца. Однако задумаемся над тем как эта сила возникает реально. То ли электрон сам исследует обстановку и маневрирует согласно закону Лоренца? То ли исполнителем закона Лоренца является само магнитное поле? То ли существует некая третья субстанция, отвечающая за исполнение закона Лоренца?

Эти вопросы остаются без ответа. Но на этом вопросы не заканчиваются.

Закон Фарадея. В магнитном поле любой конфигурации располагается замкнутый проводящий контур. Границы контура перемещаются, как только им заблагорассудится. В контуре возникает ЭДС индукции. Для этого кто-то обязан рассчитать величину магнитного потока через поверхность ограниченную контуром, определить скорость изменения магнитного потока и воссоздать сторонние силы, необходимые для того, чтобы закон Фарадея был исполнен.

С ума можно сойти! Но закон магнитной индукции существует и более того, выполняется. И самое главное мы можем объяснить его. И это объяснение уже промелькнуло перед нами, но мы его не заметили.

При выводе формулы Фарадея используется выражение:

Ԑи $=BVa. $

Мы прошли мимо него и не обратили на него никакого внимания. А следовало бы. Полученная формула отражает очень важное явление, о котором в учебнике Г. Я. Мякишева говорится только после того, как сформулирован закон магнитной индукции. Сформулируем закон, содержащийся в этой формуле.

***Пусть проводник длиной а расположен в магнитном поле перпендикулярно его силовым линиям. Пусть модуль магнитной индукции поля равняется В. Пусть проводник перемещается в пространстве со скоростью V, перпендикулярной проводнику и силовым линиям магнитного поля. Тогда на концах проводника возникает ЭДС, равная произведению модуля магнитной индукции, скорости проводника и длины проводника.***

Именно данный закон (вытекающий из закона Лоренца) и лежит в основе закона электромагнитной индукции. А то, что позже из этого выражения получается скорость изменения магнитного потока, это забавный физико-математический фокус, дающий удобную возможность вычислить ЭДС индукции.

**ЭДС индукции в кольце, которое перемещается в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом.**

$ \overbar{n}$

**Вв**

**В**

***L***

***Fл***

***V***

$ \overbar{l }$

***М***

$∆$***h***

**Вг**

 N

 S

*Рис. 1*

На рисунке изображён магнит, расположенный вертикально. Северный полюс магнита обозначен буквой N. Южный полюс - буквой S.

В магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, в горизонтальной плоскости расположено проволочное кольцо. Центр окружности кольца расположен на оси магнита. Длина окружности кольца равна L.

На кольце выбрана произвольная точка М. Вектор $\overbar{В}$ это вектор магнитной индукции в точке М. $\overbar{B}$в это вертикальная составляющая вектора магнитной индукции, а $\overbar{В}$г - его горизонтальная составляющая. То есть

$\overbar{B}$ = $\overbar{ В}$в + $\overbar{B}$г.

Кольцо перемещается вниз со скоростью $\overbar{V}$. За время $∆$t оно переместилось на расстояние $∆$h. Считаем, что $∆$h$>0.$ Значит абсолютная величина скорости перемещения кольца V равна:

$$V=\frac{∆h}{∆t}.$$

Кольцо перемещается в магнитном поле. Следовательно, на подвижные заряды, расположенные внутри кольца, действует сила Лоренца. Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, следует определять при помощи правила левой руки.

Расположим левую руку так, чтобы вектор $\overbar{В}$г входил в ладонь, а четыре пальца были направлены так, как направлен вектор скорости $\overbar{V.}$ Тогда большой полец покажет, что вектор силы Лоренца направлен по часовой стрелке, если смотреть на кольцо сверху.

Сила Лоренца, действующая на заряд в проводнике свидетельствует о наличии ЭДС индукции движущемся кольце.

Докажем следующее утверждение.

***ЭДС индукции (Ԑи), возникающая в кольце (рис. 1) при его перемещении, равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную кольцом, взятой с обратным знаком:***

**Ԑи =** $-\frac{∆Φ}{∆t}$**.**

Доказательство.

Ԑи = $- $ЕстL = $-$ $\frac{F\_{л}}{\left|е\right|}$L = $-$ $\frac{\left|е\right|VB\_{г}L}{\left|е\right|} $= $-$ VBгL = $-\frac{∆h}{∆t}$BгL = $-B\_{г}\frac{∆hL}{∆t}$ = $-$Вг$\frac{∆S}{∆n}$ = $-\frac{∆Φ}{∆t}$.

Осуществлённые восемь преобразований предельно просты, и достаточно хорошо подготовленный читатель должен понять их без особых усилий. Но на всякий случай прокомментируем их.

После первого знака равенства запись осуществлена на том основании, что и разность потенциалов и ЭДС индукции при перемещении в однородном электрическом поле вдоль силовых линий по модулю равны произведению абсолютных величин напряжённости поля и перемещения. Знак минус объясняется тем, что в данном случае направление обхода кольца и направление силы Лоренца противоположны друг другу.

После второго знака равенства запись осуществлена на том основании, что в данном случае модуль напряжённости стороннего поля равен отношению модуля силы Лоренца, действующей на заряд электрона, к модулю заряда электрона.

После третьего знака равенства запись осуществлена на том основании, что модуль силы Лоренца равен произведению модулей заряда электрона, скорости перемещения кольца и горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции.

После четвёртого, пятого и шестого знаков равенства преобразования предельно просты, и в комментарии не нуждаются.

После седьмого знака равенства запись осуществлена на том основании, что площадь $∆S$ (площадь цилиндрической поверхности$,$ описанной кольцом), равна произведению длины кольца L на пройденное им расстояние $∆h$.

После восьмого знака равенства запись осуществлена на том основании, что поток магнитной индукции $∆Φ$ через поверхность $∆S$ можно рассматривать, как приращение потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную кольцом, полученное при перемещении кольца.

Из рассмотренных примеров видно, что закон электромагнитной индукции является следствием закона Лоренца, который в свою очередь вытекает из закона Ампера.