

Теория движения электромагнитного поля.

4. Движение электромагнитного поля и электродинамика

Л.Н. Войцехович

В работе показана возможность и необходимость распространения принципа движения электромагнитного поля на электродинамические процессы. На основе анализа известных парадоксов электромагнетизма также показано, что закон электромагнитной индукции Максвелла является частным случаем закона электромагнитной индукции Фарадея. Рассмотрены физические причины и условия движения компонент электромагнитного поля.

4.1. Введение

В работе [1] мы рассмотрели движение неизменных во времени электрических и магнитных полей, создаваемых движущимися физическими источниками. В основе теории, описывающей эти явления, лежит специальная теория относительности Эйнштейна, конкретнее, преобразования Лоренца для электромагнитного поля. В противоположность этому, электродинамика рассматривает случаи, когда электромагнитное поле изменяется во времени или даже потеряло связь с исходным источником и распространяется в пространстве и времени. Такие процессы рассматривает совсем другая теория электромагнетизма – электродинамика Максвелла. На стыке теорий в некоторых случаях возникают парадоксы, рассмотрение которых является одной из задач настоящей работы.

Вот что об этой парадоксальной ситуации пишет А. Эйнштейн [2]: «Известно, что электродинамика Максвелла – как её обычно понимают в настоящее время – при применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, как кажется, не присуща этому явлению. Возьмем, к примеру, электродинамическое взаимодействие магнита и проводника. Наблюдаемое явление зависит только от относительного движения проводника и магнита, тогда как обычное мнение рисует резкое различие между этими двумя случаями, в которых либо одно, либо другое тело находится в движении. Ибо, если магнит находится в движении, а проводник покоится, в окрестности магнита возникает электрическое поле с определенной плотностью энергии, создавая ток там, где расположен проводник. Но если магнит

покоится, а проводник движется, то в окрестности магнита никакого электрического поля не возникает. В проводнике, однако, мы находим электродвижущую силу, для которой не существует соответствующей энергии самой по себе, но которая вызывает – предполагая равенство относительного движения в двух обсуждаемых случаях – электрические токи по тому же направлению и той же интенсивности, как в первом случае».

Об этом же парадоксальной ситуации Фейнман пишет [3, стр. 54]: «Мы не знаем в физике ни одного другого такого примера, когда бы простой и точный общий закон требовал для своего настоящего понимания анализа в терминах *двух разных явлений*. Обычно столь красивое обобщение оказывается исходящим из единого глубокого основополагающего принципа».

Таким «единым основополагающим принципом», лежащим в основе возникновения и преобразования электромагнитного поля, может быть движение компонент электромагнитного поля. Для этого необходимо допустить, что всякое изменение магнитного потока, заключенного внутри контура, происходит путем движения силовых магнитных линий наружу или внутрь контура в зависимости от того, происходит уменьшение или увеличение магнитного потока. Для провода с током магнитные силовые линии движутся из провода наружу при увеличении тока и внутрь при его уменьшении. Аналогично для одиночного заряда при его ускорении магнитные силовые линии расходятся от заряда, а при торможении – сходятся.

Так как в таких процессах в общем случае в каждой точке электромагнитного поля отличны от нуля обе компоненты электромагнитного поля, электрическая и магнитная, то все полученные в [1] выражения, связывающие компоненты электромагнитного поля с собственной скоростью, с математической точки зрения должны быть справедливыми и в случае динамических процессов. В таком случае мы можем найти значения электрической и магнитной компонент, необходимые для вычисления собственного поля и собственной скорости, используя в качестве исходных уравнения Максвелла. Тогда решение обратной задачи, вычисление компонент электромагнитного поля исходя из полученных величин, не составит труда и будет априори правильным.

Эти рассуждения доказывают *возможность* распространения принципа движения компонент электромагнитного поля на область динамических процессов. Исходя из такого формального

математического подхода, большего сделать нельзя. Нас же интересует не только возможность, но и *необходимость* распространения этого принципа на область динамических процессов. Для этого необходимо рассмотреть случаи, когда классическая теория Максвелла не в состоянии адекватно объяснить экспериментально доказанные эффекты, но они легко объясняются с позиций принципа движения электромагнитных полей. При этом причину кажущихся противоречий, парадоксов теории будем искать в ограниченном, частном характере теории Максвелла, не учитывающей принцип движения электромагнитного поля.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы с физических позиций показать справедливость принципа движения компонент электромагнитного поля не только в случае движения поля совместно со своим источником, но и в случае электродинамических процессов.

4.2. Классический вид закона электромагнитной индукции

Рассмотрим закон электромагнитной индукции, один из законов, лежащих в основе классической теории Максвелла. Именно этот закон является одним из основных источников парадоксов в теории электромагнетизма.

Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме с успехом применяется при описании электромагнитных волн и не вызывает при этом никаких парадоксов – логических противоречий в теоретической электродинамике:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4.1)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля, \mathbf{B} – индукция магнитного поля, t – время.

Другая ситуация с законом электромагнитной индукции в интегральной форме:

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}, \quad (4.2)$$

где L – замкнутый контур, охватывающий поверхность S , а $d\mathbf{l}$ и $d\mathbf{s}$ – соответственно векторы элементов длины контура L и его поверхности S .

Левая часть уравнения (4.2) по определению равна электродвижущей силе \mathcal{E} в контуре L :

$$\mathcal{E} = \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}. \quad (4.3)$$

Интеграл в правой части (4.2) равен скорости изменения потока вектора индукции магнитного потока Φ , пронизывающего контур L :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}. \quad (4.4)$$

Применение закона электромагнитной индукции в виде (4.2) приводит к многочисленным парадоксам – противоречиям теории с результатами эксперимента. Рассмотрим эти парадоксы, а затем проанализируем причины их возникновения.

4.3. Парадоксы, связанные с законом электромагнитной индукции

1. Наиболее старым и наиболее известным устройством, при объяснении принципа действия которого возникает парадокс, является **униполярный генератор**, известный также как генератор Фарадея. Описание униполярного генератора приводилось нами в [1]. Разновидностью униполярного генератора является фактически и **магнитогидродинамический генератор** (МГД-генератор). МГД-генератор можно получить из униполярного генератора, если скользящий контакт K_2 ([1], рис. 2.1) переместить с оси OK_2 на поверхность диска и приблизить его к контакту K_1 , а радиус диска увеличить до бесконечности. Материал диска не имеет значения, если он является проводником. Это может быть металл, проводящая жидкость (электролит) или газ (плазма), в любом случае при движении проводящей среды в магнитном поле возникает ЭДС. Расчет ЭДС обычно производится на основе силы Лоренца, не вызывая при этом никаких затруднений и, с физической точки зрения, является вполне корректным. В то же время, расчет ЭДС по формуле (4.2), которая в теории Максвелла в настоящее время признается общим уравнением, справедливым во всех случаях, приводит к нулевому результату.

На основании, в частности, того, что сила Лоренца позволяет объяснить работу униполярного и МГД-генератора, уравнением для

силы Лоренца иногда дополняют систему уравнений Максвелла. Однако такое дополнение не устраняет противоречий современного взгляда на теорию Максвелла: в некоторых случаях явление электромагнитной индукции можно объяснить только на основании уравнения (4.2), в других – только на основе силы Лоренца, а в третьих можно использовать и тот, и другой подход. Заметим, что у Фарадея не было таких проблем, об этом, однако, речь пойдет ниже.

2. К другому типу парадокса приводят попытки применить закон электромагнитной индукции в виде (4.2) к некоторым устройствам, в которых изменение потока через замкнутый электрический контур L не приводит к появлению в контуре ЭДС. Рассмотрим примеры парадоксов этого типа.

2.1. Применение выражение (4.2) к **электрическому контуру, изображенному на рисунке 4.1**, приводит к неверному результату. Этот пример заимствован с несущественными изменениями у Фейнмана [3, стр. 55].

Две металлические пластины помещены в однородное магнитное поле \mathbf{B} , перпендикулярное плоскости пластин. Пластины

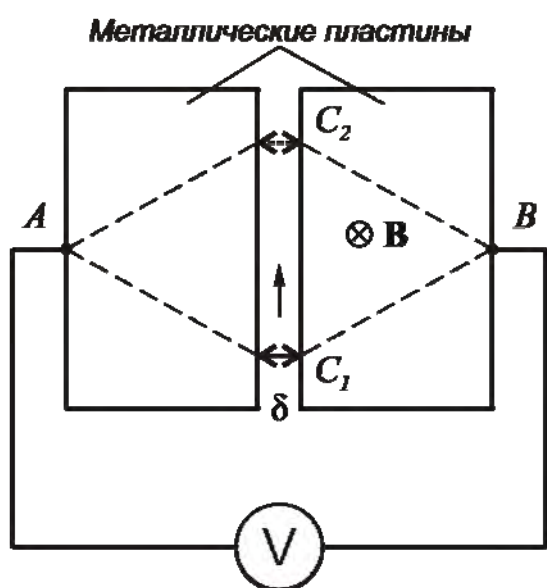


Рис. 4.1. Пример контура, увеличение магнитного потока через который не приводит к появлению ЭДС

подключены к вольтметру V и с помощью подвижного контакта образуют замкнутый контур VAC_1B . Зазор δ между пластинами считаем пренебрежимо малым. При перемещении подвижного контакта из положения C_1 в положение C_2 площадь контура и, следовательно, пересекающий его магнитный поток существенно возрастает, но ЭДС в контуре при этом не появляется вопреки закону электромагнитной индукции (4.2).

2.2. Другим примером такого же рода является **соленоид с отводами от его обмотки**, помещенный в постоянное магнитное поле. Вместо отводов от витков обмотки может быть также использован подвижный контакт, скользящий по виткам обмотки подобно скользящему контакту проволочного реостата. Для

измерения ЭДС на отводах обмотки или скользящем контакте используется вольтметр. При переключении вольтметра к различным

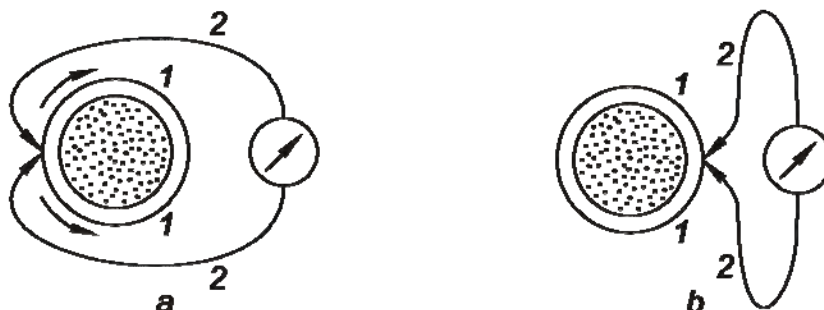


Рис. 4.2. Парадокс Геринга.

1 – металлическое кольцо; 2 – электрический контур.

отводам или скольжения контакта по виткам обмотки магнитный поток в контуре вольтметра изменяется пропорционально количеству витков, подключенных к вольтметру, но ЭДС в контуре не возникает.

2.3. Наиболее убедительным примером, доказывающим частный характер закона электромагнитной индукции в виде (4.2), является **парадокс Геринга** [4] (ссылка заимствована из работы [5]). Эксперименты по проверке парадокса Геринга многократно повторялись в различных вариантах. Для иллюстрации парадокса Геринга воспользуемся схемой, приведенной в работе [6] (рис. 4.2).

Металлическое кольцо 1 охватывает магнитное поле, направленное перпендикулярно к поверхности листа и обозначенное точками. Для определенности будем считать, нам это пригодится впоследствии, что магнитное поле создает соленоид, состоящий из двух частей. В зазоре между половинками соленоида и находится металлическое кольцо. Если магнитное поле создает намагниченный железный сердечник, то кольцо может отсутствовать, его роль будет выполнять поверхность железного сердечника.

В начальном положении контакты электрического контура, обозначенные стрелками, расположены так, что контур полностью охватывает магнитный поток (рис. 4.2a). Затем контакты начинают двигать в направлении, обозначенном стрелками, таким образом, что в конечном положении (рис. 4.2b) магнитный поток оказывается расположенным полностью вне контура. В соответствии с законом электромагнитной индукции в виде (4.2) во время движения контактов в контуре должна индуцироваться и фиксироваться

включенным в электрический контур вольтметром ЭДС, однако этого не происходит.

Несколько видоизменим эксперимент, изображенный на рис. 4.2. С этой целью удалим металлическое кольцо (рис. 4.3), а концы электрического контура подсоединим к прямому проводу 3, который может свободно двигаться в зазоре соленоида поперек магнитного поля в направлении, указанном стрелкой. Начальное и конечное положение провода 3 совпадает с положениями подвижных контактов соответственно на рисунках 4.2*a* и 4.2*b*.

В случае, показанном на рис. 4.3, в отличие от случая на рисунке 4.2, вольтметр показывает наличие ЭДС в контуре в соответствии с (4.2), хотя магнитный поток в электрическом контуре в обоих случаях изменяется одинаково.

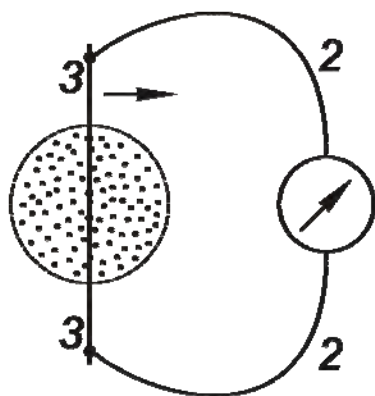


Рис. 4.3. К парадоксу Геринга

Анализируя особенности всех приведенных выше парадоксов, можно заметить, что ЭДС в контуре возникает всегда, когда происходит физическое перемещение элементов контура через магнитное поле, то есть элементы контура пересекают магнитное поле. Для рассмотренных случаев не имеет значения, изменяется ли при этом магнитный поток через электрический контур (рис. 4.3) или

нет (униполярный генератор).

4.4. Закон электромагнитной индукции Фарадея

У Фарадея, как отмечалось выше, не возникали проблемы в подобных ситуациях. Первым генератором в мире, созданным Фарадеем на основе его представлений об электромагнитной индукции, являлся именно униполярный генератор, известный также под названием диск или генератор Фарадея. Фарадей электромагнитную индукцию всегда объясняет тем, что провод пересекает магнитное поле. Или тем, что магнитное поле пересекает провод.

Рассмотрим работу Фарадея [7], в которой он на основе экспериментальных результатов впервые формулирует закон электромагнитной индукции. Изложим эту работу в сокращенном виде, пользуясь более современной терминологией.

Вблизи друг другу расположены два параллельных провода. Один из них, неподвижный, служит для возбуждения магнитного поля, для чего через него пропускается постоянный электрический ток. Другой провод служит в качестве измерительного. При удалении или приближении измерительного провода относительно провода с током в измерительном проводе возбуждается напряжение. Фарадей объясняет эффект тем, что измерительный провод пересекает в своем движении магнитные силовые линии, которые, в свою очередь, возбуждаются электрическим током. Тот же эффект достигается соответственно при уменьшении или увеличении электрического тока. Фарадей пишет [7], что «магнитные кривые как бы движутся (если можно так выразиться) поперек индуцируемого провода». При выключении и включении тока магнитные линии «можно себе представить стягивающимися и возвращающимися по направлению к исчезающему току».

В приведенных выше словах заключена суть закона электромагнитной индукции в его понимании Фарадеем. Фарадей, как известно, не использовал математику в своих исследованиях, поэтому переведем этот закон в математическую форму. Для этого, подставляя в уравнение (4.3) выражение для электрического поля (2.5), получим:

$$\mathcal{E} = - \int_L [\mathbf{V}_m \mathbf{B}] \cdot d\mathbf{l}, \quad (4.5)$$

где \mathbf{V}_m – собственная скорость магнитного поля относительно неподвижного контура L .

Для случая с неподвижным магнитным полем, когда неподвижен сам источник поля, и с движущимся со скоростью \mathbf{V} контуром L с учетом, что $\mathbf{V} = -\mathbf{V}_m$, из (4.5) получим:

$$\mathcal{E} = \int_L [\mathbf{V} \mathbf{B}] \cdot d\mathbf{l}. \quad (4.6)$$

Отметим, что, в отличие от (4.2), контур L не обязательно является замкнутым.

Закон электромагнитной индукции в форме (4.5) и (4.6) фактически является математическим отражением закона электромагнитной индукции Фарадея, сформулированного им в работе [7]. Этот закон в виде (4.6) широко используется в настоящее время при решении различных задач, прежде всего прикладного характера.

Выражение (4.2) является частным решением уравнения (4.6), если применить (4.6) к замкнутому контуру. Для демонстрации этого необходимо определить скорость изменения магнитного потока $d\Phi/dt$ внутри контура при движении элемента длины контура $d\mathbf{l}$ со скоростью \mathbf{V} в магнитном поля \mathbf{B} в точке расположения элемента $d\mathbf{l}$. Произведя затем интегрирование по контуру L , получим, с учетом (4.4), искомое выражение (4.2). Другой способ вывода выражения (4.2) получается при использовании теоремы Стокса с учетом (4.1). Оба пути получения (4.2) достаточно широко представлены в литературе по теории электромагнетизма, а также в литературе, посвященной решению прикладных задач, поэтому мы не приводим более подробного решения.

Еще одним, более современным, аргументом в пользу правильности представлений Фарадея о движении магнитного поля при изменении магнитного потока через контур является вектор Пойнтинга, представляющий собой плотность потока энергии электромагнитного поля.

Как известно, в случае увеличения магнитного потока, пронизывающего контур, вектор Пойнтинга направлен внутрь контура, при уменьшении – наружу. Для всех физических явлений поток энергии всегда связан с перемещением в пространстве каких-либо физических объектов, зависящих от природы явления. Не всегда направление этого перемещения совпадает с направлением потока энергии, но то или иное перемещение всегда присутствует. Если отрицать, что в случае 2 изменение магнитного потока происходит за счет перемещения магнитных силовых линий, то это будет единственный случай чисто «математического» потока энергии без перемещения материального объекта, в данном случае магнитного поля. Наоборот, если принять, что изменение магнитного потока происходит за счет перемещения магнитных силовых линий, причем направление перемещения совпадает с направлением вектора Пойнтинга, то случай 2 подчиняется общим законам физики. Разумеется, совершенно те же аргументы и выводы о движении поля относятся и к электрическому полю.

4.5. Электрический контур

Одно из основных условий, предъявляемых при использовании закона электромагнитной индукции в классическом виде (4.2), является требование замкнутости контура L . Это требование в теории

Максвелла является обязательным, почти сакральным. Разомкнутый контур исключен из рассмотрения, в крайнем случае вводится понятие токов смещения для преобразования разомкнутого контура в замкнутый. Между тем Фарадей не предъявлял требования замкнутости контура, хотя и неоднократно отмечал, что ток может течь только в замкнутой цепи. Тем не менее, в упоминавшейся выше работе [7] Фарадей описывает два параллельных провода, один из которых служит для возбуждения магнитного поля, а другой является измерительным. Эти провода, несомненно, образовывали замкнутые контура, но для Фарадея это было несущественно при объяснении причин появления индукции.

В настоящее время опыт Фарадея можно было бы повторить и без использования контуров. Линейный ток можно получить, например, с помощью пучка электронов в космическом пространстве, а вместо измерительного провода использовать датчик электрического поля в виде бруска из сегнетоэлектрика, изменение размеров которого фиксируется лазерным интерферометром. Сигнал от интерферометра будет повторять сигнал от измерительного провода Фарадея. В этой ситуации применение закона электромагнитной индукции в форме (4.2) оказывается практически невозможным. Понятие токов смещения, которое обычно используется при обосновании применения уравнения (4.2) для разомкнутых контуров, в данном случае хотя и в принципе возможно при определенных интеллектуальных усилиях, но приводит лишь к усложнению задачи. В то же время применение (4.6) не вызывает никаких затруднений.

Прежде всего, сделаем несколько замечаний, почему именно в такой форме, форме для замкнутого контура, получил распространение закон электромагнитной индукции, несмотря на все парадоксы, которые при этом он порождает. Ведь ЭДС формально, теоретически, можно измерять не только в замкнутой цепи, но и между двумя любыми точками электромагнитного поля. Для этого можно измерить работу, совершаемую при перемещении пробного заряда между двумя точками, либо, используя провод в качестве естественного устройства, интегрирующего напряженность электрического поля вдоль провода, образующего электрический контур, измерить с помощью электроскопа потенциалы на концах провода и вычислить их разность. Однако погрешность таких измерений будет очень велика из-за крайне низких энергий, с

которыми приходится оперировать. Современные способы измерения напряженности электрического поля, в частности описанный выше, в XIX веке были недоступны. В то же время, для замкнутой цепи можно использовать гальванометр и обеспечить тем самым высокую точность измерений. Замкнутая электрическая цепь, кроме того, очень удобна в практическом применении, так как позволяет проектировать электрические генераторы и двигатели высокой мощности. Помимо этого, теория Максвелла, основанная на использовании замкнутого контура, предсказала существование электромагнитных волн, относительно быстро подтвержденное экспериментально.

Эти факторы, по нашему мнению, и привели к тому, что в число основных уравнений электродинамики включено уравнение для замкнутой электрической цепи, в то время как уравнение (4.6) для разомкнутой цепи позволило бы избежать достаточно многочисленных недоразумений и парадоксов, ведь уравнения в форме (4.5), (4.6) всегда адекватно описывают явление электромагнитной индукции. Несмотря на это, все равно остается открытым вопрос, почему выражение (4.2), даже для замкнутого контура, не всегда приводит к правильному результату.

Источником парадоксов является не вполне корректное использование понятия «электрический контур».

В закон электромагнитной индукции Максвелла в форме (4.2) входит замкнутый контур, охватывающий поверхность, которую пронизывает магнитное поле. Под контуром имеется в виду математическое, геометрическое понятие. Размер и форма «математического» контура должны оставаться неизменными. Само по себе увеличение или уменьшение размеров электрического контура не обязательно приводит к появлению в контуре ЭДС, это зависит от способа увеличения размеров. Только в случае, если под контуром имеется в виду не математический, а *физический контур*, образованный проводником, изменение его размеров путем перемещения элементов контура может приводить к появлению ЭДС. Уравнение электромагнитной индукции (4.2) вовсе не требует наличия физического контура, оно справедливо и в вакууме. По этой причине случаи применения уравнения электромагнитной индукции к контуру в вакууме и к физическому контуру, образованному проводником, должны рассматриваться отдельно.

Математический контур, в отличие от физического, является лишь вспомогательным математическим (геометрическим) понятием, позволяющим более полно и глубоко описать свойства поля не только в пространстве, но и во времени. Трансформация математического контура изменяет лишь вид математических выражений, описывающих поле, никак не влияя на само поле.

Физический контур фактически является, в отличие от математического контура, устройством, активно влияющим на магнитную и электрическую компоненты электромагнитного поля: разомкнутый контур уменьшает до нуля электрическую компоненту поля внутри материала контура и вблизи его поверхности и сосредоточивает ее в месте разрыва контура, замкнутый контур препятствует всякому изменению магнитной компоненты вблизи контура и уменьшает тем самым электрическую компоненту поля.

Если закон электромагнитной индукции Максвелла в форме (4.2) используется для исследования электромагнитных явлений в вакууме, то всегда подразумевается, что контур L остается неизменным во времени. В противном случае, поскольку деформация контура произвольна (не подкреплена физическим перемещением материальных объектов), в том числе может изменяться скачком, то произвольна и величина интеграла в левой части (4.2). Другое дело, если с контуром связан материальный объект, в роли которого может выступать какой-либо датчик электрического поля, например, металлический проводник или описанный выше сегнетоэлектрический датчик. Материальный объект не может мгновенно перескакивать из точки в точку, может перемещаться только путем непрерывного движения. При этом, если элементы контура движутся, появляется возможность измерять напряженность электрического поля в каждой точке контура в мгновенно сопутствующей элементу контура инерциальной системе координат. В случае изменяющегося во времени магнитного поля и неподвижном контуре такой инерциальной системой является лабораторная система, общая для всех точек контура. Затем можно произвести суммирование напряженности поля для всех точек контура. В случае, если используется не сегнетоэлектрический датчик, а физический контур из проводящего материала, то такое суммирование происходит естественным образом в виде ЭДС в разрыве замкнутого контура.

Мы сознательно избегали применения понятия силы Лоренца, это понятие после появления специальной теории относительности лишь затрудняет восприятие электромагнитных явлений, ведь за силой Лоренца всегда скрывается обычное электрическое поле в собственной мгновенной системе отсчета движущегося электрического заряда. Это не значит, конечно, что мы призываем вообще отказаться от понятия силы Лоренца. Понятие силы Лоренца сложилось исторически и в некоторых случаях, не приводящих к недоразумениям, достаточно удобно на практике.

В отсутствие проводящих материалов (сред) справедлив закон электромагнитной индукции Максвелла в классической форме (4.1), (4.2).

Для физических контуров из проводящего материала можно рассмотреть и классифицировать различные условия, когда уравнение (4.2) применимо. Это можно сделать, в частности, анализируя приведенные выше парадоксы. В результате проведенного ранее (п. 4.3 настоящей главы) анализа мы сделали вывод, что в тех случаях, когда движение через магнитное поле элементов проводящего электрического контура приводит (за счет пересечения магнитного контура и магнитного поля) к изменению магнитного потока через контур, допустимо использование закона электромагнитной индукции Максвелла в форме (4.2). В противном случае, а также в сомнительных случаях необходимо использовать закон электромагнитной индукции Фарадея в форме (4.5) или (4.6). Заметим, что в физическом контуре можно сделать дополнительный разрыв и включить в него источник сторонней ЭДС. Такое невозможно сделать с математическим контуром L . Под сторонней ЭДС будем понимать любой источник ЭДС в котором возникает не за счет пересечения магнитного потока элементами контура, а по другим причинам, например, путем использования электрического химического элемента, фотоэлемента, термопары и т.п. Такие контуры, очевидно, не подчиняются уравнению (4.2). В дальнейшем исключим из рассмотрения те источники ЭДС, для которых не требуется присутствия магнитного поля.

При наличии магнитного поля отдельного рассмотрения требуют физические контуры, у которых на некоторых участках, а иногда и на всех участках контура свободные электрические заряды, входящие в контур, пересекают магнитные силовые линии не за счет изменения магнитного поля во времени, а под действием сторонних сил. К этим случаям относятся различные варианты униполярных

генераторов (с подвижным и неподвижным магнитным полем), МГД-генераторы и др. Часто считают, что отличительной чертой этих устройств является коммутация части контура, однако это не так. В вышеприведенных выше в п.п. 2.1 и 2.3 случаях происходит и коммутация, и изменение магнитного потока через контур, но при изменении конфигурации контура не происходит движения свободных зарядов под действием сторонних сил (сторонние силы отсутствуют), и ЭДС равна нулю. В то же время при включении в качестве участка контура датчика Холла как источника ЭДС ни коммутации, ни изменения магнитного потока нет, но под действием сторонних электрических сил свободные заряды пересекают магнитные силовые линии, и в контуре ЭДС отлична от нуля.

4.6. Физические причины движения электромагнитного поля

Что же является причиной движения силовых линий электромагнитного поля?

В теории электромагнетизма, если исключить из рассмотрения электромагнитные волны, практически всегда по умолчанию предполагается справедливым неравенство:

$$\Delta l \ll c \Delta t, \quad (4.7)$$

где Δl – в зависимости от обстоятельств либо расстояние от источника поля, либо размеры самого источника, c – скорость света, а Δt – отрезок времени, минимально необходимый для проведения измерений.

Рассмотрим несколько случаев, когда неравенство (4.7) не выполняется. В этих случаях электрическое или магнитное поле не подчиняется законам электро- или магнитостатики.

1. Рассмотрим покоящийся сферически симметричный точечный заряд. Электрическое поле такого заряда обладает сферической симметрией, так как при любом другом распределении электрических силовых линий суммарная энергия электрического поля увеличивается. Приложим к электрическому заряду в течение какого-нибудь времени силу так, чтобы заряд получил ускорение. Начнет ускоряться и поле вблизи заряда, однако на большом расстоянии от заряда поле не успеет прийти в движение, и в собственной системе отсчета заряда (мгновенно сопутствующей

системе отсчета) поле потеряет сферическую симметрию, его энергия увеличится. Это будет справедливо и в течение некоторого времени, зависящего от точки наблюдения, после прекращения действия силы. Электрическое поле сначала вблизи заряда, а затем и в дальних точках придет в движение, стремясь к минимуму суммарной энергии, и, в конце концов, приобретет начальную сферически симметричную конфигурацию. В лабораторных условиях, когда расстояния малы, а время измерения больше времени протекания процесса ускорения поля, по умолчанию обычно предполагается, что электрическое или магнитное поле жестко связаны со своим источником и их скорости, следовательно, всегда равны.

2. Рассмотрим два параллельных бесконечно длинных неподвижных провода. На очень большом расстоянии l друг от друга, таком, что неравенство (4.7) не выполняется, провода замкнуты скользящими переключками. В одну из переключек включен источник тока. Вблизи одного из проводов между переключками находится пробный заряд. Когда переключки неподвижны, на пробный заряд не действуют силы, так как магнитное поле, создаваемое током, неподвижно. Приведем в движение одновременно в одну и ту же сторону переключки на короткое время, такое, чтобы неравенство (4.7) не выполнялось. В начальный момент позади передней по ходу движения переключки возникнет уменьшение плотности силовых линий, то есть индукции магнитного поля, а перед задней переключкой – ее увеличение.

До этого, когда переключки были неподвижны, магнитные силовые линии в контуре с током распределялись так, чтобы при фиксированном магнитном потоке энергия магнитного поля была минимальна. После начала движения переключек также приходят в движение, стремясь к минимуму энергии, и магнитные силовые линии. Если потери в контуре достаточно малы, то возможны затухающие колебания плотности магнитных силовых линий вдоль контура. Однако, в конце концов, за счет потерь на излучение и вихревые токи эти колебания прекратятся, и скорость силовых линий сравняется со скоростью переключек, а распределение плотности магнитных силовых линий (индукции) вдоль контура станет тем же, что и до начала движения. В системе отсчета, связанной с пробным зарядом, появится электрическое поле и сила, действующая на пробный заряд. Эта сила будет интерпретироваться в системе отсчета, связанной с переключками, как сила Лоренца.

3. Рассмотрим контур, у которого очень большой не только продольный, но и поперечный размер, например, круглый виток провода с очень большим радиусом, таким, чтобы не выполнялось неравенство (4.7). В контур включен источник тока. В установившемся режиме распределение магнитного поля внутри и вне контура соответствует минимуму энергии магнитного поля для заданного магнитного потока в контуре. Изменим скачком ток в контуре, например, увеличим его в течение короткого времени, чтобы неравенство (4.7) не выполнялось. Поскольку ток в контуре изменился, то изменится и магнитный поток, пересекающий контур. Однако из-за конечной величины скорости света в начальный момент индукция увеличится только в непосредственной близости от витка с током, в центральных же областях контура индукция измениться не успеет. Условие минимума энергии магнитного поля будет нарушено, магнитные силовые линии придут в движение в направлении от провода витка с током до тех пор, пока не будет достигнут новый минимум энергии магнитного поля. Этот пример еще раз показывает, что изменение магнитного потока через электрический контур и перенос энергии магнитного поля может происходить только благодаря движению магнитных силовых линий.

Таким образом, электрическое или магнитное поле выходит из состояния покоя тогда, когда нарушается равновесное состояние поля, соответствующее минимуму энергии. Если по каким-либо причинам это равновесное состояние энергии электромагнитного поля нарушается, то поле приходит в движение, благодаря чему достигается новое равновесное состояние. Единственной причиной возникновения ЭДС в контуре необходимо считать движение магнитного поля и физических элементов электрического контура относительно друг друга.

Выводы

1. Всякое изменение во времени электрического или магнитного поля в любой точке пространства происходит только путем перемещения электрических или магнитных силовых линий.

2. Из п. 1 следует, что все выводы, сделанные в [1], а также принцип суперпозиции, распространяются и на изменяющиеся во времени электрические или магнитные поля. Иными словами, одним из источников электромагнитного поля может быть изменяющееся во времени электрическое или магнитное поле.

3. Теория Максвелла для изменяющихся во времени электрических и магнитных полей являются частной теорией, справедливой для электромагнитных волн и для некоторых других частных случаев.

4. Электрическое или магнитное поле выходит из состояния покоя тогда, когда нарушается равновесное состояние поля, соответствующее минимуму энергии. При нарушении этого равновесного состояния энергии электромагнитное поле приходит в движение до достижения нового равновесного состояния.

Список литературы

1. Л.Н. Войцехович. Теория движения электромагнитного поля. 2. Принцип движения компонент электромагнитного поля, 1, (2013), с. 12.
www.science.by/electromagnetism/rem2rus.pdf.
2. A. Einstein. Zur Elektrodynamik der bewegter Körper. Ann. Phys., 1905, 17, 891–921.
3. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, т. 6, Москва, Мир, (1977).
4. C. Hering. AIEE Trans. 27, 1341 (1908).
5. M.J. Crooks et al. One-piece Faraday generator: A paradoxical experiment from 1851 Am. J. Phys. 46 (7), 729 (1978).
6. Р.В. Поль. Учение об электричестве, Москва, Физматгиз, (1962), с. 115.
7. М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 1, пункты 231 – 238, Москва, Изд. АН СССР, (1947), [[Michael Faraday](#). Experimental Researches in Electricity, 231 – 238].

*Статья опубликована на сайте журнала РЭМ
2 апреля 2013 г.*