

СТРАННОСТИ УНИПОЛЯРНОЙ ИНДУКЦИИ

К.Б. Канн

kkann@yandex.ru

Аннотация

Одним из вариантов электромагнитного взаимодействия стала индукция ЭДС во вращающемся электропроводном диске под действием магнитного потока, исходящего из одного полюса магнита – "униполярная индукция". Анализ работы униполярных генераторов столкнулся со "странностями", которые до сих пор вызывают вопросы у исследователей. В работе показано, что все трудности интерпретации униполярной индукции исключаются, если строго следовать представлениям об электромагнитной индукции, сформулированным М. Фарадеем еще в 18-ом веке.

Введение

Электрические и магнитные свойства известны людям с доисторических времен. Долгое время эти свойства рассматривались как проявления разных природных процессов. В 1820 году датский физик Х. Эрстед обнаружил, что рядом с проводом, по которому протекает электрический ток, магнитная стрелка отклоняется. Это означало, что электрический ток обладает магнитными свойствами. Дальнейшие исследования показали тесную связь между магнитными и электрическими явлениями, что позволило считать электрические и магнитные процессы проявлениями единого (*электромагнитного*) механизма. Это открытие положило начало новой области физики – электромагнетизму.

Открытие электромагнитной индукции

Гениальный самоучка англичанин Майкл Фарадей был убежден, что должен существовать процесс, обратный тому, который обнаружил Эрстед. В 1822 г. в его дневнике появилась запись: "Обратить магнетизм в электричество". После множества опытов и неудач 29 августа 1831 года Фарадей получил, наконец, желаемый результат – обнаружил процесс "обращения магнетизма в электричество" – явление *электромагнитной индукции* (ЭМИ). Природу этого явления Фарадей определил так: в проводнике, пересекающем магнитный поток, протекает электрический ток. Фарадей установил и количественную связь, определяющую это явление (Основной закон ЭМИ) [1]:

"...количество электричества, протекающего по цепи тока, прямо пропорционально числу перерезанных проводником [магнитных] линий... [и проводимости цепи]",

что можно представить зависимостью:

$$\Delta q = \frac{\Delta \Phi}{r}, \quad (1)$$

где Δq – заряд, который протекает по замкнутому проводнику за время, пока проводник пересекает магнитный поток $\Delta \Phi$, а r – сопротивление электрической цепи. Сразу же после открытия ЭМИ Фарадей начал создавать на этом принципе электрогенератор. Один из вариантов такого генератора показан на фото Рис. 1, *a*, а его схема приведена на Рис. 1, *b*. Позднее такое устройство получило название "Диск Фарадея".

Медный диск 1 (Рис.1, *b*) вращался между полюсами подковообразного магнита 5. Кромка диска и его проводящая ось с помощью скользящих токосъемников 2 и 3 были подключены к гальванометру 4. При вращении диска гальванометр устойчиво показывал электрический ток. Он возникал при пересечении линий магнитного потока "ак-

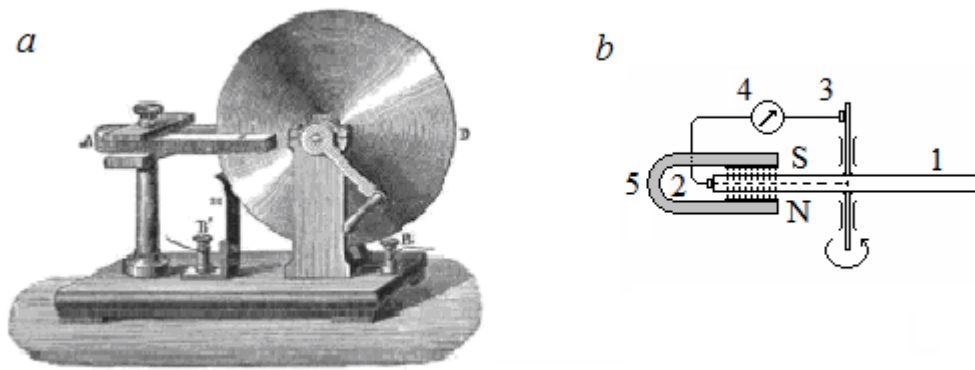


Рис. 1

тивным радиусом" вращающегося диска (пунктир на рисунке), точнее – свободными электронами в диске, расположенными на этом радиусе.

Неутомимый экспериментатор М. Фарадей продолжал исследовать открытое им явление. В одном из опытов он расположил медный диск 1 соосно с неподвижным цилиндрическим магнитом 5, намагниченным вдоль вертикальной оси (см. Рис. 2, a). Разность потенциалов между осью и кромкой диска, как и ранее, снималась токосъемниками 2 и 3 и измерялась гальванометром 4. При вращении диска гальванометр, как и ожидалось, показывал наличие тока (ЭДС ξ) в измерительной цепи. От устройства, представленного на Рис. 1, эта схема отличается тем, что немагнитный диск вращается в магнитном потоке (МП), исходящем только из одного полюса. Поэтому такой вариант

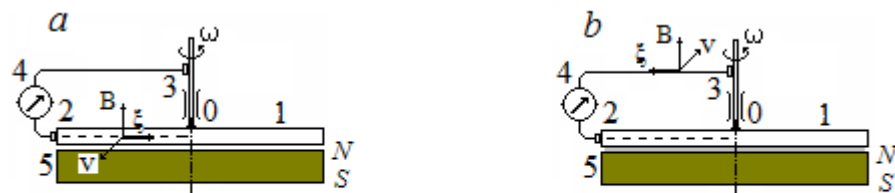


Рис. 2

генерации ЭМИ стали называть "униполярной индукцией" (УПИ).

Продолжая экспериментировать, Фарадей приклеил медный диск к магниту (через изоляционную бумажную прокладку) и стал вращать диск вместе с магнитом (см. Рис. 2, b). К своему удивлению он обнаружил, что гальванометр и в отсутствии относительного перемещения диска и магнита показывает... тот же ток! В этом проявилась первая "странность" униполярной индукции. Чтобы объяснить этот результат, Фарадей предположил, что магнитное поле с магнитом не вращается, а остается неподвижным. Но такое объяснение противоречило основной установке, полученной им в результате многочисленных предыдущих опытов и наблюдений, а именно, что "физические силовые линии" магнитного поля *материальны*, жестко связаны с магнитом и *должны* вращаться вместе с ним.

Тогда Фарадей решил, что индукционная ЭДС в этом случае возникает не в медном диске, а в *проводах* измерительной цепи, которые пересекает магнитный поток, свободно проникающий через немагнитный диск (см. Рис. 2, b).

Чтобы убедиться в этом, Фарадей вовсе удалил медный диск, а токосъемник 2 подвел непосредственно к магниту на уровне его центрального сечения (см. Рис. 3). Фарадей понимал, что свободные электроны, вращаясь *вместе* с магнитом и не пересекая магнитные линии, не могут

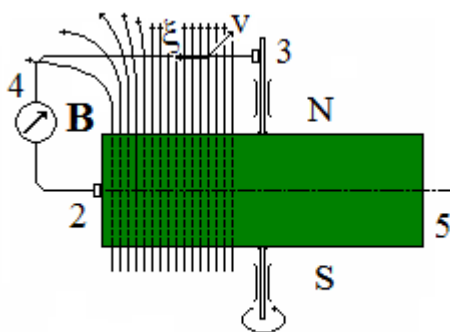


Рис. 3

создавать ЭДС в теле магнита. Поэтому он ожидал, что в этом варианте гальванометр покажет то же, что и с медным диском. Эксперимент подтвердил эти ожидания. Это означало, что индукционная ЭДС, действительно, генерируется не в диске, а в проводах измерительной цепи – в полном соответствии с механизмом ЭМИ Фарадея. Так разрешилась вторая "странность" УПИ.

Анализ вариантов УПИ

Все устройства для изучения УПИ включают, как правило, три элемента – магнит **М**, немагнитный диск **Д** (может отсутствовать – см. Рис. 3) и измерительную цепь (контур) **ИК**, содержащий измерительный прибор. Схематически устройство УПИ можно представить, как показано на Рис. 4. Если обеспечить *раздельное* вращение всех элементов устройства, то можно оценить результат УПИ во всех вариантах работы схемы.

Всего возможных вариантов – восемь. Они перечислены в Таблице 1, в которой приведены сводные результаты измерений УПИ, выполненных в разное время различными авторами.

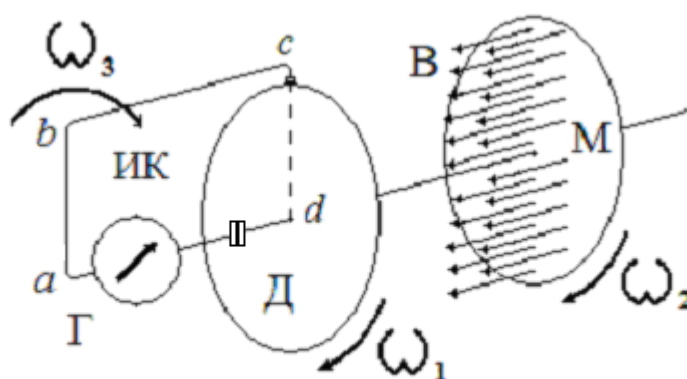


Рис. 4

Таблица 1

Вариант №	Вращение			Инд. ЭДС	Объяснения (см. Рис. 4)
	Диск Д	Магнит М	Измерит. контур (ИК)		
1	0	0	0	0	Нет движения
2	ω_1	0	0	ξ	ЭДС в диске Д (плечо <i>cd</i>)
3	0	ω_2	0	0	МП "не проникает" в ИК
4	0	0	ω_3	ξ	ЭДС в ИК (плечо <i>ab</i>)
5	ω_1	ω_2	0	ξ	ЭДС в ИК (плечо <i>ab</i>)
6	0	ω_2	ω_3	ξ	ЭДС в диске Д (плечо <i>cd</i>)
7	ω_1	0	ω_3	0	МП "не проникает" в ИК
8	ω_1	ω_2	ω_3	0	Нет относит. движения

"Ноль" в соответствующей ячейке таблицы означает, что в данном опыте элемент устройства оставался неподвижным. В остальных ячейках указана угловая скорость ω вращения элемента. В колонке "Инд. ЭДС" символом ξ отмечены те варианты, в которых гальванометр в измерительной цепи фиксировал наличие индукционной ЭДС. В большинстве рассмотренных нами работ результаты наблюдений совпадали с данными таблицы. Результат по варианту №5, как и опыт Фарадея с магнитом без диска (см. Рис. 3) до сих пор не имеют единого удовлетворительного объяснения, обсуждаются на Интернет-форумах и считаются "парадоксальными". Для объяснения этих "парадоксов" прибегают к всевозможным ухищрениям, представлениям Специальной теории относительности (СТО) и пр., но общее признание эти объяснения пока не получили.

В последней колонке таблицы приведены наши объяснения результатов измерений – элемент устройства, в котором возникает индукционная ЭДС, или причина ее отсутствия.

При оценке этих результатов мы исходили из того факта, что Фарадею удалось объяснить все результаты УПИ (включая "парадоксальные"!) задолго до появления СТО. В основе объяснений, приведенных в таблице, лежит три основных **положения**, которыми руководствовался Фарадей:

1. Индукционный ток возникает лишь при пересечении свободными зарядами (проводниками) линий магнитного поля (механизм ЭМИ Фарадея).
2. Магнитные линии – это реальные ("физические") объекты, которые жестко связаны со своим источником (током, магнитом) и перемещаются (в частности – вращаются) вместе с ним. И, как следствие:
3. При любых перемещениях магнита индукционная ЭДС в нем не возникает.

Последовательное применение этих положений позволило получить объяснения всех известных результатов УПИ, в том числе – и "парадоксальных".

Приведем некоторые комментарии к таблице:

1) Все опыты можно разделить попарно на 4 группы – варианты 1-8, 2-6, 3-7 и 4-5. Опыты в каждой паре отличаются "зеркальной" симметрией, т.е. могут быть выполнены заменой системы координат. Видно, что эти эксперименты дают одни и те же результаты, т.е. во всех случаях выполняется *закон относительности* движения.

2) Некоторое объяснение требуется к результатам измерений по вариантам 3-(7). В варианте 3 вращается лишь магнит. Измерительная цепь, включающая радиус cd неподвижного диска, представляет плоский *неподвижный* контур, *параллельный* линиям поля. При вращении магнита каждая магнитная линия *дважды* пересекает провода **ИК** в противоположных направлениях – на входе и на выходе из контура. Поэтому результирующий магнитный поток, пересекаемый контуром за любой промежуток времени, равен нулю, и ЭДС в контуре отсутствует!

Униполярная индукция в "неподвижном" магнитном поле

В конце прошлого века в журнале *Galilean Electrodynamics* была опубликована работа Мюллера (F.J. Müller) [2], в которой были приведены оригинальные результаты экспериментальных исследований электромагнитной индукции. От других аналогичных устройств экспериментальное устройство Мюллера отличалось тем, что в нем магнитный поток замыкался ферромагнитным ярмом, позволяющим экранировать некоторые элементы измерительной цепи. Это создавало дополнительные возможности для диагностирования явления ЭМИ.

Экспериментальное устройство Мюллера схематически представлено на рисунке 5. Цилиндрический магнит **СМ** автор разрезал на два магнита, которые могли одновременно и синхронно вращаться вокруг оси ОЕ. Зазор между половинками магнита позволял организовать измерительную цепь ОЕСР из изолированных проводов, не содержащую ни немагнитного диска, ни подвижных токосъемников. В точке **R** цепи ее концы соединялись через подвижный (ртутный) контакт (не показан), что позволяло поворачивать элементы цепи ОР и ЕСР незави-

симо друг от друга на небольшие углы. Ток в измерительной цепи измерялся гальванометром

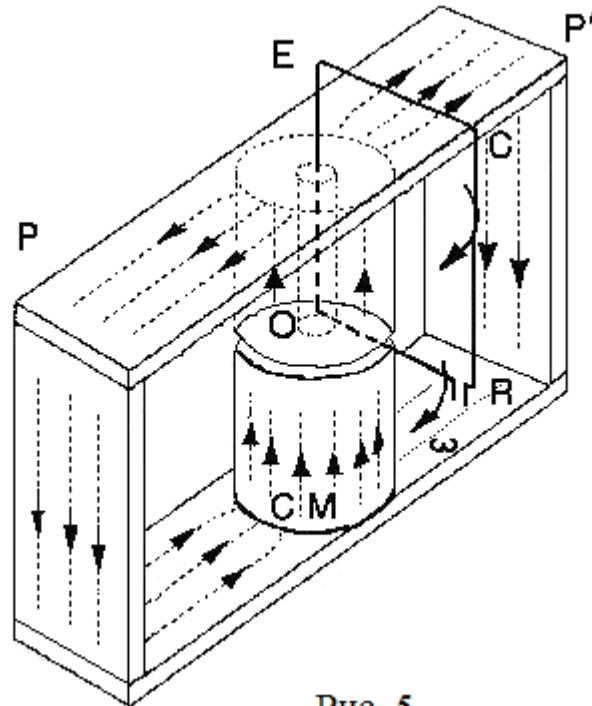


Рис. 5

(не показан). Поле постоянных магнитов было замкнуто ферромагнитными пластинами. В частности, участок измерительной цепи ECR экранировался пластиной PP'.

В Таблице 2 представлены результаты измерений индукционной ЭДС в измерительном устройстве Мюллера:

Таблице 2

Вариант №	ВРАЩЕНИЕ			Инд. ЭДС	Объяснения
	Участок OR	Участок ECR (экранирован)	Магнит СМ (поле неподв.)		
1	0	0	0	0	Нет движения
2	ω_1	0	0	ξ	ЭДС в OR
3	0	ω_2	0	0	Экранирование ECR
4	0	0	ω_3	0	Нет движения
5	ω_1	ω_2	0	ξ	ЭДС в OR
6	$\omega_1 = \omega_3$	0	ω_3	ξ	ЭДС в OR
7	0	ω_2	ω_3	0	Нет движения
8	$\omega_1 = \omega_3$	ω_2	ω_3	ξ	ЭДС в OR

Представлены те же 8 вариантов измерения индукционной ЭДС, что и в Таблице 1. Но сравнение двух таблиц показывает для одних и тех же вариантов существенную разницу в результатах опытов. Обращает внимание, что ЭДС в измерительной цепи появляется лишь при движении участка OR (варианты 2, 5, 6 и 8). Как и следовало ожидать, ЭДС в измерительной цепи не зависит от движения участка цепи ECR, т.к. он экранирован от магнитного потока ярмом PP'. Но самое удивительное, что в измерительной цепи "не чувствуется" и вращение магнита (варианты 4 и 7)! Это однозначно свидетельствует, что магнитное поле не вращается с магнитом, т.е. неподвижное яр-

мо на стыке с вращающимся магнитом т о р м о з и т магнитное поле! Этот факт стал неожиданностью. Он противоречит одной из основных установок Фарадея. Но его можно объяснить механизмом "преобразования магнитного потока" [3], обнаруженным и исследованным Фарадеем. Пример такого объяснения см. на сайте [4]. В остальном результаты измерений Мюллера полностью соответствуют ПОЛОЖЕНИЯМ, на основе которых получены выводы в Таблице 1.

Итак, на основании всех известных экспериментов с электромагнитной индукцией можно заключить, что природа этого явления полностью определяется механизмом "пересечения" М. Фарадея.

О "странностях" УПИ

Мы показали, что все особенности УПИ были понятны еще Фарадею. Почему же сегодня, через 200 лет после открытия ЭМИ, идут споры о "странностях" униполярной индукции, а некоторые экспериментальные результаты участникам этих дискуссий кажутся загадочными и даже "парадоксальными"? Дело в том, что в процессе изучения и развития электродинамики в ней накопилось много ошибок и устойчивых заблуждений, которые мешают некоторым специалистам *поверить* в справедливость представлений, сформулированных гениальными творцами электродинамики Фарадеем и Максвеллом. Некоторые из этих заблуждений породили ряд неразрешимых "парадоксов" электромагнитной индукции [5]. Но эта тема требует отдельного рассмотрения. Здесь же мы рассмотрим лишь причины, которые мешают сегодня понять "странности" УПИ.

Из всех вариантов УПИ вызывают непонимание и споры вариант №5 (см. Таблицу 1) и опыт Фарадея с вращающимся магнитом (см. Рис.3). В обоих случаях в устройстве появляется индукционная ЭДС. По Фарадею эта ЭДС возникает в проводах измерительного контура при его пересечении магнитными линиями вращающегося магнита. Этот вывод следует из Основного закона ЭМИ (1). Но существует и другое определение процесса ЭМИ, которое было получено математическими преобразованиями из зависимости Фарадея (1).

Представим зависимость (1) в дифференциальной форме:

$$dq = \frac{d\Phi}{r}. \quad (2)$$

Разделим это выражение на время dt и запишем в виде

$$i = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad \text{или} \quad \xi = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2, a)$$

где $i = dq/dt$ – мгновенное значение тока в цепи, а $\xi = ir$ – ЭДС, возникающая в контуре. Русский академик Э. Ленц заметил, что для выполнения принципа Ле-Шателье в соотношении (2, a) должен стоять знак "-":

$$\xi = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2, b)$$

В такой форме "закон ЭМИ" и вошел в знаменитую систему уравнений Дж. Максвелла. Оно определяет процесс ЭМИ так:

Индукционная ЭДС в замкнутом проводящем контуре определяется скоростью изменения магнитного потока Φ , пронизывающего контур.

Такое определение противоречит природе ЭМИ, сформулированной Фарадеем. Но оно решало две задачи, которые не объясняла зависимость Фарадея (1):

1). Оно представляло ЭМИ как процесс *взаимодействия полей*, что позволяло описать процесс распространения в пространстве электромагнитных излучений (электромагнитных волн) и

2). Зависимость (2, *b*) описывала индукционный процесс в замкнутом контуре, когда явно отсутствует пересечение провода магнитными линиями, а изменение магнитного потока происходит путем изменения магнитной индукции B в магнитном поле, пронизывающем контур.

За время, прошедшее с момента открытия Фарадея, определение (1) было практически забыто, а "Законом Фарадея – Максвелла" стали называть соотношение (2, *b*). Было забыто и указание Фарадея, что магнитные линии следует считать *реальными* (материальными, "физическими") объектами. В 1929 году в своем классическом учебнике "Основы теории электричества" патриарх советской электродинамики академик И.Е. Тамм написал: "В движении силовых линий, пересекающих неподвижный проводник, усматривалась причина возникновения в этом проводнике электродвижущих сил индукции. Нечего и говорить, что такая интерпретация не выдерживает никакой критики: силовые линии являются лишь вспомогательным понятием, служащим для описания поля, а не какими-либо материальными образованиями..." [6]. Эта "руководящая" мысль стала основой для новых представлений о природе ЭМИ, которые удачно вписались в теорию релятивистской электродинамики. Согласно этому представлению вокруг переменного магнитного потока генерируется круговое ("вихревое") электрическое поле. Этой точки зрения и в наше время придерживается много исследователей. В работе [7] обсуждается идея возникновения в замкнутом контуре круговой ЭДС под действием переменного магнитного поля, пронизывающего контур. Показано, что электрическое поле "вихревым" (замкнутым!) быть не может и, следовательно, "Максвелловский" механизм ЭМИ на практике не реализуется.

Но вернемся к "странностям" УПИ. Как же представляют себе возникновение униполярной индукционной ЭДС противники Фарадеевского механизма "пересечения"? Например, по схеме Рис.3 видно, что в этом случае единственным элементом, где может возникать ЭДС, является сам магнит. Фарадей понимал, что свободные электроны в магните вращаются *вместе* с магнитными линиями, не пересекают их, и создавать ЭДС не могут. Но в развитие механизма возникновения ЭМИ в замкнутом контуре СТО прогнозировала возможность "поляризации" движущегося магнита (возникновения в нем ЭДС). Такая возможность объяснялась тем, что "при поступательном равномерном движении магнита ... деление электромагнитного поля на поле электрическое и поле магнитное имеет относительный характер и зависит от системы отсчета" [6]. И.Е. Тамм распространил эту "возможность" и на вращательное движение магнита. Таким образом, согласно положениям СТО ЭДС в схеме Рис. 3 возникает внутри магнита.

Работа Мюллера [2], которая уже цитировалась выше, называлась "Экспериментальное опровержение Специальной теории относительности (униполярная индукция)". В ней был получен фундаментальный результат, который автор сформулировал так: "Специальная теория относительности терпит поражение в экспериментах, проведенных в области ее применения (в электродинамике движущихся тел)". Существуют и другие эксперименты, опровергающие существование релятивистского эффекта "поляризации" магнита, движущегося в магнитном поле. Но сторонники релятивистского представления ЭМИ свято верят в истинность положений СТО. Поэтому некоторые опыты по униполярной индукции им кажутся "странными" и "парадоксальными".

Эпилог

Известна притча о Буридановом осле, который умер от голода между двумя копнами сена, потому что не знал, с какой копны начать. Сторонники релятивистской интерпретации явления ЭМИ находятся в еще более затруднительном положении – им приходится выбирать между двумя блюдами, которые оба... несъедобны.

Литература

1. *М. Фарадей*. Экспериментальные исследования по электричеству, т. 3, с. 3115.
2. *F.J. Muller*. An experimental disproof of special relativity theory (unipolar induction).
<http://home.comcast.net/~adring/muller.htm>
3. *В.Ф. Миткевич*. Магнитный поток и его преобразование. Гл.3. – Изд. АН СССР, М.-Л, 1946. С. 34, 74, 83.
4. *К.Б. Канн*. О парадоксах Фарадея. www.sciteclibrary.ru/texsts/rus/stat/st6489.pdf
5. *К.Б. Канн*. О «парадоксах» закона электромагнитной индукции» –
<http://micro-world.su/files/4034.doc>
6. *И.Е. Тамм*. Основы теории электричества. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. §112.
7. *К.Б. Канн*. Вихревое электрическое поле –
<http://micro-world.su/files/4042.doc>

Послесловие к статье

Статья д.т.н. проф. К.Канна замечательна во многих отношениях. Прежде всего, она основана на доскональном знании предмета в его историческом развитии, что позволило ему обнаружить «волонтаристские отклонения» последователей Фарадея и Максвелла от интерпретации экспериментальных результатов самими авторами. На основании известных ранее и найденных им новых экспериментальных результатов автору удалось убедительно показать, что единственно непротиворечивым объяснением всех проявлений униполярной индукции (УПИ) является наличие в свободном от вещества пространстве (как бы мы его ни называли – «эфиром», «электромагнитным полем» или «средой физического вакуума») – некоторой структуры, которую сам Фарадей назвал «физическими силовыми линиями», а академик В.Ф. Миткевич – «вихревыми линиями в эфире». Эти структуры перемещаются и вращаются в свободном пространстве вместе с магнитом, хотя могут и деформироваться в присутствии других магнетиков. Это свойство не признается ни теорией электромагнитного поля, ни теорией физического вакуума, что не позволяет дать исчерпывающее объяснение «парадокса Фарадея» и лишь уводит от истины.

Статья проливает новый свет на происхождение ряда трудностей современной теоретической электродинамики. Она показывает, что в основе этих трудностей лежит подмена Максвеллом фарадеевского понятия поля электрических зарядов, движущегося вместе с его источником, абстрактным "электромагнитным полем", существующим независимо от источника. Такая подмена не может быть оправдана стремлением Максвелла обосновать электромагнитную природу света. Она не только не позволяет разрешить парадокс Фарадея, но и ввиду синфазности электрических и магнитных полей приводит к нарушению закона сохранения энергии в электромагнитном поле. Это поле, как и физический вакуум, не обладает структурой даже гипотетически и не может заменить в физике понятие эфира. Напротив, эфир как всепроникающая светоносная среда, являющаяся первоосновой вещества и способная находиться в промежуточном состоянии на пути перехода к нему и обратно, безусловно, обладает определенной структурой. По-видимому, «физические силовые линии», о которых говорил Фарадей, – это вихревые волновые структуры в эфире, порожденные существующими в веществе кольцеобразными (замкнутыми или спиралевидными) молекулярными токами в магнитоупорядоченных материалах.

Данная статья способствует возвращению эфира в лоно классической физики и устранению тем самым паралогизмов не только электродинамики Максвелла, но и многих других разделов современной теоретической физики.

В. Эткин, д.т.н., проф., акад. ЕАЕН.