

P13-2009-159

А. В. Гусев, В. А. Никитин, А. Н. Сафонов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УВЛЕЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВРАЩЕНИИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНОГО МАГНИТА

Направлено в журнал «Электричество»

Гусев А. В., Никитин В. А., Сафонов А. Н.

P13-2009-159

Экспериментальное исследование увлечения магнитного поля при вращении цилиндрически-симметричного магнита

Со времен Фарадея до настоящего времени не прекращается спор о том, вращается ли магнитное поле при вращении симметричного источника поля (например, цилиндрического постоянного магнита) вокруг его оси. В поисках ответа выполнено большое количество экспериментальных работ, но ответа, убедительного для всех, не получено. Некоторые авторы считают, что при вращении магнита поле остается неподвижным, другие — что оно вращается вместе с ним. Мы поставили и описываем эксперимент, который, по нашему мнению, решает этот многолетний спор. Эксперимент основан на сравнении ЭДС, возникающей при вращении магнита с различной конфигурацией магнитного поля в области расположения измерительного контура.

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Gusev A. V., Nikitin V. A., Safonov A. N.

P13-2009-159

Experimental Research on Involvement of the Magnetic Field while Rotating a Cylindrical Symmetric Magnet

Since Faraday time till now the scientists have continued their dispute whether the magnetic field rotates during the rotation of a symmetrical source of the field (for example, a cylindrical permanent magnet) around its axis. Many of experimental activities have been performed searching for the answer convincing everybody but it has not been obtained yet. Some authors believe that when the magnet rotates the field remains immobile, others that the field is rotating together with the magnet. We have performed an experiment which, in our opinion, finalizes this long-term dispute. The experiment is based on the comparison of EMF which appears at the rotation of the magnet at different configurations of the magnetic field close to the measuring circuit.

The investigation has been performed at the Joint Institute for Nuclear Research.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

## **ВВЕДЕНИЕ**

Со времен Фарадея до настоящего времени не прекращается спор о том, вращается ли магнитное поле (и его силовые линии) при вращении симметричного источника магнитного поля. На эту тему проводились различные эксперименты, но их результаты и истолкование впоследствии подвергались критике. До настоящего времени нет ответа на этот, казалось бы, простой вопрос, с которым были бы согласны все специалисты. Некоторые эксперименты, по мнению их авторов, подтверждают увлечение магнитного поля при вращении источника. Однако в других публикациях этот вывод оспаривается. Существует и точка зрения, что этот вопрос является некорректным: поле не может вращаться, а может лишь изменяться по величине или направлению. Если такого изменения нет, то оно по определению не вращается. Эта формальная точка зрения тоже вызывает возражение, поскольку в технической литературе часто появление ЭДС генератора объясняют пересечением обмотки статора силовыми линиями магнитного поля ротора. И, наконец, не вызывает сомнений, что при вращении не вполне симметричного источника его поле в заданной точке наблюдения изменяется со временем и создает переменную ЭДС.

### **1. УТОЧНЕНИЕ ТЕРМИНОЛОГИИ И БАЗОВЫХ ПОНЯТИЙ**

Строго говоря, в физике слово «поле» означает математическую функцию, зависящую от координат и времени и описывающую физическую величину. Поэтому не вполне корректно говорить о движении поля (функции), а более правильно говорить о его (ее) изменении во времени. Однако из соображений наглядности некоторый тип изменения поля иногда называют его движением. Например, про поле, которое создает движущийся источник, говорят, что оно движется вместе с ним.

Условность и приблизительность такой терминологии можно увидеть, если задать вопрос: что будет с полем, если источник внезапно остановится? Возможно, остановится и поле, а возможно, оно продолжит движение. В случае электромагнитного поля, как мы знаем из уравнений Максвелла, реализуется еще более сложный вариант: часть поля остается с источником,

а часть продолжает движение с более высокой скоростью, чем источник, в виде электромагнитной волны. Можно задать аналогичный вопрос об электрическом поле: вращается ли электрическое поле, создаваемое равномерно заряженной вращающейся сферой? С одной стороны, поле не изменяется во времени. По этому признаку есть веские формальные основания называть такое поле постоянным, стационарным, неподвижным. Но, с другой стороны, поскольку источник поля вращается (т.е. движется), то и поле может вращаться (двигаться) вместе с ним. При вращении сферы вращающиеся вместе с ней заряды в дополнение к электрическому полю порождают магнитное поле. Оба поля при этом считаются неподвижными. Оправданием такой терминологии служат уравнения Максвелла, описывающие сложный характер взаимодействия этих полей, который невозможно передать просто словами «движется — покоится».

Похожая ситуация возникает при вращении цилиндрически-симметричного магнита вокруг его геометрической оси. Магнитное поле при этом не изменяется во времени ни по величине, ни по направлению, но в дополнение к нему при вращении появляется поле электрическое. Между осью магнита и его периферией возникает ЭДС униполярного генератора, что и порождает электрическое поле. Оба поля при этом можно считать неподвижными. Однако это не исключает возможности говорить о вращении электромагнитного поля, хотя такая точка зрения не является общепринятой.

Еще нужно считаться с тем, что в инженерной и педагогической практике часто ведут речь о вращении магнитного поля при объяснении принципа работы электродвигателя или генератора. Введение в рассмотрение силовых линий магнитного поля и их вращения повышает наглядность объяснения. Такую терминологию используют и при рассмотрении принципа работы униполярного генератора, о котором будет сказано ниже.

Остановимся теперь подробнее на понятии о силовых линиях.

Во-первых, они являются вспомогательным изобразительным средством, увеличивающим наглядность картины поля, но не имеют смысла каких-то структурных его элементов. Во-вторых, их использование оправдано только в достаточно простых, чаще всего статических случаях, когда принцип их построения не вызывает противоречий. В сложных случаях поле не удается непротиворечиво описать с помощью силовых линий. Проще исследовать уравнения Максвелла, не прибегая к силовым линиям. В-третьих, при попытке говорить о вращении силовых линий как некой физической реальности возникают разные «неудобные» вопросы. Например, удаленные от источника части линий изгибаются и скручиваются или движутся быстрее скорости света? Однако условность и противоречивость понятия вращения силовых линий не исключают его использования в простых случаях. Например, в генераторе тока появление напряжения в обмотке статора объясняют вращением силовых линий магнитного поля ротора, которые пересекают эту обмотку.

## 2. ОБЗОР И КРИТИКА ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ

Литературы, касающейся темы нашей работы, достаточно много. Ограничимся здесь лишь минимумом ссылок. Принцип работы униполярного генератора достаточно подробно описан у И. Е. Тамма и других авторов [1–3]. Но эксперименты с униполярным генератором с целью выяснить, вращается поле или нет, проводят до сих пор. Так, Н. Е. Заев и В. И. Докучаев в работе [4] пришли к выводу, что магнитное поле вращается, а А. Родин в работе [5] — что поле не вращается, но «результаты опыта не могут быть объяснены существующей теорией».

В. А. Богач [6] выступает как сторонник идеи о движении силовых линий магнитного поля вместе с вращающимся магнитом. Известно, что на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $\mathbf{V}$  в магнитном поле напряженностью  $\mathbf{B}$ , индуцируется ЭДС:  $U = [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]l$ . По аналогии автор [6] полагает, что движущиеся силовые линии возбуждают в пустом пространстве электрическое поле  $\mathbf{E} \sim [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ , которое не подчиняется уравнениям Максвелла. Отсюда делается радикальный вывод о неполноте этих уравнений и о необходимости пересмотра основных теоретических концепций электромагнетизма.

В. И. Смирнов описал в [7] проведенный им эксперимент, который, по его мнению, опровергает выводы Богача. Однако по этой работе можно высказать ряд критических замечаний.

1. В описании эксперимента не указаны размеры модели: диаметры подвижных дисков, расстояния от них до магнита, размеры пластин, что не позволяет выполнить расчет ожидаемого эффекта.

2. Упомянуты вращающиеся плоские кольца, которые отсутствуют на рисунке в работе [7], и остается непонятным, как они расположены и как их вращение связано с дисками.

3. Выглядит неоправданным усложнением схемы объединение двух контуров: подвижного (диски 1, 2 + вольтметр) и неподвижного (пластины 10, 11 + вольтметр) в одну сложную схему. По нашему мнению, было бы достаточно показать, что в неподвижном контуре ЭДС равна 0, а при замене пластин на вращающиеся кольца ЭДС отлична от 0. Диски оказываются при этом лишними.

4. В заключении автор делает предположение, которое не следует из эксперимента, о том, что «такого поля, вероятно, не будет при вращении нетокопроводящего магнита». По нашему мнению, оно неверное.

Смирнов высказал мнение, что рассмотренные им и Богачем модели униполярных генераторов не позволяют однозначно подтвердить тот или иной механизм индуцирования ЭДС [7, с. 6]. Имеется в виду определить, вращается или нет магнитное поле. Мы же в нашей работе отвечаем на этот вопрос.

Последние известные нам публикации [8, 9] относятся к 2000 и 2004 гг. Авторы приходят в них к разным выводам: В. А. Леус [8] утверждает, что поле вращается, а Л. Н. Смирных [9] опровергает вывод Леуса.

Хорошую работу выполнил А. Родин [5]. Он исследовал возникновение ЭДС при различных вариантах вращения металлического диска и магнитов. Схема установки А. Родина (униполярного генератора) дана на рис. 1. На

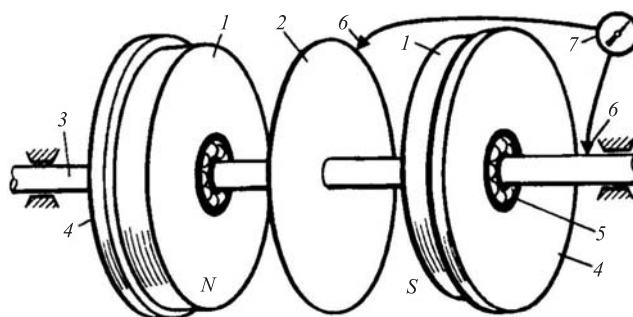


Рис. 1. Схема опыта Родина

оси 3 расположены магниты 1, равномерно намагниченные вдоль оси, и металлический диск 2. Магниты на подшипниках 5 могут вращаться независимо от диска. На рисунке они для наглядности отодвинуты от диска. С помощью щеток 6 к диску и к оси подключен вольтметр 7 для измерения напряжения (ЭДС) индукции.

Результаты эксперимента можно свести в таблицу.

#### Результаты эксперимента [5]

№ варианта	Диск	Магнит	ЭДС
1	Неподвижен	Неподвижен	Нет
2	Неподвижен	Двигается	Нет
3	Двигается	Неподвижен	Есть
4	Двигается	Двигается	Есть

Из таблицы видно, что ЭДС есть только тогда, когда диск движется (вращается) — варианты 3, 4. Вращение магнитов — вариант 2 — ЭДС не возбуждает.

Результаты Родина можно объяснить как исходя из гипотезы о вращении поля, так и из гипотезы, что при вращении магнита поле остается неподвижным.

Предположим, что магнитное поле движется. Тогда при неподвижном диске (вариант 2) получается замкнутый неподвижный контур, в противоположных сторонах которого наводятся встречные ЭДС. Поэтому вольтметр покажет 0. А при движении диска вместе с магнитным полем ЭДС наводится только в соединительных проводах измерительного контура (вариант 4). Поэтому вольтметр покажет наличие ЭДС.

Если магнитное поле неподвижно при вращении магнита, то при неподвижном диске, очевидно, получается 0 (вариант 2). А при движении диска ЭДС будет наводиться только в этом диске — вариант 4.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа [5] позволила нам ограничиться анализом одного самого проблемного случая — одновременного движения магнита и диска. Это дало возможность упростить нашу установку. Генератор с надетым магнитопроводом (далее для краткости называемым ярмом) показан на рис. 2. На рис. 3 этот же генератор показан со снятым ярмом и измерительными приборами.



Рис. 2. Униполярный генератор с установленным ярмом

Основные части установки:

1 — электромотор на 1500 об/мин с возможностью изменения направления вращения;

2 — цилиндрический магнит, состоящий из четырех ферритовых колец толщиной 15 мм с внутренним диаметром 35 мм и наружным 85 мм (такое же кольцо (10) для наглядности лежит на столе) и двух стальных колец по краям



Рис. 3. Униполярный генератор со снятым ярмом и измерительными приборами

для усиления магнитного поля в середине магнита. Кольца магнита и медный диск жестко укреплены на оси, соединенной с электромотором муфтой 8;

3 — медный диск в середине магнита, с которым контактирует;

4 — щетки. Одна из щеток замыкает цепь измерительного контура на ось.

5 — магнетик укреплен на оси вращения и намагничен перпендикулярно оси. Он наводит переменную ЭДС в расположенной под ним небольшой неподвижной катушке 6. Сигнал от нее поступает на осциллограф и используется для контроля числа оборотов двигателя. На осциллографе находится магнитометр 12 со щупом, снабженным датчиком Холла (магнитное поле измеряется в миллitesлах). ЭДС в контуре регистрируется цифровым вольтметром (на рис.2 не показан) и контролируется осциллографом. Измерительный контур — обычный монтажный провод, изогнутый, как показано на рис.2, и соединяющий вольтметр через щетки с медным диском и осью вращения. Справа от установки стоит магнитопровод 7. Он устанавливается в текстолитовые направляющие 9 и вместе со стальной пластиной под магнитом дает возможность обрамлять с четырех сторон этот магнит. Стальная пластина на рисунке не показана. Между магнитопроводом и торцами магнита остается зазор  $\sim 2$  мм, в который проходит щуп магнитометра. Для сравнения размеров рядом с прибором лежит линейка 11 со шкалой 30 см.

Магнитопровод (ярмо) позволяет значительно ослабить поле рассеяния магнита в области измерительного контура, так как по ярму замыкается большая часть рассеянного магнитного поля. Одновременно это приводит к усилению поля в цилиндрическом магните.



Кроме магнитопровода для уменьшения магнитного поля вблизи контура использованы железные трубки, надеваемые на провод контура, которые экранируют его от рассеянного остаточного поля. Хорошо известно (см., например, [10]), как концентрируется магнитное поле в стенках трубок, оставляя внутренность их почти при нулевом поле (рис. 9). Для измерения радиальных и осевых составляющих магнитного поля в районе контура и в промежутке между контуром и ярмом используется координатное устройство, в котором крепится щуп магнитометра (на рис. 2 не показан).

#### 4. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения проведены с шагом 5 и 10 мм в осевом и радиальном направлении. Графики  $B_r$  и  $B_z$  в зависимости от  $r$  и  $z$  при наличии магнитопровода

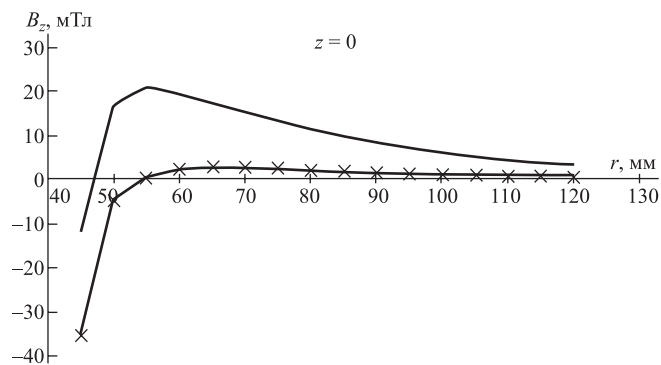


Рис. 4. Зависимость  $B_z(r)$  с магнитопроводом (x) и без него (—)

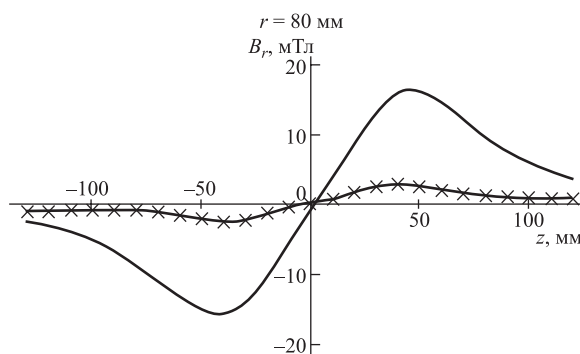


Рис. 5. Зависимость  $B_r(z)$  с ярмом (x) и без ярма (—)

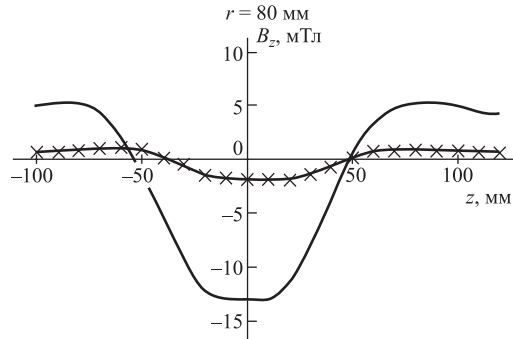


Рис. 6. Зависимость  $B_r(z)$  с ярмом (x) и без ярма (—)

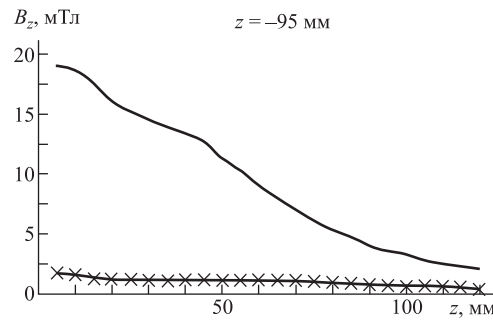


Рис. 7. Зависимость  $B_z(z)$  с магнитопроводом (x) и без него (—)

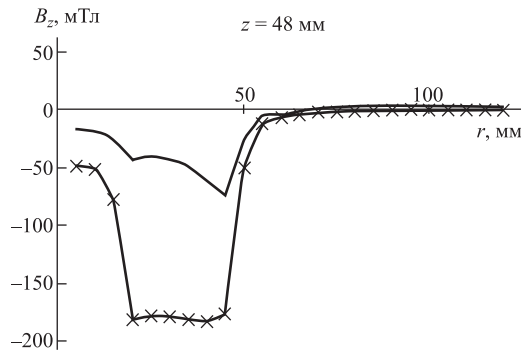


Рис. 8. Зависимость  $B_r(r)$  с ярмом (x) и без ярма (—)

и без него показаны на рис.4-8. Начало координат ( $z = 0, r = 0$ ) находится в центре медного диска, ось  $z$  совпадает с осью вращения и направлена

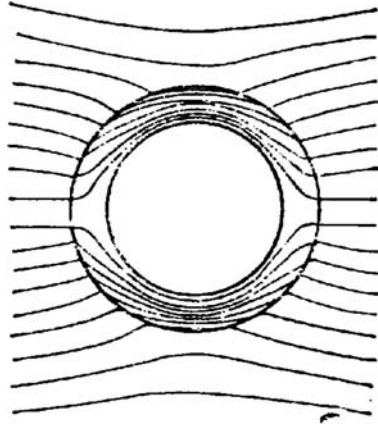


Рис. 9. Экранирование магнитного поля железной трубкой

вправо, а ось  $r$  — по радиусу. Видно существенное влияние магнитопровода на распределение компонент около магнита и вдоль контура измерения ЭДС. Как и предполагалось, везде в районе контура магнитное поле значительно меньше при наличии ярма (рис. 4–7), а в промежутке между вращающимся магнитом и вертикальной пластиной магнитопровода (рис. 8) оно возрастает, следовательно, внутри магнита и медного диска оно увеличено.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Описанный вариант униполярного генератора испытан в трех режимах.

1. Измеряется ЭДС в контуре без магнитопровода и экранирующих трубок на контуре. При вращении магнита со скоростью 1500 об/мин вольтметр регистрирует ЭДС в контуре:  $U = 19$  мВ.

2. Измеряется ЭДС в контуре при наличии магнитопровода без трубок на контуре. При той же скорости вращения вольтметр показывает  $U = 24$  мВ.

3. Измеряется ЭДС в контуре без магнитопровода при наличии трубок на контуре. Величина ЭДС в контуре оказалась такой же, как в первом случае, т. е.  $U = 19$  мВ. Измерения выполняются с точностью 1 мВ.

Изменение направления вращения магнита приводит к изменению знака ЭДС.

Контроль ЭДС с помощью осциллографа показал, что ее переменная составляющая, вызванная неидеальной симметрией магнита и вибрацией щеток, как минимум на порядок меньше, чем постоянная составляющая. Для этого нужно было отрегулировать давление на щетки со стороны пружин.

Измерение магнитометром магнитного поля внутри железной трубки-экрана показало, что оно там практически отсутствует.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Появление ЭДС в нашем и подобных приборах называется униполярной индукцией. Она часто вызывает удивление у тех, кто помнит формулу ЭДС =  $d\Phi/dt$ , поскольку магнитный поток в данном случае постоянный и, очевидно,  $d\Phi/dt = 0$ . Так, читаем: «Несмотря на усилия множества исследователей, строгой теории униполярных машин нет до сих пор» [6, с.26]. Поэтому сначала опишем, как в рамках классической теории можно объяснить работу униполярного генератора.

Здесь следует напомнить, что вышеупомянутая формула есть частный случай общей формулы для ЭДС  $U$ . Она равна контурному интегралу, взятому по замкнутому контуру электрической цепи, от скалярного произведения силы  $\mathbf{F}$  (действующей на заряд  $q$ ) на элемент контура  $d\mathbf{l}$ :

$$U = \int (\mathbf{F} \cdot d\mathbf{l})/q. \quad (1)$$

В нашем случае на заряд действует сила Лоренца, которая в общем случае вычисляется по формуле

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]). \quad (2)$$

В этой формуле  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля,  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля,  $\mathbf{V}$  — скорость заряда  $q$ .  $\mathbf{E}$ , в свою очередь, равна

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi - d\mathbf{A}/dt, \quad (3)$$

где  $\phi$  — электростатический потенциал,  $\mathbf{A}$  — векторный потенциал.

Подставив (3) в (2), получим 3 слагаемых для силы

$$\mathbf{F} = q(-\text{grad } \phi - d\mathbf{A}/dt + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]). \quad (4)$$

Теперь для вычисления ЭДС нужно силу разделить на заряд электрона и проинтегрировать по пути, по которому движется заряд. Получаются три слагаемых. Первое — от градиента потенциального поля — равно нулю. Контурный интеграл от второго слагаемого преобразуется в поверхностный, и получаем  $\mathcal{E}_2 = d\Phi/dt$ , где  $\Phi$  — магнитный поток. В нашем случае  $\Phi = \text{const}$ , поэтому  $\mathcal{E}_2 = 0$ . Третье слагаемое дает нужную нам ЭДС (интеграл можно брать не по всему контуру, а только внутри магнита, где  $\mathbf{V}$  не равно 0):

$$\text{ЭДС} = \mathcal{E}_3 = \int [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]d\mathbf{l}. \quad (5)$$

При вращении диска с постоянной угловой скоростью  $\omega$  получим

$$\text{ЭДС} = \omega \int B_z(r)r dr. \quad (6)$$

А если  $B_z(r) = \text{const} = B$ , поток  $\Phi = BS = B\pi R^2$ ,  $\omega = 2\pi n$  ( $n$  — число оборотов), то из (6) получим очень простую формулу:

$$\text{ЭДС} = \Phi n. \quad (7)$$

Мнение некоторых исследователей заключается в том, что магнитное поле жестко связано с его носителем (через домены, атомы и др.) и вращается вместе с цилиндрическим магнитом. Поэтому его силовые линии пересекают неподвижный измерительный контур, наводя в нем ЭДС. Следовательно, ЭДС возникает в измерительном контуре.

Альтернативное мнение (которое доказывается ниже) заключается в том, что магнитное поле остается неподвижным, несмотря на вращение магнита с диском внутри. Диск пересекает неподвижные силовые линии, и ЭДС наводится в самом диске в соответствии с формулой для силы Лоренца. Для установления, истинно ли последнее утверждение, надо уменьшить магнитное поле около контура и выяснить, как это влияет на ЭДС. Уменьшения магнитного поля около контура мы достигали двумя способами: а) установкой дополнительного магнитопровода (ярма), который одновременно усиливал поле внутри магнита, б) экранированием контура железными трубками, которые уменьшали магнитное поле около контура, что проверялось с помощью магнитометра.

Результаты наших экспериментов показали, что ЭДС при вращении магнита возникает не в контуре, а в медном диске, расположенном между магнитными кольцами. Это позволяет сделать заключение, что при вращении цилиндрически-симметричных магнитов магнитное поле вместе с ними не вращается. В нашем случае магнит и медный диск жестко связаны и вращаются вместе. Если бы магнитное поле вращалось, то скорость электронов проводимости относительно поля равнялась бы нулю и ЭДС отсутствовала бы. Однако исследователи, поддерживающие гипотезу вращающегося поля, полагают, что ЭДС в этом случае наводится вращающимся полем во внешнем контуре. Но установка ярма, уменьшив магнитное поле в районе внешнего контура, не уменьшила ЭДС, а увеличила (из-за увеличения при этом поля внутри магнита в районе диска). Поэтому нет оснований считать, что в описанном выше опыте ЭДС наводится во внешнем контуре. Такой же вывод можно сделать и по результатам третьего опыта с помещением внешнего контура в железные трубки, что не привело к уменьшению ЭДС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Мы доказали, что в нашем эксперименте ЭДС наводится в медном диске. В этом случае следует считать магнитное поле неподвижным, несмотря на вращение его источника — цилиндрического магнита. Отметим, что многие авторы [5–7, 11] и др. утверждали, что это невозможно сделать в экспериментах с униполярным генератором. Представление о том, что поле вращается вместе с его источником, противоречит нашему опыту и не соответствует действительности.

2. Показано, что нет экспериментальных оснований для чисто умозрительных картин электрического поля [6], противоречащих законам электродинамики.

**Благодарности.** Мы благодарим за полезные обсуждения и помощь в изготовлении прибора наших коллег, которые содействовали этой работе, и особенно хотелось бы отметить С. А. Ивашкевича, Н. А. Коржева, И. А. Ломаченкова, Ю. А. Панебратцева и А. А. Тяпкина.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М., 1966.
2. *Фейнман Р. и др.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 5, 6. М., 1966.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М., 1992.
4. *Заев Н. Е., Докучаев В. И.* О поведении линий поля вращающегося магнита // Электротехника. 1964. № 11. С. 64.
5. *Родин А.* О неизвестных опытах по электромагнитной индукции // Электричество. 1994. № 7. С. 67.
6. *Богач В. А.* Гипотеза о существовании статического электромагнитного поля и его свойствах. Препринт ОИЯИ Р13-96-463. Дубна, 1996.
7. *Смирнов В. И.* Экспериментальная проверка гипотезы о существовании статического электромагнитного поля. Препринт ОИЯИ Р13-99-7. Дубна, 1999.
8. *Затолокин В. Н., Леус В. А.* О кинематических эффектах в электромагнетизме // Поиск математических закономерностей. СПб., 2002.
9. *Смирных Л. Н.* Парадоксы униполярной генерации // Поиск математических закономерностей. СПб., 2004.
10. *Калашиников С. Г.* Электричество. М.: Наука, 1977. С. 221.
11. *Tolver Preston S.* // Phil. Mag. 1885. V. 19. P. 131, 215; Phil. Mag. 1891. V. 31. P. 100.

Получено 26 октября 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 09.02.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,12. Тираж 305 экз. Заказ № 56890.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)