

## Дискуссии

# Униполярная индукция: обзор опытов с униполярными электрическими машинами и причины противоречий в объяснении полученных результатов

(по статье Лупарева В.В. и Харитонова В.И., *Электричество*, 2012, № 7)

МАЛЫГИН В.М.

Публикацией обсуждаемой статьи [1] в журнале «Электричество» редакция возобновляет дискуссию об униполярной индукции, при этом отметим, что подобные дискуссии возникали периодически с момента создания униполярных электрических машин (УМ). Это свидетельствует о наличии до сих пор разных точек зрения на физический процесс возникновения ЭДС в УМ. При обсуждении результатов экспериментов, приведенных в [1], сначала сравним эффективность работы описанной там экспериментальной установки с этим показателем у других известных моделей. При этом установим факт наличия или отсутствия тока в электрической цепи при всех возможных вариантах движения составных частей УМ (индуктивных электро-механических преобразователей энергии) различных конструкций. Затем рассмотрим причины так долго длящихся дискуссий о работе УМ, перейдя к понятию движения магнитного поля и к использованию электродинамики тел применительно к УМ.

**Экспериментальные установки для изучения явления униполярной индукции.** В общем случае любые УМ и их модели [1–3], работающие в режиме преобразования энергии, содержат три составные части. Это источник магнитного поля и две части электрической цепи (соединенные контактами скольжения в единый проводящий ток контур), которые могут двигаться относительно источника поля и относительно друг друга. На рис. 1, *a* в модели [1] это цилиндрический магнит, часть цепи *AB* (в виде полого проводящего ток цилиндра) и вторая линейная часть цепи *BCDA*. Вращаются магнит и механически скрепленная с ним часть цепи *AB* (движение рассматриваем в лабораторной системе отсчета, связанной с Землей). В модели, представленной в [2], возможностей больше, так как отдельно может вращаться магнит или часть цепи *AB*. Цилиндр это или диск, как в [2], — принципиального значения для электромеханического преобразования энергии не имеет. Модель, изображенная на рис. 1, *б* [4, с. 546], тоже принципиально не отличается от модели [1], только часть цепи включает магнит из токопроводящего материала (в отличие от модели [1], где аналогичная часть *AB*

электрически изолирована от магнита). В УМ, рассмотренных в [3], магнитная система и внешняя часть цепи (аналог *BCDA*) неподвижны, а вращается обмотка якоря (аналог части *AB*), изготовляемая в том числе в виде параллельно включенных проводящих ток стержней.

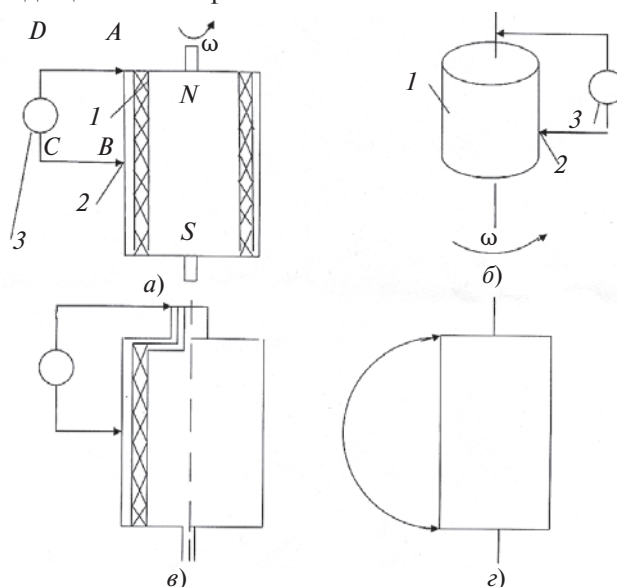


Рис. 1. Модели униполярного генератора: *a* — согласно [1]; *б* — согласно [4]; *в* — вариант модели [1] с увеличенным значением ЭДС; *г* — вариант модели [1] с ЭДС, равной нулю: 1 — вращающийся постоянный магнит; 2 — скользящие контакты; 3 — микроамперметр

Принципиально модель [1] работоспособна, имеет простую геометрию электрической цепи, что облегчает изучение физической стороны работы модели. Ее недостаток, заключается в том, что при работе используется только часть магнитного потока, что показано на приведенном в [1] рис. 4, из-за чего малы значения ЭДС и тока (единицы микроампера, что существенно меньше, чем в модели [2]). Недостаток этот можно устранить, выполнив часть цепи *AB* в виде, изображенном на рис. 1, *в*, переместив точку *A* с контактом скольжения на ось вращения магнита. Это позволит при прочих равных условиях заметно увеличить ЭДС и ток в цепи. Если же дополнительно предусмотреть возможность вращения отдельно еще и частей цепи *AB* и

*BCDA*, то реализуется полный набор всех вариантов относительного движения составных частей УМ. Результаты подобных экспериментов известны [5, с. 167] и показаны для рассматриваемой модели [1] в таблице (при равных значениях угловых скоростей частей).

Номер опыта	Результаты вращения			Наличие тока в цепи
	части цепи <i>AB</i>	части цепи <i>BCDA</i>	магнита	
1	Да	Да	Нет	Нет
2	Да	Нет	Нет	Есть
3	Нет	Да	Нет	Есть
4	Нет	Да	Да	Есть
5	Да	Нет	Да	Есть
6	Нет	Нет	Да	Нет

В [1] реализован только один вариант движения частей УМ (номер 5 в таблице). Причем и этот, и все другие эксперименты подтверждают, что в УМ расчет значения ЭДС приводит к правильному результату, если использовать скорость относительного движения частей цепи и магнита. Расчетные формулы получены в результате обобщения многочисленных экспериментов и постоянно подтверждаются на практике, и все же сделаем по их поводу несколько замечаний.

**Электродвижущая сила униполярной индукции.**

Для расчетов значений ЭДС *E* в УМ можно использовать как обобщенный закон электромагнитной индукции в формулировке Фарадея—Максвелла:

$$E = - d\Phi / dt, \tag{1}$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, проходящий сквозь контур; *t* — время, так и выражение, включающее в себя магнитную составляющую силы Лоренца:

$$E = vBl, \tag{2}$$

где *v* — скорость движения проводника в магнитном поле; *l* — длина движущегося в магнитном поле проводника; остальные обозначения общепринятые в электротехнике.

Следует иметь в виду, что формула (2) упрощенная: при ее использовании предполагается, что значения магнитной индукции **B** не меняются по площади поперечного сечения магнитного потока и длине движущегося в магнитном поле прямого проводника, который перпендикулярен в пространстве векторам **v** и **B**. В УМ промышленного изготовления [3] это условие выполняется. В моделях же, реализованных согласно [1, 2], оно не выполняется, и следует использовать при расчете значения ЭДС индукции в движущемся в магнитном поле проводника выражение, приведенное, напри-

мер, в [4, с. 350]. Однако это несущественно при рассмотрении принципа работы УМ, и далее не будем на этом задерживаться.

В формуле (1) не требуется увеличивать магнитный поток  $\Phi$  до бесконечно большого при длительной работе УМ, так как в них имеется вращательное движение части цепи в магнитном поле. Это можно наглядно пояснить (используя пространственное представление и зная азы топологии [4, с. 244] простым примером, рис. 1,а. Развернем часть цепи *AB* (полый цилиндр) на плоскости, представим его в виде множества параллельно включенных стержней и удалим все стержни кроме одного, соединяющего контактные кольца. Это увеличит внутреннее электрическое сопротивление УМ, но не повлияет на значение ЭДС. Затем по оставленному стержню разрежем мысленно и развернем якорь УМ (оставшуюся часть полого цилиндра), как показано на рис. 2,а. Далее будем вращать вокруг магнита часть цепи *BCDA*, которая в любой момент времени будет разделять вместе с *AB* (оставленный стержень можно рассматривать как линейный проводник) общий магнитный поток, который участвует в создании ЭДС, на две части. И когда одна часть сечения магнитного потока будет увеличиваться от нуля до максимального, вторая его часть будет с той же скоростью уменьшаться от максимума до нуля, как показано на рис. 2,б. Та же картина будет наблюдаться при вращении части цепи *AB* и неподвижной ее части *BCDA*.

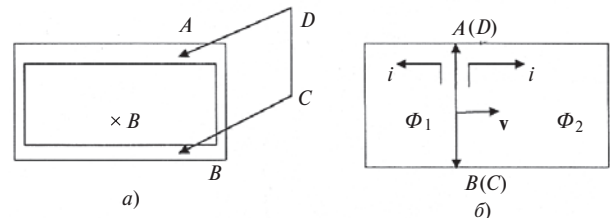


Рис. 2. Схема, поясняющая изменение магнитного потока в УМ: а — развертка полого проводящего цилиндра на плоскости; б — разделение поперечного магнитного потока на две части с изменяющейся площадью их поперечного сечения

Тогда для определения значения ЭДС можно воспользоваться выражением

$$E = - d\Phi_1 / dt = - d\Phi_2 / dt. \tag{3}$$

В результате получим как бы два одинаковых источника ЭДС, включенных параллельно. При этом их внутренние сопротивления будут периодически увеличиваться и уменьшаться, различаясь между собой во времени. При этом в контактных кольцах ток будет менять направление вслед за перемещением контактов скольжения. На практике стержней якоря много (вплоть до сплошного полого цилиндра или диска), и при этом внутреннее со-

противление якоря УМ становится меньше. Если же использовать кольцевой токосъемник, то не будет уже и периодического изменения внутреннего сопротивления УМ.

И еще обратим внимание на то, что формально подойдя к формуле (1), можно получить выражение  $E = -d(\Phi + \Phi_2)/dt = 0$  и сделать ошибочный вывод о непригодности (1) для расчета значения ЭДС в УМ. Однако выражение (1) применимо в общем случае (с учетом сделанного выше замечания), когда магнитный поток меняется из-за изменения индукции поля во времени или (и) изменения площади контура при неизменной во времени индукции за счет движения одной из частей электрической цепи. В (1) используют вместе разные законы электродинамики:  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  для «движущегося контура» и  $\text{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$  для «меняющегося поля» [6, с. 54]. В УМ значение  $\mathbf{B}$  не меняется во времени и поэтому значение ротора  $\mathbf{E}$  равно нулю, а выражение (3) можно представить в виде

$$E = -BdS_1 / dt = -BdS_2 / dt, \quad (4)$$

а отсюда можно перейти к выражению (2), как показано в [7]. Экспериментальным подтверждением отсутствия вихревого электрического поля в УМ служит то, что магнитопроводы якорей УМ [3] выполнены в виде массивных стальных тел, так как отсутствует нагрев их вихревыми токами.

**Причины дискуссий по поводу униполярной индукции.** Трудности с объяснением причины возникновения ЭДС униполярной индукции начинаются тогда, когда в УМ вращается магнит. Можно выделить две основные причины продолжающихся дискуссий. Первая — это отсутствие ясности (в том числе в учебниках физики) относительно движения (вместе с источником) стационарного (в системе отсчета источника) магнитного поля и разночтения по этому вопросу у многих авторов публикаций, на что обращено внимание в [1]. Ряд авторов полагают, что магнитное поле вращается вместе с магнитом, другие же утверждают, что оно неподвижно, а в учебниках по электротехнике и электрическим машинам этот вопрос не рассматривается. Вторая причина — это попытки физиков использовать для анализа работы УМ специальную теорию относительности (СТО) [4, 5], что проявилось и в ряде публикаций в журнале «Электричество» [8], хотя однозначные экспериментальные подтверждения обоснованности такого применения СТО в курсах физики не приводятся. При этом используется формальное преобразование полей и исчезает ясность в физическом объяснении появления электрического поля в проводнике.

*Движется ли магнитное поле?* В курсах физики (а электротехника — это прикладное направление

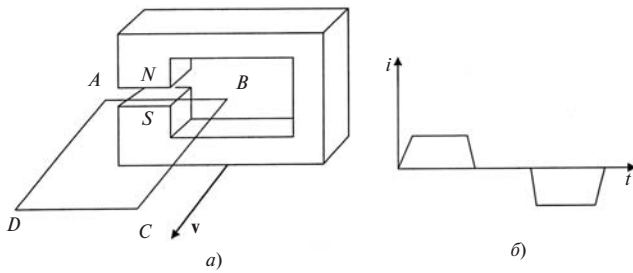
физики) вообще не употребляют термин движущееся поле. Двигутся относительно друг друга две системы отсчета со своими координатными системами. Оси координат всегда связаны с жесткими (не слишком упругими) телами, и с ними, в свою очередь, связываются измерительные приборы, эталоны и другие составляющие данной системы отсчета. «Физически координатная система — это всегда материальное тело» [9, с. 8], которым поле не является (хотя это тоже разновидность материи). С магнитным полем (с воображаемыми магнитными силовыми линиями) нельзя связать систему координат, нельзя говорить о движении проводника относительно поля и поля относительно проводника, на что справедливо указано в [4, с. 546].

Однако можно говорить о движении проводника относительно магнита и магнита относительно проводника, это относительное движение двух твердых тел. А так как стационарное магнитное поле постоянного магнита неразрывно связано с ним и значения  $\mathbf{B}$  определяются в координатной системе магнита, то можно считать, что магнитное поле связано с системой отсчета магнита. Т.е. **проводник в обоих случаях движется в магнитном поле, которое принадлежит системе отсчета магнита, является его составной частью.**

В этом случае имеем две инерциальные системы отсчета и в соответствии с принципом относительности не имеет значения, какая из них движется, а какая считается неподвижной. Конечно, в УМ имеем дело с вращающимися системами. Это не будут уже, строго говоря, инерциальные системы отсчета, но при небольших угловых скоростях и диаметрах роторов (якорей) электрических машин, имеющих место в электромеханике, влиянием механических ускорений на электрические процессы можно пренебречь [10, с. 189] и рассматривать их в электротехнике как инерциальные системы (что часто делают и в курсах электродинамики).

То, что магнитное поле перемещается в пространстве вместе с магнитом, следовало еще из опытов Фарадея. Это можно подтвердить, например, простым экспериментом, схема которого показана на рис. 3. Применительно к конструкции УМ подобный эксперимент описан в [11], но автор статьи сейчас не ссылался бы на теорию относительности для объяснения причины появления ЭДС униполярной индукции в неподвижном проводнике при движении магнита, чего мы коснемся ниже.

Несколько сложнее с вопросом, «вращается» ли магнитное поле вокруг оси неподвижного цилиндрического магнита, в котором циркулируют молекулярные токи (простейшее объяснение ферромагнетизма), вслед за этими токами, или же нет. Экспериментов в [1] недостаточно, чтобы доказать, что поле неразрывно связано с магнитом, принадлежит



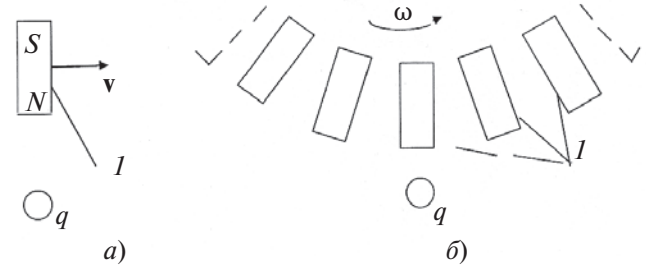
**Рис. 3.** Схема эксперимента с движением постоянного магнита относительно замкнутой электрической цепи (а) и график изменения во времени электрического тока в цепи (б)

к одной с ним системе отсчета, так как одинаковый электрический ток в цепи, который измеряли авторы, будет в обоих случаях: как при вращении магнита и связанного с ним поля (ЭДС возникает на участке цепи BCDA), так и если поле «неподвижно» (связано с лабораторной системой отсчета), а вращается магнит и часть цепи AB (где должна бы тогда возникать ЭДС).

Здесь на помощь приходят результаты других экспериментов. Известно, что на движущиеся в магнитном поле заряды действует сила в направлении, перпендикулярном направлению их движения. Но нет сообщений об обнаружении силы, действующей на неподвижный относительно магнита заряд, расположенный у кромки магнита (на некотором удалении от его оси). Следовательно, в этом случае нельзя говорить о движении заряда во «вращающемся» вслед за молекулярными токами магнитном поле неподвижного постоянного магнита.

*Изменяющееся магнитное поле и связь электрического и магнитного полей.* А теперь разберемся, как же в нашем случае быть с утверждением, приводимым в курсах физики, что поля не движутся, а изменяются [12, с. 276; 13, с. 210]. Известно, что при движении удаленного малого магнита (рис. 4,а) относительно наблюдателя, имеющего измерительные приборы, он обнаружит появление вихревого электрического поля из-за изменения магнитного поля в месте расположения приборов [12, с. 24].

Но есть особый случай, частный для физики, но распространенный в электротехнике, в УМ. Как показано на рис. 4,б, если вращать магнит, то наблюдатель, связанный с системой отсчета заряда, не обнаружит изменения магнитного поля и появления вихревого электрического поля (которое наблюдалось в случае, изображенном на рис. 4,а). Так как сплошной вращающийся магнит можно представить в виде тесно соприкасающихся малых магнитов I, то при удалении одного из них от заряда уменьшение значения магнитной индукции в месте расположения заряда компенсируется увеличением магнитной индукции из-за приближения другого малого магнита к заряду, ситуация каждый раз повторяется. Результирующее значение магнит-



**Рис. 4.** Изменяющееся магнитное поле в системе отсчета, связанной с зарядом q (а), и движущееся относительно заряда магнитное поле вращающегося магнита (б), где I – постоянный магнит

ной индукции в месте расположения заряда не меняется, хотя магнитное поле перемещается в пространстве вместе с магнитами I.

В варианте рис. 4,б на заряд q будет действовать сила Лоренца F, в общем случае выражение для определения которой имеет вид

$$F = qE + q(v \times B), \tag{5}$$

где v – вектор скорости движения заряда относительно магнита – источника связанного с ним стационарного магнитного поля. Так как магнит электрически нейтрален (в отсутствие избыточных электрических зарядов), то в рассматриваемых моделях УМ при неподвижном магните в физике и электротехнике учитывают только второе слагаемое в (5), магнитную составляющую силы Лоренца.

Но при движущемся магните (относительно наблюдателя и неподвижной части цепи) в курсах физики утверждается, что магнит поляризуется и появляется электростатическое поле E [4, с. 548; 5, с. 167] – первое слагаемое в выражении (5). Значение напряженности этого электрического поля определяют в системе отсчета неподвижного заряда путем преобразования полей в соответствии со специальной теорией относительности [13, с. 206]:

$$E \neq (v \times B). \tag{6}$$

При этом создается впечатление, что магнитное поле преобразуется в электрическое просто из-за перехода наблюдателя из одной системы отсчета (связанной с магнитом) в другую систему отсчета (связанную с проводником). В СТО исходят из симметрии электромагнитного поля относительно векторов E и B, но такая симметрия есть только в электромагнитных волнах (отсутствующих в УМ), уравнения Максвелла не симметричны относительно электрического и магнитного полей [10, с. 337]. Постоянный магнит (при макроскопическом подходе к полю в веществе [13, с. 45] и отсутствии избыточных зарядов одного знака) создает только магнитное поле, а электрического поля он вообще не создает. Да, это исключение, крайний случай (ко-

гда можно говорить о магнитостатике), но достаточно важный для практической электротехники.

В УМ нет непосредственной связи магнитного поля с полем электрическим (см. пояснения к рис. 4, б). Это тоже частный случай, но уже в электродинамике движущихся тел. Заметим, можно показать, что с позиций математики эти случаи соответствуют особым точкам в решении общих дифференциальных уравнений электродинамики.

Связь полей в УМ осуществляется путем воздействия магнитного поля на движущиеся в нем (вместе с проводником части цепи) электрические заряды, что следует из [14, с. 251], заряды разных знаков в веществе смешаются в противоположных направлениях, из-за чего возникает электрическое поле (физическое объяснение появления поля индукции  $E_{\phi}$ ). При движении диэлектрика в магнитном поле это может проявляться как его поляризация. При движении отрезка проводника на его поверхности появляются разноименные заряды, ЭДС уравнивается разностью скалярных потенциалов электрического поля (это режим холостого хода униполярного генератора). Тогда внутри проводника ток и макроскопическое электрическое поле отсутствуют (при постоянной скорости движения проводника в равномерном магнитном поле), и этот случай можно рассматривать как электростатический (нет направленного движения зарядов в веществе, нет преобразования энергии). Если же ЭДС возникает в движущейся в магнитном поле части замкнутой цепи (контур), в работающем униполярном генераторе, то в цепи возникает электрический ток. Происходит преобразование механической энергии в энергию электрическую (а затем в энергию тепловую и(или) снова в механическую энергию), и это уже случай из электродинамики. Хотя для определения значений ЭДС в обоих случаях мы используем одни и те же выражения (1) и (2), но нужно иметь в виду, что за ними в УМ стоят разные физические процессы (статика или динамика).

Представленная здесь в общих чертах физическая сторона работы УМ опирается на результаты экспериментов и электродинамику Максвелла. При этом нет необходимости обращаться к помощи СТО, этот достаточно сложный и требующий отдельного рассмотрения вопрос подробнее изложен в [15]. Там сделан вывод о нецелесообразности ее использования, так как теория электрических машин постоянного тока (где скорости движения тел, взаимодействующих посредством магнитного поля, существенно меньше скорости света) не входит в область ее анализа. Мы же не используем волновые уравнения электродинамики Максвелла при анализе работы цепей постоянного тока, хотя признаем наличие электромагнитных волн и используем их в

радиотехнике. Так же, не отрицая СТО, не следует использовать ее для анализа работы УМ, где можно, как минимум, пренебречь возможными ничтожными эффектами при учете весьма малого значения отношения скорости тел к скорости света.

**Выводы.** 1. Введение понятия движущегося, вращающегося вместе с постоянным магнитом магнитного поля в рамках электродинамики Максвелла в достаточной мере позволяет дать ответ на все вопросы относительно возникновения ЭДС униполярной индукции в УМ.

2. Использование СТО при анализе работы УМ является излишним, поскольку она не позволяет выявить физические причины возникновения ЭДС униполярной индукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лупарев В.В., Харитонов В.И. Об одном ошибочном утверждении, связанном с явлением униполярной индукции. — Электричество, 2012, № 7.
2. Родин А.Л. О неизвестных опытах по электромагнитной индукции. — Электричество, 1994, № 7.
3. Иванов-Смоленский А.В., Шаталов А.С. Об электромеханическом преобразовании энергии в униполярной электрической машине. — Электричество, 1998, № 7.
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Физматлит, 2003.
5. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика/Пер. с англ. — М.: Физматлит, 1963.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, вып. 6. Электродинамика/Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
7. Иванов-Смоленский А.В. Комментарий к статье «О неизвестных опытах по электромагнитной индукции». — Электричество, 1994, № 7.
8. Базанов В.П. О неизвестных опытах по электромагнитной индукции. — Электричество, 1996, № 11.
9. Угаров В.А. Специальная теория относительности. — М.: Наука, 1977.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т. 3. Электричество. — М.: Физматлит, 2006.
11. Малыгин В.М. Униполярный генератор: электромагнитная индукция и теория относительности. — Электричество, 2003, № 10.
12. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.5. Электричество и магнетизм/Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2004.
13. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. — М.: БИНОМ, 2007.
14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Гардарики, 2003.
15. Малыгин В.М. Парадоксы электромеханики: принцип относительности при наличии движущегося (с источником) магнитного поля. — Электрика, 2012, № 10.

[01.11.12]

*Автор: Малыгин Вячеслав Михайлович, окончил в 1966 г. факультет автоматики и телемеханики Московского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1987 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию «Диагностирование подшипниковых узлов высокоскоростных электрических машин». Начальник лаборатории отдела метрологии и измерительной техники НИИ электромеханики, г. Истра.*

