

УДК 537.6/.8;537.811

## О ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.

Автономов В.Н. .

Несмотря на большое время, прошедшее после открытия явления электромагнитной индукции (далее ЭМИ) М.Фарадеем в 1832г., а затем и закона ЭМИ Х.Лоренцем, остаются без решения такие вопросы, как определение величины ЭДС на концах проводника любой формы и произвольного расположения относительно магнитного потока и почему возникает ЭДС Лоренца при перемещении проводника из одного положения в однородном магнитном поле  $B$  в другое с точно таким же значением вектора  $B$  ?

И если первый вопрос можно решить, как это сделано в статье, с помощью простых соображений, а ЭДС Фарадея хотя бы как-то объясняется с помощью математически нелегитимного понятия "вихревое (потенциальное) поле  $E$ ", то физическая причина появления ЭДС Х.Лоренца не определяется ни каким образом.

В статье предлагается экспериментальная проверка, действительно ли ЭДС М.Фарадея возникает под воздействием поля  $E$ , а в качестве единой причины явлений ЭМИ и М.Фарадея, и Х.Лоренца, на существование которой надеялся Р.Фейнман, рассматривается воздействие на электроны проводника поля векторного потенциала  $A$ . Такой подход позволяет, между прочим, выяснить и причину неэквивалентности относительных движений проводника и магнита в униполярном генераторе.

Ключевые слова: электромагнитная индукция, векторный потенциал, униполярный генератор.

## ABOUT ELECTROMAGNETIC INDUCTION.

AVTONOMOV V.N.

*Moscow..*

Despite the long period of time passed since the discovery of the Electromagnetic induction (abbreviated EMI) by M.Faraday in 1832 and the law of EMI by H.Lorentz several questions are left unanswered. One such issue is calculating EMF on the ends of a conductor of any shape and placement relative to the magnetic field. Another subject is the reason for the appearance of Lorentz's EMF during the movement of a conductor from one point in the uniform magnetic field into another with an identical vector  $B$ . Though the first question can be answered with simple logic, as done in the article, and Faraday's EMF is somewhat explained with the illegitimate mathematical concept "vortex (potential) field  $E$ ", the physical reason for the appearance of the Lorentz's EMF remains undefined. In this article an experiment is proposed that verifies the role of field  $E$  in the appearance of Faraday's EMF. As for the singular reason both Lorentz's and Faraday's EMI, hoped for by R.Feynman, the influence of the vector potential field is considered. This approach allows identification of the reason for the nonequivalence of relative movements of conductor and magnet in unipolar generator.

Key words: electromagnetic induction, vector potential, unipolar generator

В статье рассматриваются три различные задачи

- обобщение формулы Фарадея для незамкнутых контуров любой формы и их расположения относительно магнитного потока
- эксперименты по защите исследуемого контура от электрических полей
- рассмотрение известных экспериментов в парадигме понятия "обобщенный импульс"[1], отражающего корпускулярную сторону квантового дуализма электрона.

{ Однако, следует заметить, что имеется скептический взгляд на существование механического воздействия поля  $A$  на электрон – работа [ 2] }

. Рассмотрим две формы записи закона электромагнитной индукции (далее – ЭМИ)

М.Фарадея для замкнутых контуров.

I. Первая, фактологическая, форма записи – это  $U=d\Phi/dt$ .

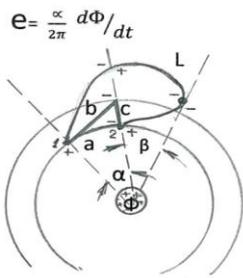


Рис.1. К обобщению закона Фарадея.

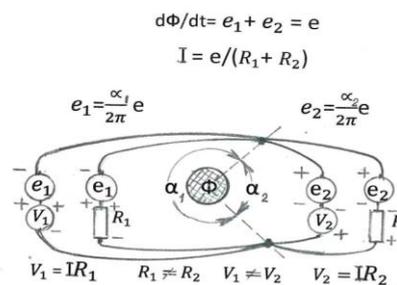


Рис.2. Парадокс двух вольтметров.

На рис.1 представлен охватывающий магнитный поток  $\Phi$  замкнутый контур в форме окружности, в котором индуцируется ЭДС  $U=d\Phi/dt$ . Вследствие идентичности условий для всех участков контура, равных по длине и по положению относительно потока  $\Phi$  для дуги “а” можно написать

$$U(a)=(\alpha/2\pi) (d\Phi/dt) \tag{1}$$

здесь  $\alpha$  - угловой размер отрезка контура.

Если концы незамкнутого контура  $b$  лежат на различных расстояниях от центра потока, то рассмотрим замкнутый контур  $a$ - $b$ - $c$ , в котором фрагмент “с” расположен вдоль радиус-вектора  $R$ , и, следовательно, имеет нулевой угловой размер и величину индуцированной ЭДС  $U(c)=0$ . Учитывая, что  $U(a-b-c)=0$ , получаем  $U(b)=U(a)$ .

При обращении к закону Фарадея в форме (1) угловой размер рассматриваемого контура определяется как алгебраическая сумма угловых перемещений радиус-вектора, считая, например, движение по часовой стрелке со знаком плюс, а против часовой – со знаком минус. Для фрагментов контура  $L$ , находящихся в секторе  $\beta$  ЭДС равны, направлены встречно и, таким образом,  $U(L)=U(a)$ .

Использование обобщенной формы записи (1) для закона электромагнитной индукции делает прозрачным разъяснение “парадокса двух вольтметров”, которому посвящен ряд публикаций [ 3] и сообщений в интернете. Это явление заключается в том, что показания двух вольтметров, подключенных к одним и тем же двум точкам, зависят от положения подходящих к приборам проводников относительно магнитного потока.

Рис.2 все наглядно поясняет.

II В другой форме записи закона М.Фарадея в виде

$$\oint E dl=d\Phi/dt \tag{2}$$

соответствии с парадигмой физической науки XIX века причиной движения электрических

зарядов в проводнике назначается электрическое (вихревое) поле  $E$ , как единственно известный способ воздействия на электрические заряды, несмотря на то, что в потенциальном поле, по определению, не может быть замкнутых векторных линий.

Для исследования роли электрического поля  $E$ , если оно существует, были выполнены простые эксперименты с трансформатором по экранированию дополнительного контура (витка) для измерений. Использовался трансформатор - промышленное изделие - 50Гц. 220в с тороидальным магнитопроводом. Измерения индуцированной ЭДС проводились:

1. для витка из простого (изолированного) провода
2. для витка, экранированного медной оболочкой (ТВ-кабель)
3. для витка, пропущенного через железную трубку  $D=5$   $d=4$ .

Концы экранов либо оставались не соединенными, либо замыкались между собой (к.з. виток в трансформаторе), образуя металлическую оболочку вокруг тороидального пространства, в котором размещен виток для измерения индуцируемой ЭДС.

Показания вольтметра на концах дополнительного витка были во всех вариантах одинаковы (70мв.) и не зависели от заземления экранов. Следовательно, либо пространство внутри оболочки вокруг измерительного контура не защищено от поля  $E$ , что противоречит существующим понятиям и практике, либо поле  $E$  вне магнитопровода (также, как и поле  $H$ ) отсутствует (по крайней мере внутри оболочки).

Таким образом, в экспериментах 2 и 3 мы должны считать причиной ЭМИ не какое-либо электрическое поле, в том числе и "вихревое", а некую "стороннюю силу".

III. В качестве одной из причин появления сторонних сил в явлениях ЭМИ представляется возможным считать воздействие поля векторного потенциала  $A$  на электроны проводника через обобщенный импульс [2], [3]. В работе [4] показано, что металлическая оболочка прозрачна для поля  $A$ . Изменение величины вектора  $A$ , векторные линии которого образуют систему концентрических окружностей вокруг магнитопровода, приводит к изменению уровня энергии электрона, величины его импульса  $P=qA$  и, соответственно, к появлению силы  $F=q(dP/dt)=q(dA/dt)$  вдоль витка в направлении вектора  $dA$ , совпадающего с направлением вектора  $A$ , что позволяет записать (2) в форме

$$\oint (dA/dt)dl = d\Phi/dt. \quad (3)$$

а закон Фарадея считать дифференциальной формой теоремы Стокса  $\oint Adl = \Phi$ .

Обратимся к явлению ЭМИ Лоренца.

Если причину ЭМИ М.Фарадея мы *экспериментально* определили как стороннюю силу, действующую на электрон в поле  $A$ , то для ЭМИ Лоренца необходимость рассмотрения сторонних сил как причины явления однозначна.

В записи закона Лоренца  $\mathcal{E}=V \cdot L$  действие однородного магнитного поля на электроны движущегося проводника представлено вектором магнитной индукции  $B$ . Однако, возникает вопрос – что меняется для электрона, когда он переходит из одной точки пространства в другую с точно таким же значением вектора  $B$ ? И почему меняется полярность индуцируемой ЭДС при изменении направления движения проводника или при изменении полярности магнитов?

Там, где существует магнитная индукция  $B$ , там существует и поле векторного потенциала  $A$ . Посмотрим, как выглядит стандартный эксперимент с движением проводника в магнитном поле, принимая тот же механизм воздействия поля  $A$  на *все* электроны проводника, что и в явлении ЭМИ Фарадея.

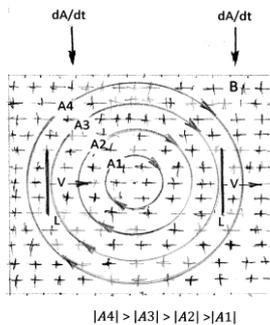


Рис.3 Поле векторов А и векторов В, перпендикулярных плоскости рисунка.

На рис.3 в проекции на плоскость показаны концы векторов поля В (или Н) и концентрические (для простоты) векторные линии поля А. В соответствии с теоремой Стокса для области с  $\text{rot}A > 0$  величины 'а' векторов А имеют значения  $a_4 > a_3 > a_2 > a_1$  и при перемещении проводника со скоростью  $v$ , например слева направо, несмотря на изменение направления векторов А на противоположное, вектор  $dA/dt$  и, соответственно, силы  $F$  сохраняют одно и то же направление и величину (так как для векторных линий радиуса  $r$  величины векторов  $|A| = kr$  и для  $r = vt$   $|dA/dt| = \text{const}$ ). Из этой схемы видно, что изменение направления движения проводника или полярности магнитов приводит к изменению направления вектора  $dA$  и, соответственно, полярности генерируемой ЭДС.

Для векторной линии радиуса  $R$   $\Phi = BS = \pi R^2 B$ ,  $d\Phi/dt = B(2\pi R)dR/dt$ ,

$\oint (dA/dt) dl = (dA/dt) 2\pi R$ . На основании (3) для  $R = vt$  имеем  $dA/dt = BV$  и в проводнике  $L$  индуцируется ЭДС =  $\oint (dA/dt) dL = BVL$ .

Все известные эксперименты по явлению ЭМИ Лоренца выполнялись в пространстве, где существуют одновременно поля и В, и А, поэтому, по формальной логике, желательно провести эксперименты с движением проводника в пространстве, экранированном от поля В.

Здесь отвлечемся немного от основной темы, чтобы вспомнить о ментальном дискомфорте, выраженном в словах Р.Фейнмана – “Мы не знаем в физике ни одного другого такого примера, когда бы простой и точный общий закон (имеется в виду ”правило потока”) требовал для своего настоящего понимания анализа в терминах двух разных явлений” [5]. Эти же слова можно воспринимать и как интуитивное ощущение, что есть общая причина возникновения явлений ЭМИ Фарадея и Лоренца.

Рассмотрим некоторые известные эксперименты с позиции определяющей роли поля векторного потенциала в явлениях электромагнитной индукции.

1. “Краевой эффект “. Для объяснения парадокса Фарадея – появление ЭДС при вращении проводника и отсутствие его при вращении магнита в униполярном генераторе (УГ) в

работах [6,7] рассматриваются два эксперимента, схемы которых показаны на рис.4а и 4б. В рис.4б при покачивании верхнего и нижнего магнитов освобожденные места занимаются цилиндрическими магнитами так, что движение магнитной системы напоминает движение закольцованной ленты и нет ни одного торца, который бы создавал “краевой эффект”, вдвигаясь и “возмущая” (huge magnetic “storms”) [6] свободное пространство созданием поля В, как это происходит в схеме рис.4а. Результаты представлены в таблице.

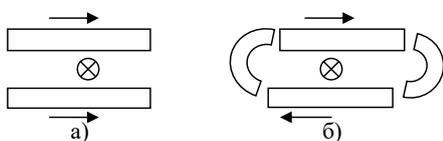


Рис.4 Схемы и результаты экспериментов по “краевому эффекту”.

Картина векторных линий поля векторного потенциала А между магнитами для обеих конструкций представлена на рис.3 и перемещается в пространстве вместе с магнитами в конструкции рис.4а, но остается на одном и том же месте в конструкции рис.4б независимо от смещения фрагментов конструкции, т.к. на место ушедших фрагментов верхнего и нижнего магнитов приходят эквивалентные фрагменты цилиндрических магнитов. Таким образом, в обоих экспериментах определяющим фактором для появления ЭДС является наличие относительного движения между картиной векторных линий поля А и проводником и вводить понятие “краевой эффект” нет необходимости.

Движение		ЭДС		
Провод	Магнит	4.а	4.б	УГ
Есть	Нет	есть	Есть	есть
Нет	Есть	есть	Нет	Нет
Есть	Есть	нет	Есть	Есть

## 2. Эксперимент (“парадокс”) К.Геринга ( $d\Phi/dt \neq 0$ но ЭДС=0)

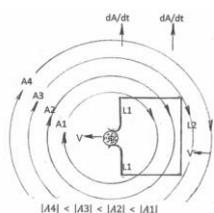


Рис.5. Схема эксперимента (“парадокс”) К.Геринга.

Для определения смысла результата эксперимента К.Геринга поступим следующим образом. В замкнутом контуре выделяем два фрагмента L1 и L2. Величины векторов по теореме Стокса для областей, где  $\text{rot}(A)=0$  соотносятся так:  $a_4 < a_3 < a_2 < a_1$ . Принимая движение магнита справа налево, получаем направления векторов  $dA/dt$  и  $F$  в L1 и L2 навстречу

друг другу при обходе контура, погашая итоговую ЭДС.

Далее, рассматривая скалярное поле "а" модулей векторов А и (центральное) поле  $\Psi = \text{Grad}(a)$  замечаем, что здесь картина точно такая же, как у поля  $\phi$  электрического заряда  $E = \text{Grad}(\phi)$ , и вместо потенциалов  $\phi = \text{const}$  имеем линии  $a = |A| = \text{const}$ . Для вектора Е в статике циркуляция по любому замкнутому контуру равна нулю, а для вектора  $\Psi$  - в динамике, когда имеется относительное движение между магнитом и контуром, пользуясь эвристикой из сказанного, получаем возможность утверждать, что для любого замкнутого контура результат эксперимента К.Геринга для  $\Psi$  записывается в форме

$$\oint (dA/dt) dl = 0.$$

3. Униполярный генератор. После открытия М.Фарадея в 1832г было выполнено много теоретических и экспериментальных исследований об особенностях ЭМИ в униполярном генераторе (см. обзор в [8]) - отсутствие эквивалентности относительных движений между диском-магнитом и немагнитным металлическим диском или радиальным проводником. Актуальность проблемы отмечается и в настоящее время, а время, прошедшее после Фарадея "не такое уж большое, как это может показаться" [9].

Обратившись к векторным линиям поля А в УГ отмечаем, что в непосредственной близости от диска они, как и на рис.3, представляются системой концентрических окружностей, лежащих в плоскостях, параллельных плоскости магнита. При вращении магнита для всех электронов радиус-проводника ничего не меняется и ЭДС не индуцируется. Если же вращается проводник, то для каждого электрона, движущегося вдоль векторной линии А величина вектора постоянна, но направление непрерывно изменяется, что выражается вектором  $dA$ , направленным вдоль радиуса к центру вращения, если направление вращения проводника совпадает с направлением векторных линий, и от центра в противном случае, определяя полярность ЭДС. Именно это постоянное изменение вектора А и порождает силу, действующую на электроны точно так же, как и во всех рассмотренных выше явлениях ЭМИ.

Величина вектора  $dA$  пропорциональна величине вектора А и углу поворота  $\alpha$  радиус-проводника, что при вращении дает  $|dA/dt| = |A|\omega$ . По теореме Стокса  $|A(r)| = (1/2)Br$ . Интегрирование ЭДС по радиус-проводнику R для поля А дает результат вдвое меньший, чем существующая оценка -  $(1/4)B\omega R^2$  против  $(1/2)B\omega R^2$ .

#### **Заключение.**

1. Получена форма записи закона Фарадея, пригодная для незамкнутых контуров любой конфигурации и любого расположения относительно магнитного потока. В замкнутом контуре, не охватывающем магнитный поток, индуцируемая ЭДС=0 как сумма двух

равных встречно направленных ЭДС во фрагментах контура. .

2. Эксперименты с экранированием контуров показывают отсутствие участия какого-либо поля  $E$  в процессе электромагнитной индукции.

3. Исходя из понятия “обобщенный импульс” электрона в поле векторного потенциала  $A$ , рассмотрен механизм появления ЭДС индукции в известных схемах экспериментов как следствие воздействия вектора  $dA/dt$  на электрон. Вектор  $dA/dt$  возникает и от изменения величины действующего на электроны вектора  $A$  и от изменения его направления, как в УГ при переходе радиус-проводника от одного азимута к другому.

Результатами обращения к понятию “обобщенный импульс” являются :

1. - определение закона Фарадея как дифференциальной формы записи теоремы Стокса,
2. отказ от обращения к математически нелегитимному электрическому (потенциальному) полю  $E$  с замкнутыми векторными линиями,
3. выяснение причины появления ЭДС Лоренца при перемещении проводника из одного положения в однородном магнитном поле  $B$  в другое с точно таким же значением вектора  $B$  и показана причина изменения полярности индуцируемой ЭДС при изменении направления движения проводника,
4. - получение формулы ЭДС Лоренца аналитическим путем,
5. - адекватная запись “парадокса” К.Геринга ,
6. отказ от понятия “краевой эффект” ,
7. объяснение причины неэквивалентности относительных движений магнита и проводника в униполярном генераторе (диск Фарадея).

**Вывод.** Обращение к понятию “обобщенный импульс электрона в поле векторного потенциала” приводит к единообразному объяснению всех рассмотренных экспериментов по явлению электромагнитной индукции. Этот результат можно рассматривать как еще один аргумент к признанию физической реальности существования поля векторного потенциала, для чего обычно обращаются к исследованию эффекта Ааронова-Бома [10].

Литература.

1. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. ТОМ II, Теория поля, изд.7, исправленное, , формула (16.5). Москва, Наука 1988г.
2. Е.Л.Фейнберг “Об “Особой роли” электромагнитных потенциалов в квантовой механике”, УФН 1962г., сентябрь, т.LXXVIII, вып.1, стр.53).

3. Robert H. Romer. What do "voltmeters measure?" Faraday's law in a multiply connected region. Am. J. Phys. 50(12), Dec. 1982. pp. 1089-1093.
4. В.Ф. Апелцин, А.И. Полетаев. О влиянии металлических экранов на поле векторного потенциала. УДК 537.86:517.958 Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып.9
5. Фейнмановские лекции по физике, т.6, гл.17, §1, стр.54. Москва, изд. ЛИБРОКОМ, 2014, <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81>
6. F.J.Muller. Unipolar Induction Revisited: New experiments and the "Edge Effect" Theory. IEEE Transactions on Magnetics. Vol.50, No.1, January 2014, Art. ID 7000111.
7. F.J. Muller. The Edge Effect in a Rectilinear Motional Induction Experiment, IEEE Transactions on Magnetics. Vol.50, No.7, July 2015 Art. ID 8002313.
8. Harry H. Ricker III. Unipolar Induction: An Unsolved Problems of Physics and Scientific Method. <https://studyres.com/doc/14387263/unipolar-induction>
9. Keith Zengel. The history of the Faraday paradox of the unipolar generator. Eur.J.Phys. 40 (2019) 055202 (10pp).
10. Мейлихов Е.З. Физическая реальность векторного потенциала. Эффект Ааронова-Бома и монополю Дирака. Издательство Интеллект, 2015г.

Код поля изменен