

ЭДС САМО- И ВЗАИМОИНДУКЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ "ЭЛЕКТРОТОНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ" ФАРАДЕЯ

Боев В.М., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра ТОЭ

тел. (057) 707-69-61

В статье предпринята попытка объяснить физический смысл процесса само- и взаимоиנדукции на основе понимания векторного потенциала, как "эквивалента току электричества". Посвящена 175-летию первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" Майкла Фарадея.

У статті зроблена спроба пояснити фізичне значення процесу саме- і взаємоіндукції на основі розуміння векторного потенціалу, як "еквівалента струму електрики". Присвячена 175-річчю першої серії "Експериментальних досліджень по електриці" Майкла Фарадея.

*К 175-летию первой серии
"Экспериментальных исследований
по электричеству" Майкла Фарадея.*

Существует две точки зрения, два подхода к научному познанию законов природы. Назовем их условно – математическим и физическим. Первый нашел свое отражение в высказываниях таких ученых, как Галилей – "Книга Природы написана на языке математики", Дирак – "Можно сказать, что бог является математиком весьма высокого класса и в своем построении вселенной он пользовался весьма сложной математикой" [1], Гейзенберг – "... обычный язык не позволяет однозначно описать поведение мельчайших единиц материи, тогда как математический язык способен недвусмысленно выполнить это" [2], Эйнштейн – "Весь предшествующий опыт убеждает нас в том, что природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов... Настоящее творческое начало присуще именно математике" [3].

Второй подход основан в первую очередь на познании физической сущности явлений. Яркими представителями такого подхода являются: М.Фарадей, Дж.К.Максвелл, О.Хэвисайд, Миткевич В.Ф. Как известно, Фарадей не владел высшей математикой и все свои открытия и законы выводил из экспериментальных исследований и понимания их физического смысла, излагая результаты в четких и ясных формулировках. Концепцию "электротонического состояния", к которой Фарадей неоднократно возвращался в различных сериях "Экспериментальных исследований по электричеству" [4], он охарактеризовал и обосновал с физической точки зрения безупречно, не найдя однако его экспериментального подтверждения [5]. В первой статье по теории поля "О фарадеевских силовых линиях" [6] Максвелл писал, имея в виду идею "электротонического состояния" Фарадея: "Такая догадка ученого, столь глубоко освоившегося с природой, может иногда иметь больше значения, чем наилучшим образом обоснованный экспериментальный закон...". О самом Максвелле Р.Фейнман писал [7] (имея ввиду механическую модель для объяснения процесса электромагнитной индукции): "Модели очень

часто помогают в работе... Максвелл создал электродинамику, наполнив пространство массой воображаемых шестеренок и зубчатых колесиков. Но колесики и шестеренки мы отбросили, а теория осталась". Оливер Хэвисайд, отстаивая необходимость физической трактовки научных исследований и выводов, писал: "Нужно по возможности полнее избегать вошедшего в обычай избавления от физики путем сведения задачи к чисто математическому упражнению" [8]. Миткевич В.Ф. во второй дискуссионной беседе "О природе электрического тока" [9] говорит следующее: "Я смущен до чрезвычайности. Он применил особый полемический прием. Я стремился поспорить с физиком Френкелем Я.И., а он подменил физика чистым математиком. У нас нет общего языка...".

Мы не намерены противопоставлять физическую и математическую точки зрения. Наоборот, они часто дополняют одна другую. Максвелл в предисловии к "Трактату об электричестве и магнетизме" [6] пишет: "Когда я переводил то, что считал идеями Фарадея, в математическую форму, я нашел, что в большинстве случаев результаты обоих методов совпадали, так что ими объяснялись одни и те же явления и выводились одни и те же законы действия...". Роберт Фейнман писал [7]: "Истину можно узнать по простоте и изяществу". Кто станет оспаривать простоту и изящество закона электромагнитной индукции или закона непрерывности магнитного потока Фарадея. Поль Дирак написал на стене кабинета теоретической физики МГУ (3.10.1956 г.) [10]: "Физический закон должен быть математически изящным". Кто станет оспаривать изящность уравнений Максвелла.

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\delta}; \quad \oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = i; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad e = \oint_l \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad \oint_s \bar{B} \cdot d\bar{S} = 0; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho; \quad \oint_s \bar{D} \cdot d\bar{S} = q. \quad (4)$$

Можно только добавить к этому любимую фразу П. Дирака: "С этой точки зрения было бы удивительно, если бы природа не использовала такой возможности" [11].

Отметим все же, что математика, как основа научных исследований, характерна для ученых, занимающихся бесконечно малыми и бесконечно большими объектами (микромир и астрофизика). Нам, представителям технических наук, имеющим дело с реальными электротехническими устройствами, более близка вторая точка зрения, основанная на понимании физического смысла процессов и уравнениях Максвелла (1)-(4). В данной статье мы попытаемся дать ответ на вопрос, как происходит процесс наведения ЭДС само- и взаимной индукции, опираясь на понимание магнитного поля, как вихрей векторного потенциала ("электротонического состояния") $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ [5].

Миткевич В.Ф. в работе [12] анализирует три формулировки закона электромагнитной индукции (2): Фарадея, Максвелла и предложенную им самим. Рассмотрим процесс наведения ЭДС внешним магнитным полем в прямолинейном проводнике некоторого проводящего контура, рис. 1. Закон электромагнитной индукции (2) определяет ЭДС

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где $d\Phi$ – количество пересекаемых проводником линий внешнего магнитного поля за время dt (Фарадей) или изменение внешнего магнитного потока, охватываемого нашим контуром (Максвелл).

Согласно трактовке Миткевича В.Ф.

$$d\theta = -d\Phi$$

это количество силовых линий, "отпочковавшихся" от внешнего потока и нанизанных на проводник. Тогда наводимая в проводнике ЭДС

$$e = \frac{d\theta}{dt}.$$

ЭДС и силовые линии $d\theta$ связаны правилом правого винта, поэтому знак минус отсутствует.

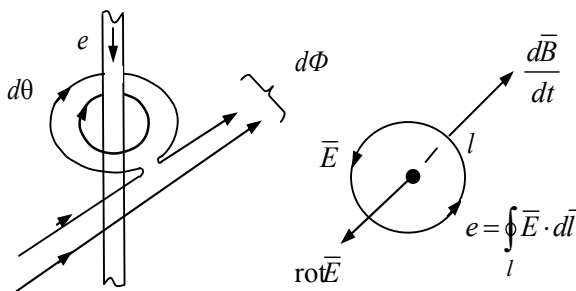


Рис. 1.

На рис. 1 показаны две силовые линии – одна уже пересекла проводник и от нее "отпочковалась" и нанизалась на проводник кольцевая силовая линия, а вторая находится в процессе преобразования в момент, предшествующий замыканию и "отпочкованию" кольцевой линии. Предполагается, что описанный процесс имеет место при движении проводника во внешнем поле справа-налево, или при движении си-

ловых линий внешнего поля относительно неподвижного проводника слева-направо. Мы здесь принимаем Фарадеевское понимание процесса развития магнитного поля в пространстве при возрастании тока в источнике, создающем внешнее магнитное поле (например, проводниковый контур с током, находящийся левее нашего проводника), как распространение (удаление от источника) силовых линий магнитного потока (полагаем, квантов магнитного потока Φ_0 [5]). Таким образом, мы рассмотрели процесс наведения ЭДС взаимной индукции. В случае, когда ЭДС наводится в проводящем контуре с током собственным изменяющимся магнитным полем, то о пересечении силовыми линиями проводника говорить затруднительно. Приращение собственного магнитного потока $d\Phi$ можно трактовать как возникновение магнитных звеньев (кольцевых силовых линий), нанизанных на проводник. Поэтому формулировки Максвелла и Миткевича совпадают:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\theta}{dt}.$$

Однако все три формулировки обходят молчаливым вопросом о том, каким образом изменяющееся магнитное поле создает ЭДС и ток само- и взаимной индукции. Если, согласно с [5], рассматривать силовые линии магнитного поля с вихревыми трубками векторного потенциала ("электротонического состояния", как "эквивалента току электричества" по Фарадею), то электрическим полем окажется изменяющийся во времени векторный потенциал, поскольку из (2) и определения индукции \vec{B} через векторный потенциал $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ следует

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}. \quad (5)$$

Рассмотрим процесс взаимной индукции, представив силовые линии магнитного поля на рис. 1, содержащими вихри векторного потенциала, рис. 2.

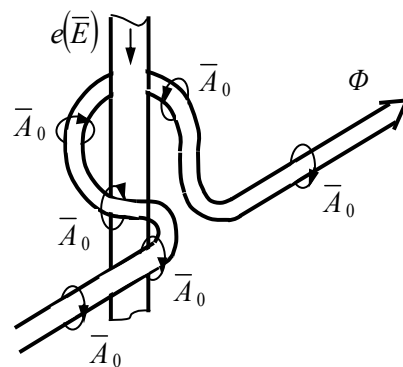


Рис. 2.

Из рис.2 следует, что напряженность электрического поля \vec{E} (и ЭДС взаимной индукции e), а значит и ток взаимной индукции, направлены по действию вихрей векторного потенциала \vec{A}_0 на поверхность проводника. Для носителей заряда в проводнике процесс вхождения вихрей вектора \vec{A} внутрь проводника равнозначен изменению векторного потенциала во времени

(5). Таким образом, "отпочковавшаяся" от внешнего поля и нанизанная на движущийся проводник кольцевая силовая линия несет в себе действующее (на заряды) начало в виде вихрей векторного потенциала.

Процесс самоиндукции рассмотрим на примере прямолинейного проводника с током, рис. 3.

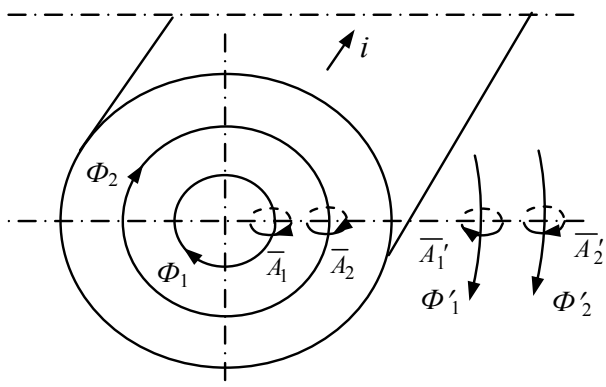


Рис. 3

Для наглядности будем считать, что силовые линии Φ_1 и Φ_2 возникают под действием изменяющегося тока в непосредственной близости от оси проводника и распространяются с некоторой скоростью в радиальном направлении (расположенные симметрично относительно оси проводника нити тока будут создавать на радиусе своего расположения также соосные с Φ_1 и Φ_2 силовые линии). Заметим здесь, что показанные на рис. 3 в виде двух колец вихри A_1 и A_2 на самом деле распределены равномерно по длине окружности – силовой линии (Φ_1 и Φ_2 соответственно). Если ток i в проводнике возрастает, то приращение потока $\Delta\Phi > 0$ (например, в Φ_2 на один квант потока, а в Φ_1 – несколько), и вихрь A_1 изменяется больше вихря A_2 , следовательно, в месте их соприкосновения превалирует A_1 , а значит действует электрическое поле (как изменение макроскопического векторного потенциала в единицу времени (5)), направленное встречно току i (картина распределения вихрей \bar{A}_0 в этом случае может быть уподоблена распределению микротоков в поперечном сечении неравномерно намагниченного парамагнетика (линейного ферромагнетика) [13]). Если ток i уменьшается, то в месте соприкосновения вихрей A_1 и A_2 будет превалировать A_2 и результирующее действие в виде электрического поля будет направленно по току i . Подобным же образом происходит процесс и вне проводника (линии потока Φ'_1 и Φ'_2 , вихри потенциала A'_1 и A'_2) и если там окажется другой проводник, то в нем будет наводиться ЭДС взаимной индукции.

Таким образом, трактуя "электротоническое состояние" Фарадея, как "эквивалент току электричества" и принимая во внимание соотношение (5), возможно качественно объяснить процесс само- и взаимной индукции в законе электромагнитной индукции (2). Отметим в заключение, что однонаправленные линии векторного потенциала \bar{A} притягиваются, а разнона-

правленные – отталкиваются (как и соответствующие токи), что следует, например, из рис. 2, где сближающиеся концы кольцевой силовой линии притягиваются, как разнонаправленные потоки Φ_0 . Свойство продольного тяжения силовых линий магнитного поля (стремление сократится по длине) также можно рассматривать как притяжение одинаково направленных вихрей векторного потенциала A_0 .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дирак П.А.М. Эволюция взглядов физики на картину природы. – Вопросы философии, 1963, №12, с. 83-94.
- [2] Гейзенберг В. Шаги за горизонт. Сборник статей. – М.: Прогресс, 1987, 368 с. (с. 117).
- [3] Максвелл и развитие физики XIX-XX веков. Сб. статей. – М.: Наука, 1985, 245 с. (с. 205).
- [4] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. – М.: Изд. АН СССР, Т.1. – 1947, Т.2 – 1951, Т.3 -1954.
- [5] Боев В.м., Грибская Е.А., Лавриненко О.В. "Электротоническое состояние" и закон электромагнитной индукции Фарадея. – Электротехника и электромеханика, 2004, № 4, с.5-8.
- [6] Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Госиздат. – 1954, 687 с.
- [7] Фейнман Р. Характер физических законов. Перев. с англ.: - М.: Мир, 1968, 232 с.
- [8] Болотовский Б.М. Читайте Хэвисайда. – В кн. Максвелл и развитие физики XIX-XX веков. Сб. статей. – М.: Наука, 1985, 245 с. (с. 96-133).
- [9] Миткевич В.Ф. О природе электрического тока. Вторая дискуссионная беседа. – Электричество, 1930, №8, с. 337-350.
- [10] Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. – М.: Высш. шк., 1990, 352 с.
- [11] Санюк В.И., Суханов А.Д. Дирак в физике XX века. – УФН, 2003, № 9, с. 965-984.
- [12] Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразование. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946, 356 с.
- [13] Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш. шк., 1991, 288 с.

Поступила 1.03.2005