

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

(взгляд физика)

kkann@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1. ЗАКОНЫ И «ПАРАДОКСЫ» ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ	3
2. «ДВУЛИКАЯ» ИНДУКЦИЯ	6
2.1. Электромагнитная индукция в движущемся проводнике.....	6
2.2. Электромагнитная индукция в замкнутом контуре.....	7
2.3. Разрешение «парадоксов»	10
2.4. И еще один «парадокс»	10
3. О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	13
4. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.....	17
5. ГЕНЕРАЦИЯ И РАСХОДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	22
5.1. Сторонние силы и их свойства	22
5.2. Генератор постоянного тока	23
5.3. Обобщенный закон Ома	25
5.4. Электрическая энергия	28
6. ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	30
6.1. Гармонический индукционный электрогенератор	30
6.2. Фазовые соотношения в замкнутом контуре	32
7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	36
7.1. О системе уравнений электродинамики	36
7.2. Электромагнитные волны	37
7.2.1. Фазовые соотношения в ЭМВ	37
7.2.2. Ток смещения	38
7.3. О природе электромагнитных волн.....	39
7.3.1. Сторонние силы в ЭМВ.....	40
7.3.2. Энергия ЭМВ.....	42
8. РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И НЕМНОГО МОРАЛИ	45
8.1. Остановиться, оглянуться... ..	45
8.2. Кто виноват?.....	46
8.3. «Математическая инфляция» в физике	48
8.4. Что делать?	49
Условия использования данного документа	50

ВВЕДЕНИЕ

На нас <ученых> лежит обязанность позаботиться о распространении и развитии не только истинных научных принципов, но и духа здорового критицизма при рассмотрении данных, на которых основываются утверждения, кажущиеся научными.

Дж. К. Максвелл

Впервые люди столкнулись с электричеством более 2000 лет назад, когда обнаружили, что янтарь, потертый о шелковую ткань, получает способность притягивать перышки. Позднее выяснилось, что электрические заряды бывают двух видов – положительные и отрицательные, что они взаимодействуют: одноименные заряды отталкиваются, а заряды с разными знаками притягиваются. Ш. Кулон оценил силу этого взаимодействия количественно («Закон Кулона»). Для описания электростатического взаимодействия М. Фарадей предложил удачную математическую модель – *электрическое поле*:

Любой заряд создает вокруг себя пространство, в каждой точке которого на другой заряд, помещенный в эту точку, действует кулоновская сила.

Это предложение определяет единственное свойство электрического поля, которое позволяет экспериментально отличить его от «пустого» пространства. Со временем электрическому полю приписали энергию, массу, импульс и другие характеристики материальных объектов. Так из *математической абстракции* электрическое поле превратилось в *физическую реальность*.

С магнетизмом люди знакомы очень давно. Компас был изобретен в Китае еще 1000 лет назад. Так что практическое использование магнетизма началось задолго до того, как люди познакомились с электричеством. В 19-ом веке магнитные процессы начали описывать с помощью *магнитного поля*, которое вскоре тоже получило статус материального объекта. В отличие от разомкнутого (*потенциального*) электрического поля, создаваемого зарядами, магнитное поле оказалось *вихревым* (замкнутым). Магнитные заряды («монополи») до сих пор не обнаружены.

Хотя некоторые *электродинамические* процессы (молния, «животное» электричество, электролиз, электропроводность металлов и др.), связанные с движением электрических зарядов, были уже известны, годом рождения *электродинамики* считается 1820 год, когда Х. Эрстед обнаружил, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. В этом же году А. Ампер определил силу взаимодействия между электрическим током и магнитом. С этих открытий началось изучение электрических и магнитных явлений, как проявлений единого *электромагнитного* механизма.

1. ЗАКОНЫ И «ПАРАДОКСЫ» ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Наиболее выдающимся результатом для последующего развития электродинамики и практической электротехники явилось экспериментально обнаруженное явление *электромагнитной индукции* (далее – ЭМИ). Это открытие сделал в 1831 году талантливый английский физик-экспериментатор Майкл Фарадей.

Фарадей установил, что переменное магнитное поле, пронизывающее замкнутый проводящий контур, вызывает в контуре электрический ток. Явление электромагнитной индукции Фарадей сформулировал (примерно) так:

Заряд Δq , прошедший по замкнутой цепи, пропорционален изменению магнитного потока $\Delta\Phi$, и обратно пропорционален сопротивлению цепи R :

$$\Delta q = \Delta\Phi / R. \quad (1.1)$$

Со временем эта формулировка претерпела некоторые изменения. Не следуя исторической достоверности, эти преобразования можно представить так:

Запишем соотношение (1.1) в дифференциальной форме: $dq = d\Phi / R$. Заряд, прошедший по цепи за время dt , определяется током I : $dq = Idt$. Тогда

$$Idt = \frac{d\Phi}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.2)$$

Домножим (1.2) на сопротивление контура R . Получим:

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.3)$$

где $\mathcal{E} = IR$ – электродвижущая сила (ЭДС) индукции в контуре (закон Ома).

Для оценки направления индукционного тока российский академик Э. Ленц ввел в соотношение (1.2) знак « \leftarrow » («Правило Ленца»). С поправкой Ленца получаем выражение основного закона ЭМИ в той форме, в которой он вошел в знаменитую систему уравнений электродинамики Дж. Максвелла:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.4)$$

Таким образом, выражение (1.4) получено из экспериментальной зависимости Фарадея (1.1) с помощью строгих (тождественных) математических преобразований на основе не менее строгих и надежно установленных соотношений. Но физический смысл этого выражения... совершенно другой, чем у Фарадея. Действительно: если у Фарадея изменяющийся магнитный поток перемещает по проводнику электрический *заряд*, то согласно (1.4) переменный во времени магнитный поток создает в проводнике *электрическое поле*. Но это уже принципиально другой процесс – возникновение электрического поля под действием переменного магнитного поля! В соотношении (1.4) нет ни тока, ни электрических зарядов. Создается *иллюзия*, что электрическое поле может быть получено *непосредственно* из магнитного поля – без участия электрических токов и зарядов. Ничего подобного из экспериментов Фарадея не

следует. Таким образом, строгость *математических* преобразований не гарантирует сохранение *физического* содержания природного явления.

За два столетия развития электродинамики определение Фарадея было практически забыто, а «Законом Фарадея» сегодня повсеместно называют его «максвелловскую» формулировку (1.4).

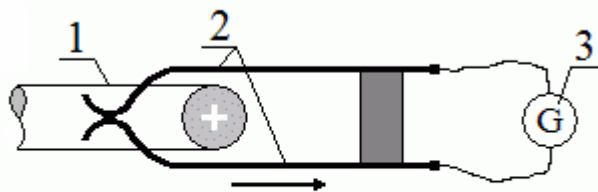


Рис. 1-1

Сформулированная проблема может показаться надуманной: ведь математическое выражение закона электромагнитной индукции безупречно, он дает правильный *количественный* результат в различных ситуациях и успешно используется в самых разных областях электроники и электротехники – от электронного механизма наручных часов до электрогенераторов и ускорителей элементарных частиц! Стоит ли «ломать копья» из-за некоторого искажения физического смысла явления? По моему мнению – стоит! Если даже нет ни одного экспериментального факта, противоречащего закону, из-за логического противоречия рано или поздно такие факты появятся. А в нашем случае эти факты уже давно известны.

В середине 20-го века был поставлен эксперимент, в котором нарушался закон электромагнитной индукции (1.4). Результат этого эксперимента получил название «Парадокса Геринга» (“Herring's paradox”). Экспериментальное устройство Геринга схематически представлено на Рис. 1-1. Оно состоит из тороидального (постоянного) магнита 1 и двух упругих пластин 2, образующих вместе с гальванометром 3 замкнутую цепь. При перемещении магнитопровода 1 влево он «выскальзывает» из пространства, охваченного цепью. При этом благодаря пружинному контакту между пластинами цепь гальванометра все время остается замкнутой (через металлический мостик – магнитопровод). Согласно закону электромагнитной индукции (1.4) при извлечении магнита из цепи в ней должна возникать ЭДС индукции, а, следовательно, и электрический ток. «Парадокс» заключался в том, что гальванометр этот ток «не видел»!

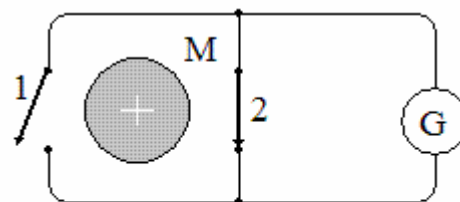


Рис. 1-2

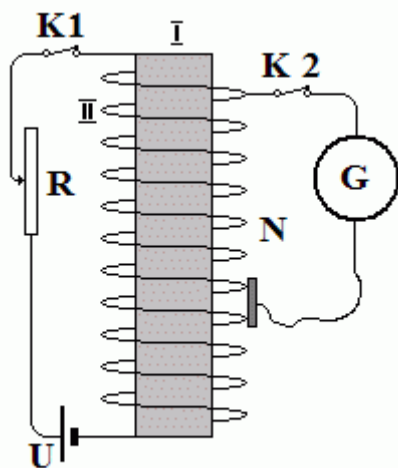


Рис. 1-3

Этот результат вызвал в научной печати бурную дискуссию, которая продолжалась более 20 лет. В ходе обсуждения были поставлены новые измерения и были обнаружены другие схемы, в которых «Закон Фарадея» тоже не выполнялся. На Рис. 1-2 приведена схема, предложенная в 1968 году Тилли (Tilley) [1]. Цепь состоит из двух контуров. В правый контур включен гальванометр G, а через левый пропущен постоянный магнит M. Если закрыть выключатель 1 и открыть выключатель 2, то – согласно закону (1.4) – стрелка гальванометра должна показать кратковременный всплеск индукционной ЭДС в контуре. В эксперименте эта ЭДС отсутствует.

Дискуссия зашла в тупик. «Парадоксы» остались неразгаданными, но... и не были забыты! Недавно в «Европейском физическом журнале» опубликована

работа испанских физиков [4], в которой они вновь обращаются к так и не разрешенным парадоксам ЭМИ 60-ти-летней давности. Анализируя вывод «Закона Фарадея» из системы уравнений Максвелла (?!), они пришли к выводу, что этот закон справедлив лишь в том случае, когда внешнее магнитное поле и форма электрического контура изменяются непрерывно. Этот результат был проверен на простом лабораторном устройстве, схематически представленном на Рис. 1-3.

Экспериментальное устройство представляло два соленоида, вложенные друг в друга. Первичная цепь состояла из внутренней катушки (I), источника постоянного тока U и реостата R . Вторичной цепью служил внешний соленоид (II), который представлял собой реостат, к движку которого был подключен баллистический гальванометр G .

Когда в контур включен соленоид, содержащий N витков провода, магнитный поток Φ проходит через соленоид N раз. Суммарный поток, пронизывающий контур, оказывается равным $\Psi = N\Phi$. Эта величина называется *потокосцеплением* контура. В этом случае закон электромагнитной индукции записывается так:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(N\Phi). \quad (1.5)$$

Дифференцируя (1.5), получаем:

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}(N\Phi) = -\left(\Phi \frac{\partial N}{\partial t} + N \frac{\partial \Phi}{\partial t}\right). \quad (1.6)$$

Видно, что ЭДС индукции в соленоиде II должна возникать во всех случаях, когда меняется потокосцепление. В частности, если магнитный поток через соленоид не изменяется (как в данном случае), $d\Phi/dt = 0$ и ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -\Phi \frac{dN}{dt}. \quad (1.7)$$

В эксперименте [4] полный магнитный поток (потокосцепление) через соленоид II регулировался изменением числа витков N во вторичной обмотке – включением/выключением ключа $K2$ или перемещением движка соленоида. Однако при любых изменениях числа витков гальванометр не обнаруживал в цепи никакого индукционного тока.

По мнению авторов, причиной тому был дискретный характер изменения «формы контура» (числа витков N). Авторам не удалось найти техническое решение, которое позволило бы изменять «форму контура» плавно и непрерывно. Поэтому отсутствие в катушке II индукционной ЭДС они сочли достаточным доказательством справедливости полученного ими «условия выполнения закона Фарадея». Авторы остались в полной уверенности, что если бы им удалось найти способ изменять «форму контура» плавно, то все стало бы на свои места – был бы реабилитирован «Закон Фарадея», «заработал» бы гальванометр и исчезли «парадоксы».

Чтобы разобраться с «парадоксами» электромагнитной индукции, нам придется познакомиться еще с одним «парадоксом».

[1] Tilley D E 1968 *Am. J. Phys.* **36** 458

[2] Corson D R 1956 *Am. J. Phys.* **24** 126

[3] Nussbaum A 1972 Faraday's law paradoxes *Phys. Educ.* **7** 231–2

[4] L'opez-Ramos A, Men'endez J R and Piqu'e C. Conditions for the validity of Faraday's Law... *Eur. J. Phys.* **29** (2008) 1069–1076

2. «ДВУЛИКАЯ» ИНДУКЦИЯ

2.1. Электромагнитная индукция в движущемся проводнике

ЭДС индукции возникает в любом отрезке проводника, движущемся в магнитном поле, если он при движении пересекает линии магнитной индукции. ЭДС индукции в таком «микродгенераторе» можно рассчитать с помощью схемы, представленной на Рис. 2-1. По параллельным металлическим рельсам, замкнутым с одной стороны проводящей перемычкой AB , в однородном поле с магнитной индукцией \mathbf{B} с постоянной скоростью \mathbf{V} скользит проводящий «мостик» CD длиной l . За время dt магнитный поток, пронизывающий контур $ABCD$, возрастает на величину $d\Phi = Bvl \cdot dt$, откуда

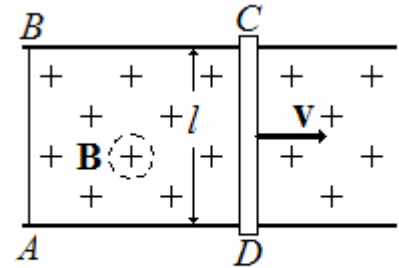


Рис. 2-1

$$\frac{d\Phi}{dt} = Bvl. \quad (2.1)$$

Согласно основному закону электромагнитной индукции (1.4) ЭДС, индуцируемая в контуре, определяется соотношением

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bvl. \quad (2.2)$$

Так как все элементы контура, кроме «мостика» CD , относительно магнитного поля неподвижны, то (2.2) – это и есть ЭДС, возникающая в движущемся проводнике.

Эта же ЭДС возникает и в незамкнутом проводящем отрезке, движущемся в магнитном поле (Рис. 2-2). Считается, что при перемещении проводящего отрезка в магнитном поле, силой, разделяющей заряды q в

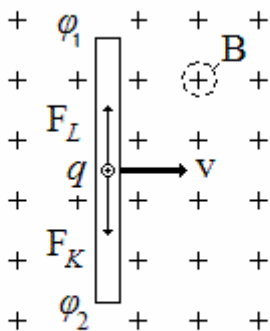


Рис. 2-2

проводнике и создающей на концах отрезка индукционную ЭДС, является магнитная составляющая силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad (2.3)$$

Если скорость движения проводника постоянна, то остается постоянной сила Лоренца и сохраняется разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ (ЭДС) на концах проводника. При прекращении движения заряды в проводнике под действием кулоновских сил «схлопываются» и микродгенератор практически мгновенно «разряжается».

ЭДС в таком индукционном микродгенераторе возникает вследствие того, что проводник *пересекает* линии магнитного поля с некоторой скоростью V . Назовем (для краткости) такой способ генерации индукционной ЭДС «*способом пересечения*». Процесс электромагнитной индукции «с пересечением» можно схематически представить так:

пересечение → возникновение силы Лоренца
→ перемещение зарядов → образование ЭДС

2.2. Электромагнитная индукция в замкнутом контуре

В неподвижном недеформируемом контуре пересечение линий магнитного поля проводниками отсутствует. Изменение магнитного потока, пронизывающего контур, определяется изменением магнитной индукции B . Как же возникает индукционная ЭДС в этом случае? Вот как описан этот процесс в учебнике [1]: «В этом случае объяснение возникновения ЭДС оказывается *в принципе* <курсив мой – К.К.> другим. Изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле E ... Под действием поля E носители тока в проводнике приходят в движение – возникает индуцированный ток».

Назовем такой способ генерация ЭДС *«способом индукции»*.

Сравнивая способ индукции со способом пересечения, автор [2] замечает, что «в результате изменения индукции на элементе проводника dl появляется ЭДС индукции Фарадея, которая не зависит от индукции B и скорости v движения этого элемента, а зависит только от dB/dt . Это и доказывает, что физическая природа ЭДС индукции в этих двух случаях различна». И даже так: «...оба эти явления <два механизма генерации индукционной ЭДС – К.К.> ... независимы друг от друга, и, тем не менее – что удивительно – ЭДС индукции в контуре всегда равна скорости изменения магнитного потока сквозь контур» [3].

Индукционный процесс по способу индукции можно представить так:

изменение магнитного потока → возникновение
ЭДС → перемещение зарядов (индукционный ток)

Таким образом, сегодня электромагнитная индукция имеет «два лица», абсолютно непохожие друг на друга. Сравнив схематическое представление обоих процессов, можно заметить, что они в чем-то смотрятся даже «шиворот-навыворот»: по способу пересечения движение зарядов предшествует возникновению индукционной ЭДС, а по способу индукции – наоборот. Если вдуматься, то в «двуличии» индукционного процесса просматривается извечная проблема: что первично – яйцо или курица, то есть – *заряды или поля*. Попробуем решить эту вечную проблему в одном частном случае.

Многочисленные эксперименты показывают, что ЭДС индукции в замкнутом контуре не зависит от того, каким способом изменяется пронизывающий его магнитный поток. Поскольку движение относительно, то во многих случаях возникновение ЭДС в замкнутом контуре можно свести к механизму пересечения проводниками магнитного потока. Этим механизмом можно объяснить возникновение в контуре индукционной ЭДС при приближении или удалении от контура постоянного магнита, при вращении контура в однородном (или его поступательном движении – в неоднородном) магнитном поле, при деформации контура, приводящей к изменению его площади и/или ориентации, и во многих других случаях. И только один случай не удастся описать этим механизмом – возникновение ЭДС в замкнутом, неподвижном и недеформируемом контуре вследствие изменения магнитной индукции в пронизывающем его потоке.

Уже то обстоятельство, что *только один* экспериментальный факт не удастся объяснить механизмом, безотказно работающим во всех остальных случаях (в том числе – и в замкнутом контуре), заставляет поискать другой способ описания процесса генерации индукционной ЭДС по способу индукции.

Большинство авторов, по-видимому, *представляет* себе механизм изменения магнитного потока так: по мере увеличения магнитной индукции вновь появляющиеся линии магнитного поля как бы «расталкивают» уже существующие линии, увеличивая их плотность. Именно так представлял себе процесс возрастания магнитного потока в

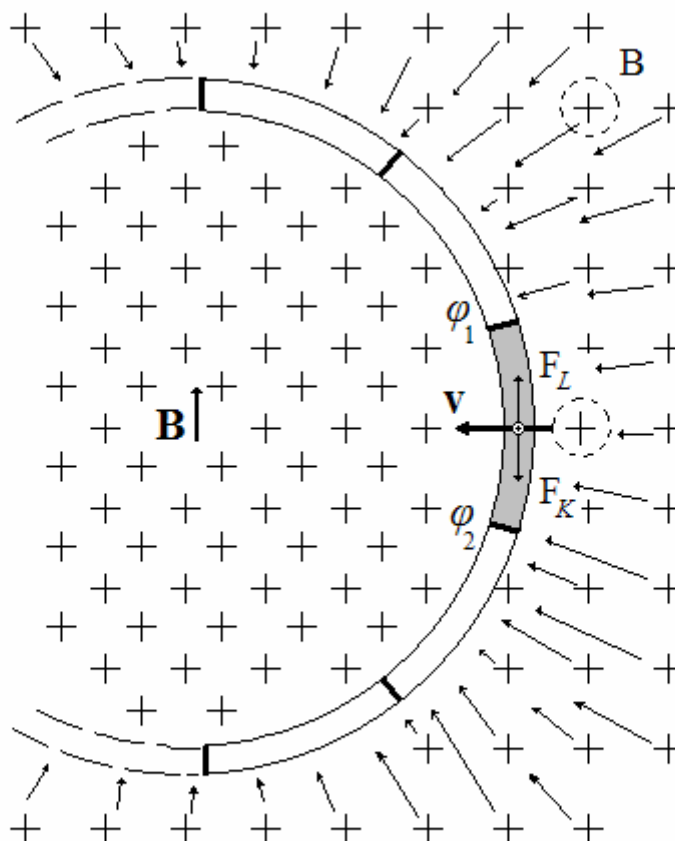


Рис. 2-3

замкнутом контуре Максвелл: «... по мере возрастания... тока <в индукционной катушке> появляются новые линии и постепенно распространяются вовне, так что вся система разворачивается изнутри» [4].

Представление магнитного поля совокупностью линий поля – это лишь *модель* непростого физического объекта, позволяющая дать его математическое описание. Приведенный механизм *изменения* магнитного поля – не единственный. Среди множества других вариантов можно поискать и такой, который примирил бы оба способа генерации индукционной ЭДС.

На Рис. 2-3 показан замкнутый проводящий контур в бесконечном однородном магнитном поле. Процесс увеличения магнитной индукции можно представить себе, как *сгущение* поля за счет поступления в поток, пронизывающий контур, новых линий поля извне – из окружающего пространства. При этом прибывающие линии в своем движении «проникают» в контур, создавая в нем ЭДС индукции по механизму пересечения. Такая модель сводит все случаи электромагнитной индукции к одному механизму – процессу пересечения магнитного потока проводником. Если, конечно, она не противоречит основному закону электромагнитной индукции. В этом еще нужно убедиться...

Разобьем замкнутый контур, представленный на рисунке 2-3, на *n* участков, *изолированных* друг от друга. При возрастании индукции в магнитном потоке магнитные линии, проникая в контур, *пересекают* его со скоростью *V* по направлению к центру. При этом выделенный на рисунке участок контура находится в тех же

условиях, что и одиночный участок на рисунке 2-2. На каждый заряд в проводнике действует сила Лоренца \mathbf{F}_L с той лишь разницей, что скорость \mathbf{V} – это скорость движения *линий поля* относительно *неподвижного* проводника. Как и на рисунке 2-2, сторонние силы разносят электрические заряды на концы участка, создавая на нем разность потенциалов $\Delta\varphi_k = \varphi_1 - \varphi_2$. При этом на каждый заряд q действует *кулоновская* сила

$$F_k = qE_k, \quad (2.4)$$

где E_k – напряженность электрического поля на k -том участке контура. Эта сила равна по модулю и направлена навстречу силе Лоренца:

$$F_k = -F_L. \quad (2.5)$$

Полагая, что векторы \mathbf{v}, \mathbf{B} и элемент длины контура $\Delta\mathbf{l}_k$ взаимно перпендикулярны, соотношение (2.3) можно записать в скалярной форме:

$$F_L = qvB. \quad (2.6)$$

Подставив (2.4) и (2.6) в (2.5), получим

$$qE_k = -qvB, \quad \text{откуда} \quad E_k = -vB. \quad (2.7)$$

Если теперь соединить все участки в замкнутый контур, получим результирующую ЭДС в контуре

$$\mathcal{E} = \sum_n \Delta\varphi_k. \quad (2.8)$$

Разность потенциалов на участке определяется зависимостью

$$\Delta\varphi_k = E_k \cdot \Delta l_k. \quad (2.9)$$

Подставляя (2.7) в (2.9) и далее в (2.8), получаем

$$\mathcal{E} = -\sum_n vB \cdot \Delta l_k. \quad (2.10)$$

В пределе (при $n \rightarrow \infty$ и $\Delta l_k \rightarrow 0$) эта сумма переходит в интеграл

$$\mathcal{E} = -\int_L vB dl = -vBL, \quad (2.11)$$

где L – общая длина контура.

Приток линий магнитного поля в контур за время dt составляет, очевидно,

$$d\Phi = vBL \cdot dt, \quad \text{откуда} \quad \frac{d\Phi}{dt} = vBL. \quad (2.12)$$

Сравнивая (2.11) и (2.12), получаем основной закон ЭМИ (2.2).

Таким образом, предлагаемый механизм не противоречит основному закону электромагнитной индукции. Но он позволяет исключить «исключения», сводя все индукционные процессы к механизму пересечения.

Должен, однако, признаться, что идея описывать процесс возникновения индукционной ЭДС в замкнутом контуре способом пересечения принадлежит не мне. Меня опередил Майкл Фарадей! Вот что писал по этому поводу ветеран электротехнического образования в стране профессор МГУ С.Г. Калашников: «... если проводник находится в покое, но изменяется магнитная индукция, то при усилении поля густота линий индукции будет увеличиваться, и они будут стягиваться друг к другу, а при ослаблении поля – расходиться друг от друга. И в этом случае произойдет пересечение некоторого числа линий индукции проводником. Поэтому Фарадей заключил, что индукционный ток возникает в проводнике в том случае, если проводник или какая-либо его часть пересекает линии магнитной индукции» [5].

2.3. Разрешение «парадоксов»

Таким образом, физическая природа ЭМИ (способ пересечения) – едина:

индукционная ЭДС возникает лишь в том случае, когда проводник пересекает линии магнитного поля.

Теперь можно вернуться к «парадоксам» ЭМИ.

Расчет, приведенный выше, сделан для того, чтобы показать, что возникновение индукционной ЭДС в замкнутом контуре по методу пересечения не противоречит и «максвелловской» формулировке закона. Но работу «парадоксальных» схем зависимостью (1.4) объяснить невозможно. Если же оценивать результаты этих экспериментов с точки зрения закона электромагнитной индукции Фарадея (1.1), то никаких парадоксов не возникает.

Начнем с того, что только при пересечении проводником линий поля на электрические заряды действует сила (сила Лоренца), способная совершить работу (создать ЭДС). Когда такое пересечение отсутствует, работа не совершается, не возникает индукционный ток и не создается ЭДС индукции.

Если обратиться к тем экспериментам (схемам), которые дают «парадоксальные» результаты, то во всех этих случаях пересечение проводниками линий магнитного поля отсутствует, в чем читатель может убедиться самостоятельно.

Наиболее трудным для понимания является сам «Парадокс Геринга». Хотя цепь гальванометра (см. Рис. 1-1) остается замкнутой, магнитное поле все-таки из контура «выскальзывает». Почему же гальванометр этого не «замечает»? Загадка в том, что магнитное поле «выскальзывает» из контура... *вместе с электронами*, содержащимися на этом участке цепи (в металлическом мостике через магнитопровод). То есть и в этом случае электроны *не пересекают* линии магнитного поля. Поэтому ток в цепи и не возникает.

Эти рассуждения доказывают, что процесс электромагнитной индукции начинается с *перемещения зарядов*, накопление которых на неоднородностях структуры проводника создает индукционную ЭДС. Это и есть тот механизм, который обнаружил Фарадей, и который отражает зависимость (1.1). Индукционная ЭДС – явление *вторичное*, а «максвелловская» зависимость (1.4), описывающая индукционный механизм ЭМИ, искажает природу этого явления и на практике не реализуется.

2.4. И еще один «парадокс»

В заключение этого раздела рассмотрим еще один – классический пример, который называют «Парадоксом Фарадея». Речь идет о так называемой «униполярной индукции», которая уже много десятилетий используется в высоковольтных электрогенераторах.

После открытия электромагнитной индукции М. Фарадей предложил несколько технических устройств с использованием этого явления. Одним из таких устройств был индукционный генератор, получивший название «Диск Фарадея». Устройство представляло вращающийся металлический диск 1 (см. Рис. 2-4), который пронизывался магнитным потоком от постоянного магнита 2. Электрический контур, содержащий электроизмерительный прибор (3), подключался к диску двумя скользящими контактами – на оси (4) и на ободу диска (5). При вращении диска прибор показывал в цепи постоянный ток, зависящий от скорости вращения. Возникновение индукционной ЭДС в контуре объяснялось воздействием силы Лоренца на свободные электроны вращающегося диска при пересечении ими линий магнитного поля.

В 19-ом веке было опробовано много вариантов «машины Фарадея», получившей название униполярного генератора. Один из них озадачил исследователей. Оказалось, что ЭДС индукции возникает в контуре и в том случае, когда магнит... вращается вместе с диском. Казалось бы, при этом сила Лоренца на электроны не действует, но прибор показывает ток в контуре! На рисунке 2-5 схематически представлен вариант такой модификации «машины Фарадея». Конструкция отличается от «Диска Фарадея» тем, что вместо диска вращается сам цилиндрический магнит.

Этот парадоксальный результат вызвал в 19-ом веке оживленную дискуссию по странному вопросу: а вращается ли магнитное поле вместе с его материальным носителем – магнитом? За полтора века окончательный ответ на этот вопрос так и не был найден. Сегодня эта тема активно обсуждается на Интернет-форумах. Один из участников этого форума привел простой аргумент, который (по моему мнению) дает логичный и исчерпывающий ответ на этот вопрос: "Ведь никто ... не сомневается, что

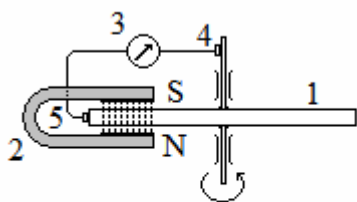


Рис. 2-4

когда мы переносим магнит из комнаты в комнату, то с ним вместе перемещается и его магнитное поле. Почему же при вращении должно быть не так?!" [6].

Согласиться с этим простым и очевидным доказательством, диктуемым здравым смыслом, мешает лишь... закон ЭМИ в "максвелловской" формулировке. Круг замкнулся!

История науки в 20-ом веке изобилует примерами, когда, зайдя в тупик, «научная мысль» прибегала к услугам «палочки-выручалочки» – представлениям релятивизма. В 1929 году академик

И. Е. Тамм, обсуждая принцип работы униполярного генератора, писал: «В движении силовых линий <магнитного поля – К.К.>, пересекающих неподвижный проводник ... усматривалась причина возникновения в этом проводнике электродвижущих сил индукции. Нечего и говорить, что такая интерпретация не выдерживает никакой критики...» [7, §112]. Но если магнитное поле неподвижно, как возникает ЭДС в контуре? Объяснить работу униполярного генератора автору удалось лишь с помощью представлений теории относительности. Такое объяснение уже тогда не встретило у специалистов ни понимания, ни согласия.

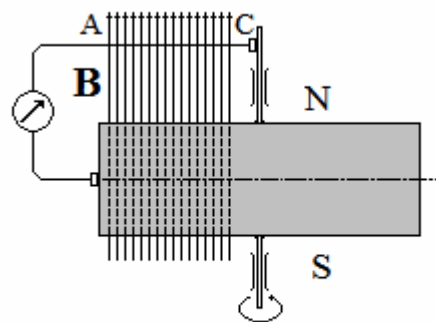


Рис. 2-5

В 1956 году С.Г. Калашников снова привел описание работы униполярного генератора [5, с. 324]. В отличие от варианта, рассмотренного И.Е. Таммом, автор считал линии магнитной индукции вращающегося магнита направленными не вдоль оси магнита, а радиально ("наподобие жестких спиц"). Но магнитное поле по-прежнему предполагалось неподвижным в пространстве. И хотя этот вариант – принципиально другая конструкция, тем не менее, теория относительности объяснила работу и такого устройства! Ну, чем – не палочка-выручалочка! Такое объяснение униполярной индукции сегодня доказательно оспаривается участниками Интернет-форумов.

Как же работает униполярный генератор? Если признать, что магнитное поле жестко связано с магнитом, то очевидно, что в объеме магнита никакая ЭДС возникнуть *не может*. Это тот же механизм, который отвечает за «Парадокс Геринга»: в обоих случаях электроны в магните движутся *вместе* с его магнитным полем, отсутствует пересечение линий поля электрическими зарядами, а, следовательно, и индукционная ЭДС. Где же генерируется ток в контуре? Ответ очевиден: там, где линии поля *пересекают* контур, то есть в проводах на участке контура *АС* (см. Рис. 2-5).

Так представления о механизме электромагнитной индукции по способу пересечения позволяют разрешить многие «парадоксы» электромагнитного взаимодействия, в том числе и классический «Парадокс Фарадея».

Таким образом, истинным парадоксом следует считать то обстоятельство, что уже более 100 лет официальной наукой ошибочно трактуется *физическая* природа самого явления ЭМИ. Экспериментальную зависимость Фарадея подменили ее *математически* тождественным выражением, из которого исчезли главные участники процесса – электрические заряды, а их взаимодействие заменили взаимодействием полей. Почему так произошло, почему этот парадокс больше века оставался не замеченным? На эти вопросы отвечать не физикам, а психологам...

- [1]. *И. В. Савельев*. Курс общей физики, т. 2. – М.: Наука, 1978. С. 178.
- [2]. *А. Н. Матвеев*. Электричество и магнетизм. – М.: Высш. школа, 1983. С. 317.
- [3]. *И. Е. Иродов*. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаб. Базовых Знаний, 2001. С. 248.
- [4]. *Дж.К. Максвелл*. Статьи и речи. – М.: Наука, 1968. С. 59.
- [5]. *С. К. Калашников*. Электричество. – М.: Физматлит, 2004. С. 194.
- [6]. *И. Мисюченко*. Последняя тайна Бога. – С.-Петербург, 2009. С. 106.
- [7]. *И.Е. Тамм*. Основы теории электричества. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1956.

3. О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Теперь, когда мы выяснили, что нет двух законов ЭМИ, что механизм этого процесса один и тот же во всех его проявлениях, можно заняться и самой этой природой. Казалось бы, сам механизм ЭМИ по способу пересечения достаточно прост и понятен: магнитная сила Лоренца создает в движущемся проводнике ток зарядов (электронов). При накоплении зарядов на концах проводника образуется разность потенциалов – ЭДС.

Магнитная сила Лоренца определяется соотношением:

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad (3.1)$$

где \mathbf{B} – индукция магнитного поля, а q – заряд частицы, движущейся в этом поле со скоростью \mathbf{v} . Эту формулу в конце 19-го века получил голландский физик-теоретик Х. Лоренц, обобщив уравнения Максвелла на случай движения одиночных заряженных частиц. Задолго до Лоренца (в 1820 году) Ампер установил, что между электрическим током и магнитным полем существует силовое взаимодействие, которое определяется эмпирическим законом Ампера:

$$\mathbf{F}_A = I[\mathbf{l}, \mathbf{B}]. \quad (3.2)$$

Это соотношение определяет силу, действующую в магнитном поле \mathbf{B} на участок провода \mathbf{l} , ориентированный в направлении тока I . Сила Лоренца (3.1) описывает взаимодействие *одиночной* заряженной частицы с магнитным полем. Она может быть получена из закона Ампера, если силу (3.2) разделить на число частиц, участвующих в создании силы Ампера (см., например, [1]):

Допустим, в проводнике длиной l содержится N свободных зарядов q . Тогда электрический ток можно выразить зависимостью $I = (N/l)qu$, где u – скорость «дрейфа» электронов в проводнике (скорость направленного движения частиц). Так как эта скорость совпадает с направлением проводника, то выражение (3.2) можно записать в форме:

$$\mathbf{F}_A = Nq[\mathbf{u}, \mathbf{B}]. \quad (3.3)$$

Разделив (3.3) на число N зарядов в проводнике и приравняв скорость каждой частицы к скорости дрейфа ($\mathbf{v} = \mathbf{u}$), получим выражение для силы, действующей со стороны магнитного поля на одну частицу – $\mathbf{F}_L = \frac{\mathbf{F}_A}{N} = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$, совпадающее с (3.1).

Закон Ампера – это экспериментальная зависимость, хорошо описывающая взаимодействие электрического тока с магнитным полем. Сила Лоренца (3.1) получается из закона Ампера элементарными математическими преобразованиями. Но зададимся вопросом: а отражает ли зависимость (3.1) участие магнитных сил в электромагнитной индукции? Может ли сила Лоренца создать ЭДС? Вопрос – не праздный!

Согласно (3.1) сила Лоренца всегда *перпендикулярна* к скорости движения заряженной частицы. Поэтому она не может передать частице какую-либо энергию, а, следовательно, не может совершить работу, необходимую для создания разности

потенциалов! Именно поэтому заряженная частица в магнитном поле может двигаться лишь по круговой (или винтовой) орбите постоянного радиуса – с сохранением линейной скорости и кинетической энергии.

Большинство авторов предпочитает обходить молчанием это очевидное противоречие. Но есть и исключения. Добросовестный ученый и талантливый педагог И.В. Савельев не считал возможным замалчивать столь явное противоречие и попытался дать ему объяснение. Чтобы не исказить авторскую мысль, приведем (почти) полностью это объяснение: «...роль сторонних сил, поддерживающих ток в контуре, играют магнитные силы. Работа этих сил над единичным положительным зарядом, равная по определению ЭДС, оказывается отличной от нуля. Это обстоятельство находится в кажущемся противоречии с высказанным ... утверждением о том, что магнитная сила работы над зарядом совершать не может. Противоречие устраняется, если учесть, что <сила Лоренца> представляет собой не полную магнитную силу, действующую на электрон, а лишь параллельную проводу составляющую этой силы, обусловленную скоростью <движения проводника>. Под действием этой составляющей электрон приходит в движение вдоль провода ..., в результате чего возникает перпендикулярная к проводу составляющая магнитной силы...». [2].

Аккуратный анализ такого объяснения показывает, что оно не устраняет противоречие. Я не стану приводить здесь этот анализ. Ограничусь лишь мысленным экспериментом, менее «научным», но достаточно убедительным.

Допустим, в магнитном поле \mathbf{B} со скоростью \mathbf{V}_1 движется проводник (Рис. 3-1). Чтобы переместить свободные заряды (электроны) на конец проводника, сила Лоренца должна сообщить им некоторую скорость \mathbf{V}_2 вдоль проводника. Но именно это сила Лоренца сделать и не может: с появлением составляющей \mathbf{V}_2 скорость электрона стала бы равной $\mathbf{V}_0 > \mathbf{V}_1$, что противоречит зависимости (3.1).

Вместе с тем, индукционная ЭДС в проводнике все-таки образуется! Как? Из всякого безвыходного положения есть, как известно, по меньшей мере, два выхода – вперед и назад. В нашем случае нужно сделать выбор между двумя альтернативными вариантами: либо неверно соотношение (3.1) для силы Лоренца, либо индукционную ЭДС создает... не сила Лоренца.

Вспомним, что на *неподвижный* заряд магнитное поле не действует. *Движущийся* заряд отличается от неподвижного лишь тем, что он обладает собственным магнитным полем. Очевидно, что физическая природа магнитной силы связана с взаимодействием этих двух полей – внешнего и собственного магнитного поля движущегося заряда.

Утверждение, что магнитное поле не может совершать работу, требует уточнения.

Известно, что линии магнитного поля обладают определенной «упругостью», которая старается сократить их длину. При растяжении магнитных линий возникает сила *натяжения*, которая может совершать работу (например, при сближении магнитов). При попытке раздвинуть линии поля та же упругость создает дополнительное *давление* в направлении, перпендикулярном линиям поля.

Представления об упругих свойствах, продольном натяжении и боковом давлении магнитных (и электрических!) линий были сформулированы еще Фарадеем. Вот что писал об этом Дж. Максвелл: «<Фарадей> открыл, что в среде имеет место некоторое состояние напряжений, проявляющееся в натяжении в направлении силовых линий, соединенных с давлением во всех направлениях, к ним перпендикулярных» [3].

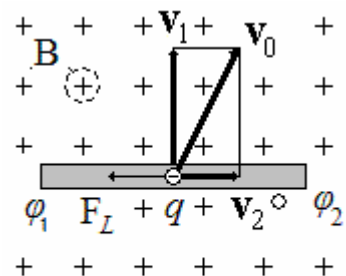


Рис. 3-1

Численно в среде с магнитной проницаемостью μ эти усилия определяются напряженностью H или магнитной индукцией B [4]:

$$T = \Pi = \frac{\mu H^2}{8\pi} = \frac{HB}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu}, \quad (3.4)$$

где T и Π – удельные значения сил, отнесенные к единице поверхности вдоль и поперек линий поля и определяющие плотность магнитной энергии в данной точке. В неоднородном магнитном поле существуют градиенты плотности, которые заставляют магнитные диполи втягиваться в область более сильного поля.

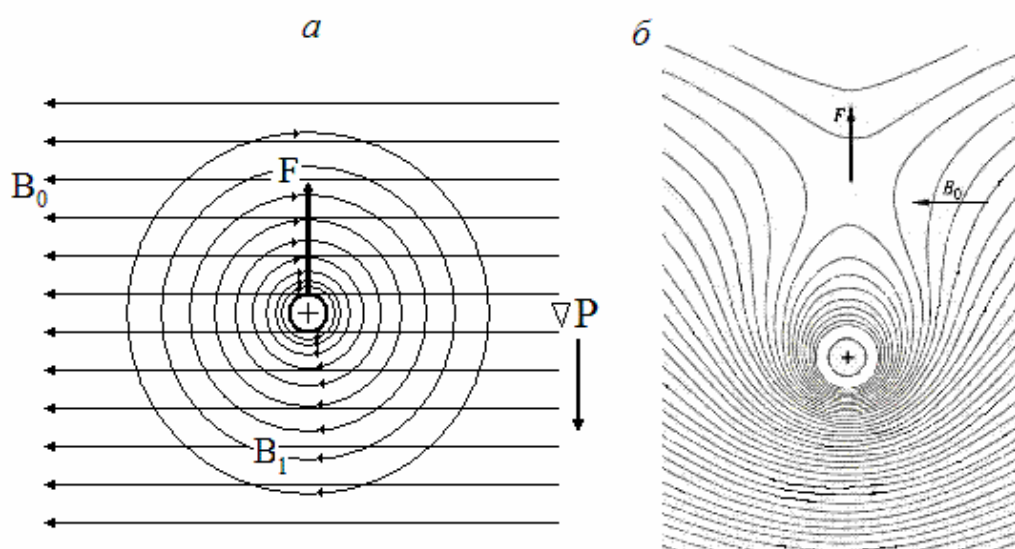


Рис. 3-2

Такой механизм силового воздействия магнитного поля на электрический ток хорошо известен в электротехнике. Эти представления излагаются во многих учебниках. Упругими свойствами линий поля объясняются механические воздействия на проводники с током в магнитном поле (так называемые пондеромоторные силы).

На рисунке 3-2,*a* показана положительно заряженная частица, движущаяся от нас в *однородном* магнитном поле \mathbf{B}_0 . Она создает *собственное* магнитное поле \mathbf{B}_1 , которое, складываясь с полем \mathbf{B}_0 , образует *неоднородное* результирующее поле $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1$, градиент которого направлен вниз – в сторону более сильного поля. Это поле напоминает поле, представленное на рисунке 3-2,*б*. Рисунок взят из учебника Калашникова [1, с. 221]. Так автор объясняет природу пондеромоторных сил, старающихся деформировать соленоид с током. Эта картинка отражает тот же механизм, что и рисунок 3-2,*a*. Разница лишь в том, что рисунок 3-2,*б* иллюстрирует взаимодействие магнитного поля и *проводника* с током – силу Ампера, а на рисунке 3-2,*a* показано взаимодействие магнитного поля с полем *одиночного* движущегося заряда. В таком поле существует градиент удельного давления. В результате на заряд действует сила F , направленная противоположно этому градиенту. Можно показать, что по величине и направлению эта сила совпадает с силой Лоренца. Но это совпадение – лишь *количественное*. В отличие от силы Лоренца сила F – это сила *магнитного давления*, которая может совершать работу над движущимися заряженными частицами, обращая механическую энергию в ЭДС.

Таким образом, правильные математические преобразования не гарантируют правильный результат, если не учитывается природа физического явления.

Магнитное поле не может *непосредственно* оказывать силовое воздействие ни на неподвижный, ни на движущийся электрический заряд. Собственное магнитное поле движущегося заряда выступает в роли посредника между внешним магнитным полем и зарядом. Как бы ни назывались силы электромагнитного взаимодействия, природа этих сил одна и та же – это *магнито-магнитные* взаимодействия. Таким образом, электромагнитные взаимодействия, которые мы сегодня условно называем «магнитными силами», по природе своей – *истинно магнитные*.

В стороне остается вопрос, как это взаимодействие между магнитными полями передается собственно заряженной частице. Разрешение этой проблемы выходит за рамки данного исследования.

[1]. *Калашиников С.К.* Электричество: Учеб. пособие. - 6-е изд., – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – С.191.

[2]. *Савельев И.В.* Курс общей физики, т.2. – М.: Наука. Главное изд. физ.-мат. лит., 1978. – С.177.

[3]. *Максвелл Д.К.* Статьи и речи. – М.: Наука, 1968. – С. 59.

[4]. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов в 5 томах. Т. 3. Электричество. – 4-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ; изд. МФТИ, 2004. – С. 288.

4. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

В разделе 1. показано, что «максвелловский» вариант основного закона ЭМИ не согласуется с экспериментами Фарадея. В максвелловской формулировке (1.4) отсутствуют электрические заряды, которые в трактовке Фарадея играют в этом процессе решающую роль. Можно ли на этом основании утверждать, что соотношение (1.4) неверно? Разумеется – нет! Ведь есть множество других экспериментов и вариантов практического использования электромагнитной индукции, где этот закон хорошо выполняется. На мое замечание, что закон Максвелла неверен, один весьма уважаемый доктор физ.-мат. наук удивился: «Позвольте! Но ведь никто не отменял электромагнитную индукцию в замкнутом контуре! Да и циклические ускорители ведь как-то работают!» В этом замечании указано на два наиболее важных явления, которые – по общему мнению – неоспоримо подтверждают правильность максвелловской

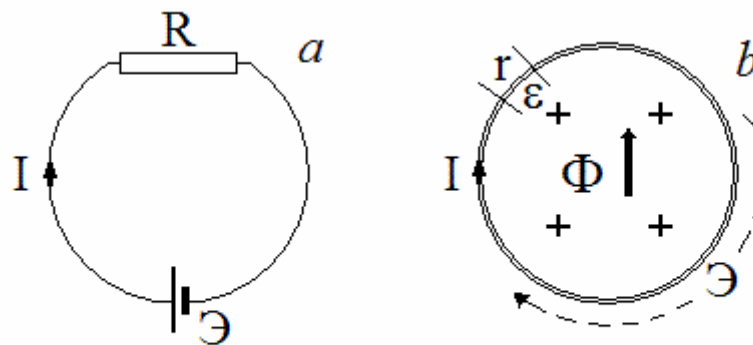


Рис.4-1

формулировки ЭМИ.

Давайте, разберемся: действительно ли ЭДС индукции в замкнутом контуре генерируется непосредственно переменным магнитным полем – без участия зарядов, как это следует из (1.4)? В разделе 2. мы показали, что возникновение ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре можно объяснить по способу пересечения, не прибегая к методу индукции. Но из этого еще не следует, что переменное магнитное поле не может индуцировать поле электрическое.

Кроме свойств, обсуждавшихся выше, зависимость (1.4) обладает еще одним свойством, о котором мы еще не говорили: если переменный магнитный поток может генерировать электрическое поле без участия электрических зарядов, то линии этого поля могут быть только непрерывными (*замкнутыми*), а само поле может быть только *вихревым*.

Сторонники максвелловской трактовки ЭМИ едины во мнении, что в замкнутом контуре «работает» именно вихревое электрическое поле. В качестве обоснования этого утверждения ссылаются на положение теории поля, согласно которому работа в потенциальном поле по любой замкнутой кривой равна нулю. Работа электрического поля по перемещению единицы заряда в замкнутом проводящем контуре отлична от нуля – она равна ЭДС индукции. Следовательно, электрическое поле, индуцируемое в таком контуре, может быть только вихревым. Так ли это?

На рисунке 4-1,*a* показана обычная замкнутая электрическая цепь, в которой генератор создает ток $I = \mathcal{E}/R$, где \mathcal{E} – ЭДС генератора, а R – полное сопротивление контура. Рассмотрим некоторый однородный проводящий контур, в котором переменный магнитный поток Φ создает круговую индукционную ЭДС \mathcal{E} (см. Рис. 4-1,*b*). Эта схема отличается от цепи на Рис. 4-1,*a* лишь тем, что

сосредоточенные параметры R и \mathcal{E} здесь *распределены* по всей длине контура. На участке сопротивлением $r = \alpha R$ генерируется разность потенциалов

$$\varepsilon = \alpha \mathcal{E} = \alpha IR = Ir, \text{ откуда } \varepsilon - Ir = 0. \quad (4.1)$$

Здесь α – доля от общей длины контура, которую составляет выделенный участок, а I – ток в контуре. Для всего контура $\alpha = 1$ и соотношение (4.1) дает равенство $\mathcal{E} = IR$ – закон Ома для замкнутой цепи. Выделенный участок контура можно считать локальным «микродогенератором» с внутренним сопротивлением r . Разность потенциалов $\varepsilon = \Delta\varphi = Ir$ следует считать внутренним падением напряжения в таком «генераторе». Внешнее напряжение на выходе генератора равно $u = \varepsilon - \Delta\varphi = \varepsilon - Ir$, что с учетом (4.1) дает $u = 0$.

Таким образом, напряжение между *любыми* двумя точками замкнутого проводящего контура, в котором создается индукционная ЭДС, равно *нулю*! Вывод достаточно неожиданный, но он подтверждается экспериментом. Физический смысл этого результата в том, что вся электрическая энергия, произведенная на любом участке замкнутого контура по индукционному механизму, *целиком* теряется на этом же участке (переходит в тепло). Каждый участок контура является как бы одновременно и генератором, и нагрузкой. На языке электротехники весь индукционный контур (и любую его часть!) можно уподобить короткозамкнутому генератору, в котором вся произведенная электроэнергия расходуется на «собственные нужды».

Таким образом, в замкнутом проводящем контуре индуцируется круговая, но *потенциальная* ЭДС. А как же быть с положением теории поля, утверждающим, что в потенциальном поле циркуляция вектора по любой замкнутой кривой (в нашем случае это и есть ЭДС в контуре) равна нулю? Дело в том, что это положение верно лишь для *консервативных* полей (например, в вакууме), но неприменимо для неконсервативных (диссипативных) систем, каковой является металлический проводящий контур.

Чтобы доказать вихревую природу индукционного электрического поля, сторонники максвелловской модели электромагнитной индукции прибегают к чудесам научной эквилибристики. Недавно мне попался на глаза перевод статьи из журнала «Amer. J. Physics» 1982 года [1]. Стараясь доказать вихревую природу электрического поля в проводящем замкнутом контуре, автор договорился до того, что показания вольтметра, измеряющего разность потенциалов между двумя точками проводящего кольца, в котором наводится индукционная ЭДС, зависят от того... с какой стороны (справа или слева от кольца) находится вольтметр (!!).

Является ли приведенный выше анализ индукционного процесса в проводящем контуре достаточным основанием, чтобы утверждать, что вихревое электрическое поле не существует? Нет, не является! («Ведь циклические ускорители как-то работают!»). Действительно – в циклическом ускорителе нет другого источника ускорения, кроме индуцированного кругового электрического поля.

Рассмотрим, например, работу циклического индукционного ускорителя электронов – бетатрона. Ускорение электронов происходит в вакуумированной тороидальной камере, находящейся между полюсами электромагнита, который питается переменным (синусоидальным) током с частотой порядка 100 Гц . Магнитное поле в бетатроне выполняет две функции: 1) создает ускоряющее электрическое поле и 2) удерживает ускоряемые электроны на круговой орбите. Ускорение электронов происходит импульсами – во 2-ю и 4-ю четверть периода. Вот краткое описание работы бетатрона, которое приводит в своем учебнике И.В. Савельев: «В начале импульса в камеру подается из электронной пушки пучок электронов, который *подхватывается вихревым электрическим полем* < курсив мой – К.К.> и начинает со все возрастающей скоростью

двигаться по круговой орбите. За время нарастания магнитного поля ($\sim 10^{-3}$ с) электроны успевают сделать до миллиона оборотов и приобретают энергию, которая может достигать нескольких сотен МэВ» [2].

Сомнений в том, что электроны в бетатроне ускоряются *вихревым* электрическим полем, никогда ни у кого не возникало. Вот определение из «Большого энциклопедического словаря» последнего выпуска [3]:

Бетатрон, циклич. ускоритель эл-нов, в к-ром ускорение производится вихревым электрич. полем, индуцируемым перем. магн. полем, охватываемым круговой орбитой ч-ц.

Аргументы, использованные в предыдущем примере, здесь не работают: если пренебречь электромагнитным излучением электронов и считать вакуум в ускорителе идеальным, то электрическое поле в ускорительной камере можно считать консервативным. Сам факт, что электроны *ускоряются*, говорит о том, что круговая ЭДС в бетатроне отлична от нуля, и, следовательно, поле в ускорительной камере вихревое. Так говорит теория поля!

Правда, если внимательно читать эту мудрую теорию, то можно заметить, что все сказанное справедливо лишь для магнитных полей, *линейно* изменяющихся во времени.

(Для читателя, привыкшего мыслить формулами, это означает, что $\partial^2 \Phi / \partial t^2 = 0$).

Такие поля индуцируют *стационарное* электрическое поле – постоянное во времени. Магнитное поле в бетатроне изменяется со временем *нелинейно*. Поэтому возникающее электрическое поле зависит не только от пространственных координат, но и от времени. Его следует рассматривать в *4-х-мерном* пространстве, одной из координат которого является время (так называемое пространство Минковского). В этом пространстве плоская круговая траектория электрона превращается в спираль, растянутую вдоль оси времени.

За то время, что электрон делает полный оборот (замкнутый в *3-х-мерном* пространстве!), изменяется ЭДС вдоль траектории. Поэтому, сделав полный оборот и вернувшись в ту же *пространственную* точку траектории, электрон оказывается в *другой точке* пространства Минковского, потенциал которой отличен от потенциала сходственной точки на предыдущем витке спирали. Эта разность потенциалов и определяет энергию ускорения электрона на одном витке траектории. Силовые линии такого (винтового) поля *разомкнуты*. Согласно той же теории поля вихревое поле не может быть разомкнутым! Таким образом, электрическое поле и в циклических ускорителях может быть только *потенциальным*.

Итак, в двух наиболее «убедительных» случаях применения ЭМИ вихревое электрическое поле отсутствует. Можно ли считать, что оно отсутствует и во всех остальных случаях использования индукционного процесса? Конечно – нет! Ведь еще не все эксперименты сделаны, и нет гарантии, что где-то (в других приложениях) вихревое электрическое поле все-таки существует. Для этого необходимо ответить на вопрос: «Создает ли переменный магнитный поток электрическое поле?». Если создает, то это поле может быть только вихревым. Если не создает, то... что же он (магнитный поток) создает?

Ответ на этот вопрос можно было бы получить, если провести прямые измерения электрического поля, создаваемого переменным магнитным потоком в соответствии с зависимостью (1.4). Мне такие эксперименты не известны. Буду благодарен, если читатели приведут мне такие примеры. Но мне почему-то кажется, что такой эксперимент осуществить... нельзя. Единственный способ обнаружить электрическое поле – это поместить в него электрический заряд. Но тогда невозможно отличить «магнитную силу», действующую на электрический заряд в переменном магнитном

поле, от действия на заряд самого электрического поля. Можно показать, что обе эти силы равны как по модулю, так и по направлению.

Между «фарадеевским» и «максвелловским» механизмами ЭМИ существует, безусловно, принципиальное отличие. Но как его обнаружить?.. И нужно ли?

С тех пор, как было показано, что электрические и магнитные явления связаны единой электромагнитной природой, теоретики испытывают неудовлетворенность асимметрией электрических и магнитных процессов. Почему электрические поля разомкнуты, а магнитные – замкнуты? В чем заключается «Божий замысел»? Попытки симметризовать электродинамику, сблизив природу электрических и магнитных полей, предпринимаются давно. Разомкнуть магнитное поле позволили бы магнитные заряды (так называемые монополи Дирака). Многие десятилетия их ищут в космических лучах, под землей, в морских глубинах. Теоретики уже подсчитали их магнитный заряд, массу, спин и пр. характеристики. Но обнаружить магнитные монополи пока не удается.

Но если не удастся разомкнуть магнитное поле, то... не замкнуть ли поле электрическое? Такие попытки оказались гораздо результативнее – замкнутое (вихревое) электрическое поле, изобретенное в конце 19-го века, уже давно утвердилось в электродинамике как физическая реальность. То есть, не умея понять «Божий замысел», мы смогли его... обойти!

По своим свойствам электрическое и магнитное поля отличаются принципиально:

Магнитное поле – это поле замкнутое, вихревое. Вектор поля (магнитная индукция) по своей физической природе характеризует *момент сил*. Электрическое поле – по определению – это поле *силовое*. Линии этого поля образуются силовым вектором – напряженностью электрического поля \mathbf{E} , которая в любой точке поля связана с электрическим потенциалом φ в этой точке известным соотношением $\mathbf{E} = -\mathbf{grad} \varphi$.

Циркуляция напряженности по любому конечному отрезку L силовой линии $\Delta\varphi = \int_L \mathbf{E}d\mathbf{l}$ представляет собой *разность потенциалов* на этом отрезке. Из теории

поля известно, что любое силовое поле всегда порождает скалярное – потенциальное (энергетическое) поле. Вихревое поле не обладает потенциалом, а потенциальное поле не может быть вихревым. Так как электрическое поле (любой конфигурации!) – это поле силовое, то можно сделать однозначный вывод, что *электрическое поле не может быть вихревым*.

Это заключение, базирующееся на основных понятиях теории поля, можно считать окончательным приговором не только вихревому электрическому полю, но и попыткам симметризации полей в электродинамике, и самой идее взаимодействия полей. В частности это означает, что основной закон ЭМИ в форме (1.4) *лишен физического смысла*.

Полтора века в электродинамике фигурировал *фантом* – не существующее в природе вихревое электрическое поле. Это поле работало в трансформаторах и генераторах, в электродвигателях и ускорителях, хотя, не обладая энергетическим потенциалом, оно *не может совершать работу*. Этот очевидный физический абсурд почему-то многие десятилетия оставался незамеченным. По этой причине в настоящее время во всех расчетах используется формулировка (1.4) основного закона ЭМИ, соответствующая «букве» (цифре!), но противоречащая «духу» (природе) этого важнейшего электродинамического процесса.

Чтобы окончательно расставить все точки над \mathbf{i} , приведенные выше описания индукционных процессов необходимо дополнить соображениями о физической природе электромагнитных взаимодействий, изложенными выше. Но этот разговор придется пока отложить, потому что нам предстоит не менее серьезный разговор о том, как работают... батарейки в карманном фонарике.

- [1]. *Ромер Р.* Что измеряют «вольтметры»? Закон Фарадея для многосвязной области. – Перевод из: Amer. J. Phys., December 1982, p. 1069.
- [2]. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Физматлит, 1978. Т. 2, с. 216.
- [3]. *БЭС, Физика.* – М.: Научное изд. БРЭ, 1999. С. 52.

5. ГЕНЕРАЦИЯ И РАСХОДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

5.1. Сторонние силы и их свойства

Любая замкнутая электрическая цепь для покрытия тепловых (и других) энергетических потерь должна включать устройство, воспроизводящее электрическую энергию – электрогенератор. За полтора века практического использования электроэнергии создано много электрогенераторов разных типов, конструкций и параметров. В этом разделе мы будем говорить лишь о генераторах *постоянного* тока.

Общим для всех генераторов является принцип преобразования энергии любой природы в энергию электрическую. Он заключается в *разделении* электрических зарядов противоположного знака и *разведении* их на некоторое (межэлектродное) расстояние. При этом электроэнергия, выработанная генератором, выступает в форме разности потенциалов на его выходных клеммах (электродах) – ЭДС генератора.

Чтобы преодолеть силы кулоновского притяжения между зарядами противоположного знака, нужны силы не электростатической природы. Академик И.Е. Тамм [1] предложил называть их *сторонними силами*.

Понятие «сторонние силы» – это некоторая абстракция, которая объединяет силы различной физической природы, выполняющие одну и ту же функцию – создание электрической энергии. Смысл этого нового понятия, его физическое содержание необходимо было бы четко определить. К сожалению, И.Е. Тамм в свое время этого не сделал. Я попытаюсь восполнить это упущение:

Главной задачей сторонних сил является *преобразование* разных видов энергии (механической, химической, тепловой, оптической и пр.) в энергию электрическую. Для этого нужно перемещать электрически заряженные частицы *против* сил электростатического поля. Отсюда – главное свойство сторонних сил, заложенное И.Е. Таммом в это название:

1. Природа сторонних сил может быть самой разной, но она должна быть «сторонней» – *не электростатической*. Отсюда следует, что
2. Сторонние силы не действуют на *электрический заряд*. В зависимости от их физической природы сторонние силы могут действовать на *другие* свойства заряженных частиц – массу, форму, размер, плотность, их коллективные свойства – концентрацию, диффузионные характеристики и пр.
3. Подавляющее большинство сторонних сил имеет не полевой характер. Поэтому описывать действие этих сил как проявление некоторого «поля сторонних сил» нежелательно. Если это представление все же используется, то необходимо учитывать, что пробными телами в этих «полях» служат не электрические, а другие «заряды» (см. текст к формуле (5.1)).
4. Действие сторонних сил *всегда* сопровождается генерацией электрической энергии – образованием разности потенциалов на некоторых разнесенных (проводящих) телах – полюсах генератора, на которых электрические заряды концентрируются.
5. Сторонние силы работают лишь *внутри* генератора. Вне генератора на заряженные частицы действуют электростатические (потенциальные) силы.

Примечание:

Поскольку сторонними силами бывают силы *разной* природы, то те же силы могут участвовать в различных процессах, не имеющих никакого отношения к генерации электроэнергии. Это понятие правильнее было бы определить так:

Сторонними силами называются силы не электростатической природы, участвующие в создании электрической энергии.

5.2. Генератор постоянного тока

Я понимаю, что некоторые из приведенных выше утверждений могут вызвать у читателей удивление (возможно даже – возмущение!). Так как именно среди таких читателей я надеюсь найти единомышленников, то напомним нетерпеливым, что все сказанное относится к генераторам *постоянного тока*. К индукционным процессам мы обратимся в следующем разделе.

Рассмотрим несколько подробнее работу сторонних сил в *абстрактном идеальном* генераторе постоянного тока. Природа сторонних сил в таком генераторе может быть любой (в этом – смысл определения *абстрактный*), но они должны обладать всеми перечисленными выше свойствами. *Идеальным* мы называем генератор, не имеющий внутреннего сопротивления. Это значит, что внутренние потери энергии в генераторе отсутствуют, а вся энергия сторонних сил в генераторе целиком переходит в электрическую энергию.

Положим, на всем пути между полюсами генератора на частицу, несущую положительный электрический заряд q , действует постоянная сторонняя сила \mathbf{F}^* (Рис. 5-1). Величина этой силы определяется ее природой и *не зависит* от электрического заряда частицы. Такую силу можно условно представить как результат воздействия на частицу *удельной силы* \mathbf{E}^* – напряженности некоторого «поля сторонних сил», отнесенной к единице *электрического* заряда частицы:

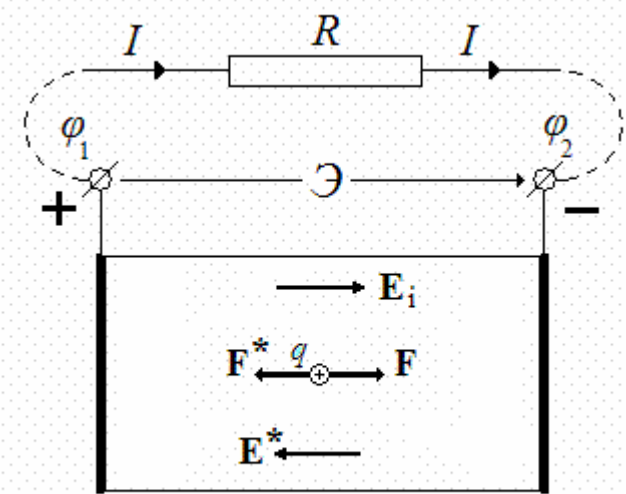


Рис. 5-1

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{F}^*/q. \quad (5.1)$$

Допустим, что в начальный момент генератор «разряжен». Под действием сторонних сил положительно заряженные частицы устремляются к положительному полюсу генератора, а отрицательные частицы – к отрицательному. По мере того, как на выходных клеммах генератора накапливаются заряды противоположного знака, возрастает разность потенциалов между полюсами. Одновременно растет и внутреннее электрическое (потенциальное) поле \mathbf{E}_i , направленное *против* сторонних сил. Когда сила воздействия этого поля на *электрический заряд* частицы достигает (по модулю) силы \mathbf{F}^* «стороннего поля» ($F_i = -F^*$), наступает равновесие $\mathbf{E}_i = -\mathbf{E}^*$, и направленное движение заряженных частиц прекращается. На клеммах генератора устанавливается разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, которая и определяет ЭДС генератора \mathcal{E} , максимально возможную при данном способе генерации. Численно она равна работе, затрачиваемой *сторонними силами* на перемещение единицы *электрического заряда* внутри генератора.

Если клеммы генератора замкнуть на нагрузку R (см. пункт на Рис. 5-1), по цепи потечет постоянный ток $I = \mathcal{E}/R$, движение заряженных частиц в генераторе

возобновится. Такой (рабочий) режим работы электрогенератора является *квазистационарным*: поступающие на электрод заряды компенсируют их уход во внешнюю цепь. При этом количество зарядов на клеммах генератора и разность потенциалов на них остаются постоянными. Со временем не изменяются значения \mathcal{E} , \mathbf{E}_i , сохраняется динамическое равенство $F_i = -F^*$, а заряженные частицы в объеме генератора движутся равномерно («по инерции»). Подчеркнем, что этот режим работы генератора, как и режим холостого хода (при разомкнутой внешней цепи) – *стационарный*.

В реальном генераторе внутреннее сопротивление $r^* > 0$. В рабочем режиме движение заряженных частиц в генераторе остается равномерным, но сторонние силы немного превышают силы электростатические – на величину сил сопротивления движению частиц *внутри* генератора. При этом разность потенциалов на внешней цепи (*напряжение* на клеммах генератора) оказывается меньше ЭДС на величину Ir^* – падение напряжения внутри генератора.

Следует заметить, однако, что «внутреннее сопротивление» r^* не является *электрическим* сопротивлением в том же смысле, что и внешнее сопротивление R . Дело в том, что падение напряжения внутри генератора – это энергетические потери *источника сторонних сил*. Оно лишь *численно* равно удельным (на единицу электрического заряда) диссипативным потерям сторонней энергии. Однако, поскольку силы, действующие на заряженную частицу, не воздействуют на ее электрический заряд, тепловые потери *не зависят* от заряда частицы. Сопротивление r^* – это лишь некоторое *эффективное* значение, характеризующее внутренние потери энергии источника сторонних сил.

Чтобы показать, что ток внутри генератора (*сторонний ток*) и ток во внешней цепи (*потенциальный ток*) имеют разную природу, мы сравнили эффективное сопротивление источника тока r^* с внутренним сопротивлением этого же источника r при протекании через него обратного (потенциального) тока.

На Рис. 5-2 приведена принципиальная схема измерительного устройства. Падение напряжения U на испытуемом источнике питания измерялось высокоомным вольтметром V , а ток в цепи – миллиамперметром mA . Нагрузкой служил магазин сопротивлений R .

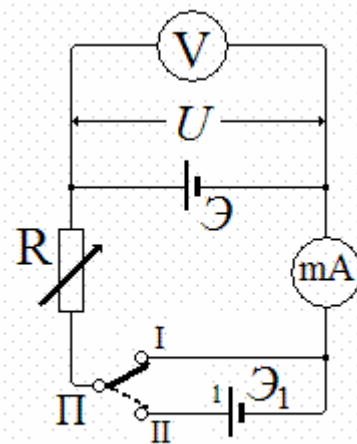


Рис. 5-2

В положении I переключателя II измерялся прямой ток от источника питания. По показаниям приборов рассчитывалось эффективное сопротивление источника $r^* = U/I$. Затем в положении II переключателя навстречу ЭДС \mathcal{E} источника включалась ЭДС $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}$. Измерялся обратный ток I_1 , по величине которого и падению напряжения U_1 на источнике рассчитывалось истинное (электрическое) сопротивление источника r . ЭДС источника измерялась непосредственно перед этим измерением и после него и учитывалась в расчетах.

На Рис. 5-3 приведены результаты измерений эффективного (прямого, стороннего) сопротивления r^* (пунктирные кривые) и истинного (обратного, электрического) сопротивления r (контурная кривая). Измерения проводились на 1,5-вольтовых батарейках производства трех разных фирм.

Изучение стабильности внутреннего сопротивления источников, формы этих зависимостей и прочие аналогичные вопросы оставим специалистам-физхимикам (электрохимикам). Здесь же отметим лишь, что приведенные на рисунке экспериментальные результаты убедительно доказывают, что природа прямого и обратного токов в электрохимических генераторах различна.

5.3. Обобщенный закон Ома

В своем классическом труде «Основы теории электричества» И.Е. Тамм так сформулировал понятие сторонних сил: «...помимо электрических сил стационарного электрического поля на электрические заряды в проводниках может действовать еще некоторое поле сил не электростатического происхождения...» [1]. Сравнение со свойствами сторонних сил, перечисленными выше, показывает, что в этом определении

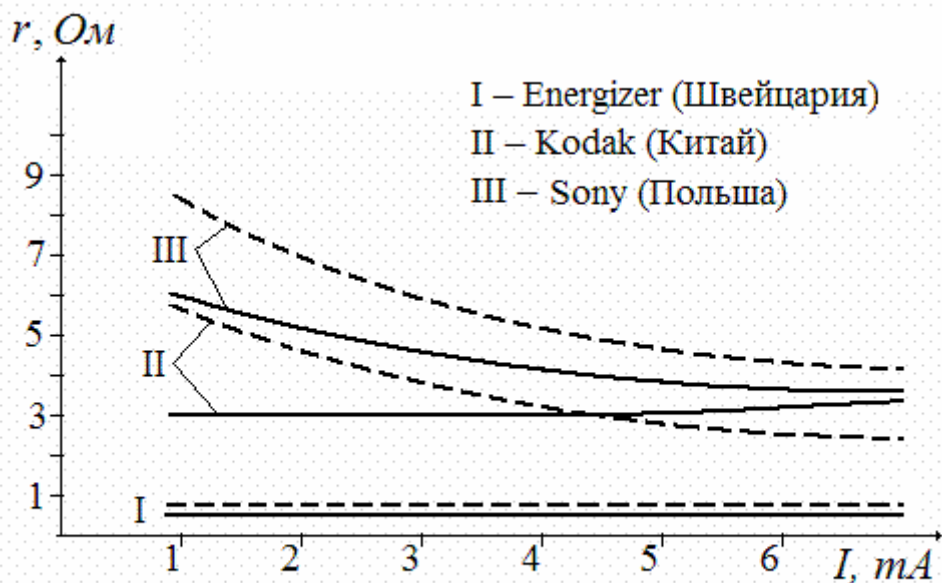


Рис. 5-3

есть три неточности, которые я выделил курсивом:

- 1) сторонние силы не действуют *на электрические заряды* (см. свойство 2);
- 2) эти силы далеко не всегда образуют *поле сил* (свойство 3);
- 3) в цепях постоянного тока сторонние силы работают не в *проводниках*, а только в генераторах (свойство 5).

В дальнейшем эти неточности стали причиной ошибок в применении понятия «сторонние силы». В частности, был получен несуществующий «Обобщенный закон Ома».

Основываясь на своем определении сторонних сил, И.Е. Тамм записал дифференциальное соотношение для плотности тока в проводящей среде с проводимостью σ :

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}^*). \quad (5.2)$$

Формула учитывает, что вместе с электростатическим полем \mathbf{E} на токнесущие частицы действует поле сторонних сил \mathbf{E}^* .

В этом выражении потенциальные и сторонние силы выступают как бы на равных, то есть не учитывается основная особенность сторонних сил – их способность не только перемещать заряженные частицы, но и создавать (генерировать) электрическое поле. При выводе дифференциального соотношения (5.2) эта оплошность осталась не замеченной, так как оно записывалось для *бесконечной* однородной проводящей среды. В этом случае отсутствуют границы (области), на которых могут накапливаться электрические заряды и, следовательно, не создается потенциальное противополе. Ситуация кардинально меняется, когда это соотношение используется для последующего интегрирования в *ограниченной* области проводящей среды. В этом случае генерируется обратная ЭДС $\mathbf{E}_i = -\mathbf{E}^*$, и выражение (5.2) превращается в $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$ – обычный закон Ома.

В отсутствие обратной ЭДС интегрирование (5.2) привело к соотношению

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}, \quad (5.3)$$

которое автор назвал «наиболее общей формой обобщенного закона Ома».

Считается, что этот закон справедлив для «неоднородного участка» цепи, содержащего электрогенератор с ЭДС \mathcal{E} и омическое сопротивление R . I – это ток, протекающий по участку, а $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на границах участка.

Из потенциальной диаграммы неоднородного участка (см. Рис. 5-4) следует очевидное соотношение

$$\varphi_2 = \varphi_3 + \mathcal{E}, \quad (5.4)$$

где φ_3 – потенциал на отрицательной клемме генератора. Подставляя это соотношение в (5.3), получаем зависимость

$$IR = \varphi_1 - (\varphi_3 + \mathcal{E}) + \mathcal{E} = \varphi_1 - \varphi_3, \quad (5.5)$$

которая является обычным *законом Ома для участка цепи*. Если этот участок замкнуть, то $\varphi_1 = \varphi_3$ и соотношение (5.3) дает *закон Ома для замкнутой цепи*.

Таким образом, «Обобщенный закон Ома» представляет собой лишь запутанную и необоснованно усложненную модификацию обычного (классического) закона. Этого следовало ожидать: попытка включить сторонние силы в число движущих сил в цепях постоянного тока не может привести к какому-либо обобщению закона Ома. Сторонние и потенциальные силы выполняют в электрических цепях прямо противоположные функции: сторонние силы *создают* электрическую энергию из других видов энергии, а потенциальные – *расходуют* эту энергию, превращая ее в работу, тепло, световую энергию и пр. Закон Ома описывает только процесс *диссипации* (расходования) электроэнергии. Он не имеет никакого отношения к процессу генерации и не может включать в себя параметры электрогенератора.

Обобщенный закон Ома был получен И.Е. Таммом в 1929 году. Он присутствовал уже в первом издании «Основ теории электричества». В 50-х годах прошлого века этот закон вошел в справочную и учебную литературу и был включен в рабочие программы

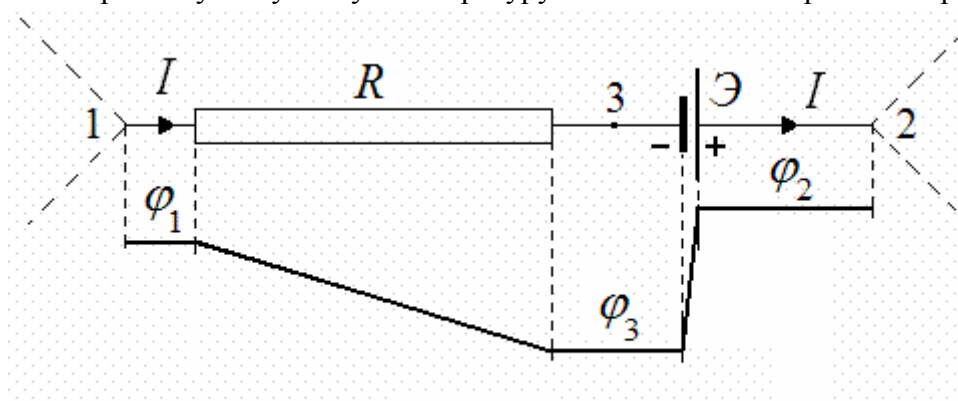


Рис. 5-4

курса общей физики разных вузов страны. Сегодня его излагают на лекциях, а студенты до сих пор решают задачки на применение этого закона на неоднородных участках электрических цепей...

В основе неточностей, допущенных академиком И.Е. Таммом при выводе обобщенного закона, лежит, как ни странно, та же ошибка, которую допустил Максвелл, представив основной закон электромагнитной индукции в форме (1.4). Действительно: по мысли Максвелла переменное поле создает (*генерирует*) индукционную ЭДС, которая в свою очередь вызывает электрический (индукционный) ток. Согласно механизму работы электрогенератора, приведенному выше, процесс генерации ЭДС *начинается* с работы сторонних сил, создающих сторонний ток. ЭДС генератора является *следствием* работы этого тока как результат накопления зарядов на клеммах генератора. Такой процесс электрогенерации полностью соответствует экспериментам Фарадея и механизму ЭМИ по методу пересечения. В этом проявился экспериментальный гений Фарадея, его необычайная физическая интуиция!

Максвелл, разумеется, не имел *таких* (современных) представлений о механизме генерации электрической энергии. Поэтому максвелловская модель ЭМИ поставила «телегу впереди лошади»: зависимость (1.4) поменяла местами причину (индукционный ток) и следствие (ЭДС индукции). Ну что ж: всему свое время... Удивительно другое: через 100 лет эту же ошибку, как мы видели, повторил сам автор модели сторонних сил – академик И.Е. Тамм. «Обобщенный закон Ома» появился потому, что сторонней силе были присвоены свойства движущей силы, а ее генерирующая функция не была учтена.

Эта ошибка оказалась чрезвычайно живучей. Она прячется и в попытках присвоить силе Лоренца способность генерировать ЭДС. Вспомним: сила Лоренца получается путем математических преобразований из силы Ампера. Какой процесс характеризует закон Ампера? Правильно – процесс *превращения* электрической энергии в энергию

механическую! Налицо попытка наделить *движущую* силу способностью *генерировать* электрическую энергию, то есть сделать ее «сторонней». Электромагнитная индукция – это *генерационный* процесс, который требует обязательного участия сторонних сил, обладающих особыми свойствами.

Эту же ошибку (в разных вариантах) совершают и многие современные исследователи. Чтобы понять причину необычайной живучести этого «феномена», нужно обратиться... к терминологии.

5.4. Электрическая энергия

Мы ежедневно и многократно произносим слова «электрическая энергия», хотя такое понятие... не существует; по меньшей мере – в официальной науке. Это скажет вам любой физик, добросовестно усвоивший теоретический (университетский) курс электродинамики. В «Справочнике по физике» словосочетание «электрическая энергия» появляется лишь один раз – в определении энергии заряженного проводника, которая, как объясняется несколькими строками ниже, «представляет собой энергию его электрического поля» [2]. В перечне различных форм энергии, который приведен в последнем издании энциклопедического словаря «Физика» [3], есть «механическая, внутренняя, химическая, ядерная...», но нет *электрической* энергии. В этом списке она присутствует лишь в комбинации «электромагнитная энергия».

В макромире работают два фундаментальных дистанционных взаимодействия – гравитационное и электромагнитное. Между ними есть много общего. Гравитационное взаимодействие определяет потенциальную энергию взаимодействия неподвижных массивных тел (механическую «энергию взаимного расположения тел» в гравитационном поле). Взаимной «энергией положения» обладают и два электрически заряженных тела, удерживаемых на некотором расстоянии друг от друга. Известно, что существует достаточно полная аналогия между отдельными характеристиками обоих взаимодействий (заряд – масса, напряженность электрического поля – ускорение свободного падения и др.), да и описываются оба взаимодействия аналогичными математическими зависимостями – законом всемирного тяготения и законом Кулона. Особенность электростатического взаимодействия лишь в том, что электрические заряды могут быть двух видов. Почему масса тела только «положительная», а электрические заряды существуют положительные и отрицательные, знает только Всевышний. Это еще один «Божий промысел», разгадать который науке еще предстоит.

Любое электрически заряженное тело обладает потенциалом. Казалось бы, сам Бог велел называть энергию взаимодействия заряженных тел «потенциальной электрической энергией». Но современные авторы учебников и справочников старательно избегают этого термина. Вместо этого говорят об «энергии электрического поля», плотность которой определяется квадратом напряженности. Замечание академика И.Е. Тамма, что «энергия электрического поля играет роль *потенциальной* энергии в смысле аналитической механики» [1, с. 92], не обсуждается...

Теперь, когда мы знаем, что вихревое электрическое поле не существует, можно смело утверждать, что у такого поля нет ничего, в том числе – и энергии. Но, может быть, есть энергия у поля потенциального?

Понятие «электрическое поле» было предложено Фарадеем как удобная *математическая модель* для расчетов взаимодействия электрических зарядов. Долгое время характеристики электрического поля – напряженность, потенциал, силовые линии, их «натяжение» и «давление» и пр. – носили абстрактный характер, представляли придумку хоть и гениального, но *человеческого* ума. Потребность материализовать электрическое поле появилась, когда от взаимодействия зарядов перешли к взаимодействию полей. Эта идея принадлежит Максвеллу: «Согласно старым теориям она (<энергия электромагнитных явлений – К.К.>) находится в электризованных телах, проводящих цепях и магнитах в форме неизвестного качества,

называемого потенциальной энергией или способностью производить определенные действия на расстоянии. По нашей теории она находится в электромагнитном поле, в пространстве, окружающем наэлектризованные и намагниченные тела, а также и в этих самых телах, и проявляется в двух различных формах, которые могут быть описаны без гипотез как магнитная поляризация и электрическая поляризация» [4]. В дальнейшем электрическому (и магнитному) полю приписали массу, импульс и пр. атрибуты реального физического объекта.

Согласно определению: «...потенциал численно равен потенциальной энергии, которой *обладал бы* < курсив мой – К.К.> в данной точке поля единичный положительный заряд» [5]. В отсутствие заряда никакой потенциальной энергии у электрического поля быть не может – «пустое» пространство энергией не обладает (равно, как и математическая абстракция). Электрическую энергию могут иметь лишь тела, несущие электрические заряды. Если электрические потенциалы у двух тел разные, то *разность потенциалов* этих тел – это и есть *потенциальная электрическая энергия* их взаимодействия.

Кроме «энергии положения» (потенциальной энергии) электрическая энергия имеет другую форму – «энергию движения». Это энергия *движущихся* электрических зарядов – энергия электрического тока. Все признают, что электрическая «энергия движения» существует и обладает «некоторыми особенностями», но не решаются (упаси Бог!) назвать ее «кинетической электрической энергией». Не будем и мы «дразнить гусей».

Не делая никаких предположений о природе этого вида энергии, можно с большой долей достоверности утверждать, что

1. «энергия движения» – это другая форма электрической энергии, отличная от потенциальной энергии взаимодействия неподвижных зарядов;
2. она определяется силой тока или – при движении одиночного электрического заряда – величиной заряда и его скоростью;
3. мерой «электрической энергии движения» может служить интенсивность магнитного поля, пропорциональная силе тока.

Чтобы быть последовательным, я должен завершить эти рассуждения утверждениями, которые некоторые ортодоксы, возможно, сочтут кощунственными:

Магнитное поле (как и электрическое) – это абстрактная категория, *математическая модель* для описания электродинамических взаимодействий. Но – в отличие от электрической энергии, – «магнитной энергии» не существует ни в какой форме. Это еще один фантом, порожденный материализацией полей. То, что мы называем «энергией магнитного поля», является лишь *математическим* синонимом «электрической энергии движения».

Некоторые аргументы в пользу таких представлений дает анализ природы электромагнитного излучения (см. раздел 7.).

[1]. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. – 11-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. С. 181.

[2]. *Яворский Б.М. и Детлаф А.А.* Справочник по физике (для инженеров и студентов вузов). М.: Госиздат физ.-мат. лит., 1963. С. 355.

[3]. БЭС, Физика. – М.: Научное изд. БРЭ, 1999. С. 903.

[4]. *Максвелл Дж. К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1954. С. 301.

[5]. *Савельев И.В.* Курс общей физики, т. 2. – М.: Наука. Главное изд. физ.-мат. лит., 1978. С. 20.

6. ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В предыдущем разделе мы рассмотрели работу «абстрактного» генератора постоянного тока и участие в этом процессе сторонних сил. Главный вывод из этого рассмотрения заключается в том, что нельзя путать процесс генерации электрической энергии с процессами ее превращения в другие виды энергии (работу, тепло и пр.). К сожалению, эту ошибку и по сей день совершают многие специалисты по электродинамике, что существенно искажает наши представления об электромагнитных взаимодействиях.

В этом разделе мы рассмотрим некоторые особенности ЭМИ в гармонических процессах, которые в классической литературе обычно не рассматриваются. Этот анализ позволит уточнить фазовые соотношения в этих процессах.

6.1. Гармонический индукционный электрогенератор

Электромагнитная индукция – это процесс преобразования различных видов энергии (прежде всего – механической) в энергию электрическую. На этом принципе работают все электрогенераторы переменного тока – от велосипедной «динамки» до мощнейших агрегатов на ГЭС. Принцип получения электроэнергии с помощью электромагнитной индукции тот же, что и в других (например, химических) электрогенераторах: противодействуя кулоновским силам, сторонние силы разносят электрические заряды на выходные полюса генератора, создавая тем самым разность потенциалов – потенциальную электрическую энергию.

Сторонними силами в индукционных генераторах служат магнитные силы. Согласно Фарадею в проводнике, пересекающем линии магнитного поля, магнитная сила приводит в движение электроны. Этот ток и есть *сторонний ток*, создающий на концах проводника разность потенциалов – ЭДС. Условимся называть *индукционным током* именно этот – сторонний ток. По Фарадею индукционный ток *предшествует* возникновению ЭДС индукции. Сегодня мы сказали бы, что индукционный ток *опережает* ЭДС индукции по фазе.

В первой половине 19-го века электродинамика осваивала постоянные токи. Еще не было представлений о гармонических токах, фазовых сдвигах и пр. Правила для разветвленных цепей постоянного тока были сформулированы Кирхгофом лишь в 1847 году, а на цепи синусоидальных токов эти правила Д. Рэлей распространил лишь в 1886 году.

В 20-м веке электротехника перешла преимущественно на производство и использование переменных токов от индукционных генераторов, создающих *гармонические* ЭДС. Основные принципы и понятия электромагнитной индукции, разумеется, остались теми же, что и при Фарадее и Максвелле. Но это явление обогатилось новыми параметрами, рассмотрение которых может вскрыть некоторые особенности индукционного процесса.

До тех пор, пока электромагнитная индукция имела «два лица», говорить о гармонических индукционных процессах было – по меньшей мере – затруднительно. Теперь, когда показано, что природа ЭМИ едина во всех ее проявлениях, можно рассмотреть некоторые особенности процесса генерации *гармонической* индукционной ЭДС.

Чтобы получить гармоническую ЭДС в движущемся проводнике длиной l (см. Рис. 6-1), заставим проводящий отрезок совершать в однородном магнитном поле с

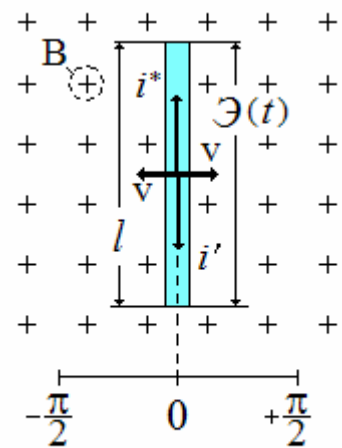


Рис. 6-1

индукцией B колебательные движения со скоростью, изменяющейся, например, по закону

$$v = v_m \cos \omega t, \quad (6.1)$$

где v_m – амплитуда, а ω – циклическая частота колебаний.

Элементарный магнитный поток, который пересекает проводник за время dt , определяется зависимостью

$$d\Phi = Bv l \cdot dt = Bv_m l \cos \omega t \cdot dt. \quad (6.2)$$

Интегрирование (6.2) дает для магнитного потока, пересекаемого проводником, гармоническую функцию:

$$\Phi(t) = \frac{Bv_m l}{\omega} \sin \omega t = \Phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6.3)$$

где $\Phi_m = \frac{Bv_m l}{\omega}$ – амплитудное значение магнитного потока.

В данном рассмотрении сторонняя (магнитная) сила по величине и направлению может быть представлена формулой Лоренца, которая пропорциональна скорости v пересечения электрическими зарядами линий магнитного поля и, следовательно, описывается гармонической функцией, совпадающей по фазе со скоростью (6.1):

$$F^*(t) = F_m^* \cos \omega t, \quad (6.4)$$

где F_m^* – амплитудное значение сторонней силы.

Магнитная сила создает в проводнике гармонический индукционный ток

$$i^* = i_m^* \cos \omega t, \quad (6.5)$$

что позволяет записать соотношение для элементарного заряда:

$$dq = i^* dt = i_m^* \cos \omega t \cdot dt. \quad (6.6)$$

Интегрируя (6.6), получаем зависимость от времени величины заряда, создаваемого на концах проводника сторонним током,

$$q(t) = \int dq = \int i_m^* \cos \omega t \cdot dt = \frac{i_m^*}{\omega} \sin \omega t = q_m \sin \omega t, \quad (6.7)$$

где $q_m = i_m^* / \omega$ – максимальный заряд. Заряды, скопившиеся на концах проводника, создают индукционную ЭДС $\mathcal{E}(t)$, пропорциональную заряду. Поэтому зависимость ЭДС индукции от времени будет выражаться аналогичной функцией

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_m \sin \omega t = \mathcal{E}_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6.8)$$

которая совпадает по фазе с магнитным потоком, но на четверть периода *отстает* от стороннего тока (6.5).

Сдвиг фаз между создаваемой ЭДС и индукционным током – это характерная черта индукционного процесса – «визитная карточка» сторонних сил!

Одновременно с ЭДС индукции возникает и обратная ЭДС (см. пункт 5.2):

$$\mathcal{E}_i(t) = -\mathcal{E}(t) = -\mathcal{E}_m \sin \omega t . \quad (6.9)$$

Во II четверти периода, когда сила Лоренца меняет направление, под действием этой ЭДС в проводнике появляется обратный (*потенциальный*, кулоновский) ток

$$i'(t) = -I'_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I'_m \cos \omega t , \quad (6.10)$$

отстающий от ЭДС \mathcal{E}_i на четверть периода и *совпадающий по фазе* со сторонним током (6.5). Заметим, что i' – не чисто потенциальный ток. Хотя он создается потенциальной ЭДС \mathcal{E}_i , в его формировании участвует и сторонняя сила. В этом – физическая причина отставания по фазе обратного тока от обратной ЭДС.

К концу II четверти периода проводник полностью разряжается, обе ЭДС (\mathcal{E} и \mathcal{E}_i) обращаются в нуль, а ток становится чисто сторонним.

Таким образом, в I и III четвертях периода происходит генерация электрической энергии, а во II и IV четвертях – ее диссипация (переход в тепло).

На рисунке 6-2,а в координатной форме приведены зависимости (6.1)-(6.5), и (6.8)-(6.10), а на рис. 6-2,б – векторная диаграмма, на которой представлены фазовые соотношения между электрическими параметрами в разомкнутом микрогенераторе.

Если микрогенератор замкнуть на внешнее сопротивление R , то ЭДС индукции (6.8) создаст *во внешней цепи* синфазный с ней потенциальный ток

$$i = \frac{\mathcal{E}_m \sin \omega t}{R} = i_m \sin \omega t = i_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6.11)$$

где $i_m = \mathcal{E}_m / R$ – его амплитудное значение. Видно, что этот ток *не совпадает* по фазе со сторонним током (6.5), а *отстает* от него на четверть периода. На концах проводника электрический ток терпит разрыв.

Заметим, что в замкнутом режиме ЭДС, генерируемая сторонней силой, разряжается в обоих направлениях – как на внешнюю цепь, так и внутрь генератора (с обратным током). Поэтому ЭДС индукции \mathcal{E} изменяется со временем по закону, отличному от гармонического, и не достигает значения (6.8), как в разомкнутом («холостом») режиме работы. Соответственно и все токи теряют гармонический характер. Все промышленные индукционные электрогенераторы работают именно в таком режиме – замкнутом на внешнюю нагрузку. Но в цепях генераторов большой мощности эта ангармоничность ЭДС не заметна.

6.2. Фазовые соотношения в замкнутом контуре

Электромагнитная индукция в замкнутом проводящем контуре – это, пожалуй, единственный пример, где генерация и диссипация электрической энергии происходят одновременно. Но гармонический режим здесь имеет свои особенности.

Нами было высказано уже немало критических замечаний в адрес максвелловской формы представления закона электромагнитной индукции. Но в этой формуле есть еще один «штришок», о котором мы еще не говорили. Это – знак минус перед производной от магнитного потока. Правда, «ответственность» за этот знак несет не Максвелл, а

русский академик Э. Ленц, который в 1833 году внес его в формулу (1.4) для определения *направления* индукционного тока в замкнутом контуре. Правило Ленца формулируется так (цитирую по [1]):

Индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток.

Применительно к индукции по методу пересечения более подходящей является следующая формулировка этого правила, данная автором [2]:

Ток направлен так, что механическая сила, действующая на движущийся проводник, противоположна скорости (тормозит движение).

Правило Ленца задает направление *тока*, но так как авторами предполагалось, что ток в контуре создается индукционной ЭДС, то оно относится и к направлению ЭДС. Для гармонических процессов это означает, что в замкнутом индукционном контуре ЭДС индукции и потенциальный ток совпадают по фазе. Так ли это?

Обсуждая возникновение индукционной ЭДС в замкнутом контуре по методу пересечения, мы показали, что этот контур можно собрать из n разомкнутых микрогенераторов предельным переходом $n \rightarrow \infty$. Из этого следует, что в замкнутом контуре должны выполняться те же фазовые соотношения, что и в разомкнутом микрогенераторе, то есть сторонний ток должен совпадать по фазе с *обратным* (потенциальным) током и с производной $d\Phi/dt$ (см. Рис. 6-2,б). Это означает, что в законе Максвелла должен был бы стоять знак « $+$ ». Однако все не так просто – контур-то *замкнут*! А в замкнутом микрогенераторе существуют одновременно потенциальные токи как в направлении ЭДС индукции (прямой ток), так и в противоположном направлении (обратный ток). Какие же фазовые соотношения выполняются при гармоническом индукционном процессе в замкнутом проводящем кольце?

Замкнутый индукционный контур отличается от замкнутого на нагрузку микрогенератора тем, что внешняя цепь совпадает с внутренней – ЭДС генерируется и расходуется *во всем* контуре (см. раздел 4.). Поэтому потенциальный ток в замкнутом контуре, как и в разомкнутом микрогенераторе, является *продолжением* стороннего тока (см. Рис. 6-2,а). При этом отсутствует разрыв в токе, как это имеет место в нагруженном на активную нагрузку микрогенераторе. То есть в замкнутом индукционном контуре действительно выполняются *все* фазовые соотношения, характерные для разомкнутого микрогенератора. В индукционном генераторе ЭДС должна опережать создаваемый ею потенциальный ток. Но тогда, как видно из векторной диаграммы на Рис. 6-2,б, потенциальный ток в контуре должен создаваться не прямой, а *обратной* ЭДС! Для этого необходимо, однако, чтобы в проводящем кольце существовали неоднородности, на которых собираются заряды, создающие обратную ЭДС. Можно предположить, что эти неоднородности обусловлены периодичностью электрического поля в кристаллической структуре проводника. Однако это предположение требует теоретического анализа и дополнительных экспериментов.

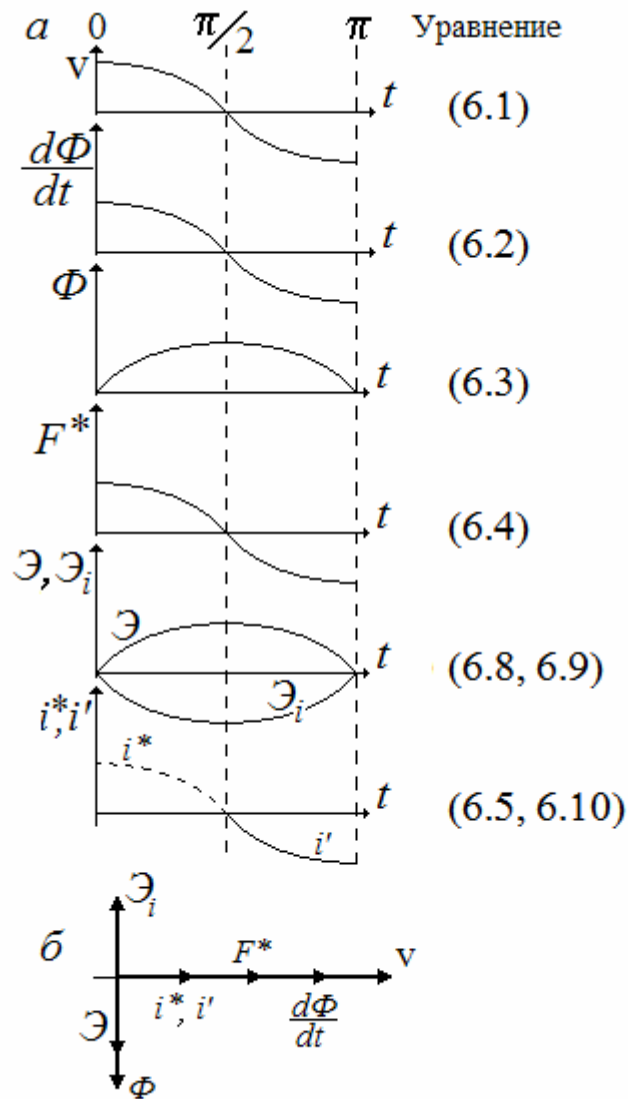


Рис. 6-2

Более правдоподобным нам кажется другой вариант:

В замкнутом контуре потенциальная ЭДС вообще не возникает. В тепло переходит непосредственно *сторонняя энергия*. В пользу такого варианта ЭМИ в замкнутом проводящем контуре можно привести два соображения:

1. Какими бы силами (сторонними или потенциальными) не перемещались электроны в металлическом проводнике, механизм тепловых потерь один и тот же. Разница в прямом и обратном сопротивлениях, как это имеет место в гальванических элементах, отсутствует. Это значит, что потери сторонней энергии на некотором участке проводника такие же, какими они были бы при таком же потенциальном токе. Это объясняет отсутствие разности потенциалов на любом участке контура (равенство $\mathcal{E} = Ir$ выполняется на любом отрезке контура – см. (4.2)).

2. Только таким механизмом можно объяснить тот частный случай ЭМИ, когда в кольце индуцируется *постоянная* ЭДС (магнитный поток, пронизывающий контур, растет линейно со временем).

В любом случае дальнейший анализ индукционного процесса в замкнутом проводящем контуре представляет лишь академический интерес. Реальные электрогенераторы работают, как правило, в режиме индукционного генератора, замкнутого на внешнюю нагрузку.

- [1]. *Сивухин Д. В.*. Общий курс физики, т. 3. Электричество, Физматлит, Москва (2004), с. 260.
- [2]. *Калашиников С. К.* Электричество, Физматлит, Москва (2004), с. 197.

7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Догадываюсь, что у заинтересованного читателя уже давно готов вопрос: «Вот Вы развенчали максвелловскую форму представления электромагнитной индукции, отказали в «праве на жизнь» вихревому электрическому полю... Но как же быть с электромагнитными волнами? Ведь они-то существуют!». Вопрос законный – сегодня в существовании электромагнитного излучения не сомневаются даже те, кто считает, что «на все – воля Божья...». В этом разделе, наконец, пойдет разговор об электромагнитных волнах.

7.1. О системе уравнений электродинамики

Представления о природе электромагнитных волн (ЭМВ) заложены в систему уравнений Максвелла, составляющей основу современной электродинамики. Эта теория разрабатывалась Дж. Максвеллом почти два десятилетия (с 1855 по 1873 годы) и в дальнейшем неоднократно правилась и преобразовывалась другими исследователями – Г. Герцем, О. Хевисайдом, А. Эйнштейном, Г. Лоренцем и др. Существенным правкам подверглись и некоторые принципиальные идеи Максвелла, и сами уравнения. Приведу лишь одно заключение из сборника статей, посвященного 150-летию со дня рождения Дж. Максвелла: «Общепотребительная ныне система уравнений Максвелла не соответствует ни одной из систем, данных в работах Д.К. Максвелла» ([1]).

Вывод о существовании ЭМВ и электромагнитной природе света является одним из основных следствий из теории Максвелла. Сегодня трудно говорить о деталях его творческого метода. Поэтому многие высказывания о ходе мыслей, логике Максвелла сегодня являются не более чем предположениями. Позволю себе тоже сделать одно предположение. Мне кажется, что мысль о существовании электромагнитных волн не была следствием, а *предшествовала* разработке системы уравнений электродинамики, и даже больше – была одной из целей этой работы. Еще в декабре 1861 года в письме к У. Томсону (Кельвину) Максвелл высказал предположение, что «...магнитная и светоносная среды идентичны». Есть документальные свидетельства, подтверждающие, что о существовании ЭМВ догадывался еще Фарадей. Поэтому вся работа Максвелла была *нацелена* на разработку механизма образования и распространения ЭМВ.

К середине 19-го века все основные законы электродинамики были уже известны: закон Био-Савара и Ампера были открыты в 1820 году, в 1831 году Фарадей получил основной закон электромагнитной индукции, а в 1839 году Карл Гаусс сформулировал основную теорему электростатики – теорему Гаусса-Остроградского. Максвелл обобщил эти зависимости, сведя их в единую систему уравнений. В разных вариантах этой системы насчитывалось до 20 уравнений. Окончательная система состоит из семи уравнений, но ее основу составляют два уравнения:

$$\begin{aligned} \text{I. } \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j}_{\text{пр}} + \partial \mathbf{D} / \partial t \\ \text{II. } \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t, \end{aligned} \quad (7.1)$$

которые описывают взаимные превращения электрического поля в магнитное (I) и наоборот (II).

На разработку этой системы Максвеллу – талантливому физику-теоретику, автору блестящих работ по молекулярной физике, механике, оптике – потребовалось почти 20 лет! Объяснить это можно лишь тем, что при разработке системы уравнений электродинамики он столкнулся с огромными трудностями, *не связанными* с математикой. Основная трудность заключалась в том, что Максвелл... опередил свое время, и остро ощущал дефицит знаний, необходимых для понимания *физики* (природы) электромагнитных взаимодействий.

7.2. Электромагнитные волны

По первоначальному замыслу процесс генерации и распространения электромагнитных волн требовал симметрии взаимопревращений электрической и магнитной компонент волны. Так появилась максвелловская формула закона ЭМИ, которая получила свое отражение во II уравнении системы (7.1).

7.2.1. Фазовые соотношения в ЭМВ

Решение системы уравнений электродинамики приводит к волновым дифференциальным уравнениям для напряженностей электрического (\mathbf{E}) и магнитного (\mathbf{H}) полей:

$$\Delta \mathbf{E} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad \text{и} \quad \Delta \mathbf{H} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}.$$

Эти уравнения дают для \mathbf{E} и \mathbf{H} два *одинаковых* волновых решения. Электрическая и магнитная волны лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях и *синфазны*. Этот результат приводится во всех учебниках и пособиях по электродинамике. Но, если компоненты электромагнитной волны синфазны, то возникает коварный вопрос: а возможно ли вообще существование электромагнитных волн? Ведь распространение колебаний в пространстве возможно лишь в том случае, если существует механизм передачи возбуждения (энергии колебаний) из одной точки среды в соседнюю точку. В упругих средах этот механизм обусловлен *упругостью* (взаимодействием молекул) среды. В вакууме механизмом близкодействия может быть лишь переход энергии электрических колебаний в энергию магнитных колебаний в *соседней точке* пространства и наоборот. В этом заключалась основная идея Максвелла, которая привела его к мысли о существовании электромагнитных волн! Но если колебания синфазны, то такое *электромагнитное* «зацепление» между точками пространства отсутствует, что исключает возможность распространения электромагнитных колебаний. То есть, синфазная электромагнитная волна *не может быть бегущей*.

Для электромагнитного излучения в замкнутой области (например, для стоячих волн в резонаторе) уравнения Максвелла дают между компонентами ЭМВ сдвиг на четверть волны [2]. При этом какая-то из компонент волны должна иметь на стенках резонатора пучность, что невозможно, так как стенки резонатора непрозрачны для электромагнитного поля. Кроме того, электромагнитная энергия (не отдельных компонентов, а *полная* энергия волны!) в такой *стоячей* волне совершает колебания на отрезке в четверть волны, что также не характерно для стоячих волн.

Таким образом, строгое решение современной системы уравнений электродинамики приводит к странным выводам, что бегущая электромагнитная волна не может «бежать», а стоячая волна не хочет «стоять»!

Далее:

Если электрическая и магнитная компоненты ЭМВ синфазны, то в любой точке волнового пространства электрическая и магнитная энергия не переходят друг в друга, а возникают и исчезают *одновременно*. При этом плотность потока электромагнитной энергии (модуль вектора Умова-Пойнтинга) в каждой точке волнового пространства пульсирует по гармоническому закону. Не нарушается ли здесь закон сохранения энергии?

Наконец, синфазность компонентов в электромагнитной волне противоречит самой максвелловской формулировке основного закона ЭМИ, согласно которой

напряженность электрического поля должна быть пропорциональна *производной* от магнитной индукции.

Любого из этих аргументов достаточно, чтобы заключить, что не все благополучно в «максвелловом королевстве». Но сторонники современной интерпретации природы электромагнитных волн старательно «не замечают» эти физические «парадоксы». Менее уверены в синфазности ЭМВ специалисты-практики. Например, автор [3] убежден, что «колебания магнитного поля опережают колебания электрического поля на $\pi/2$ ». С этим согласны и другие специалисты по электросвязи. Существуют и эксперименты, подтверждающие эту точку зрения (см. [4]). Но ни те, ни другие не могут объяснить, *как* образовалась эта «трещина» в самом фундаменте электродинамики.

7.2.2. Ток смещения

Современные представления о природе ЭМВ сводятся к тому, что переменное вихревое магнитное поле создает нестационарное вихревое электрическое поле, перпендикулярное магнитному. В свою очередь электрическое поле генерирует вихревое магнитное поле и т.д. Но со времен Х. Эрстеда и экспериментов Био и Савара известно, что магнитное поле создается *электрическим током*!

Исключение электрических зарядов и токов из индукционного процесса стало для Максвелла камнем преткновения при разработке системы уравнений электродинамики. Если бы Максвелл творил в наше время, то эту систему ему вряд ли удалось написать, потому что совершенно неразрешимой показалась бы задача объяснить распространение ЭМВ в вакууме. Но во времена Максвелла считалось, что все пространство заполнено некой гипотетической всепроникающей субстанцией – «мировым эфиром», обладающим весьма неопределенными свойствами. В 1837 году Фарадей обнаружил явление поляризации диэлектриков и высказал мысль о возможности распространения «электрического и магнитного действия» через диэлектрическую среду. В 1861 году, анализируя поведение диэлектрика в электрическом поле, Максвелл предположил, что взаимное *смещение* зарядов в молекулах диэлектрика пропорционально напряженности внешнего электрического поля \mathbf{E} . В современных обозначениях эта зависимость определяет электрическую индукцию $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$, где ϵ_0 – электрическая постоянная. При изменении электрического поля в диэлектрике кратковременно протекает ток (ток поляризации), плотность которого определяется зависимостью $\mathbf{j}_{\text{см}} = d\mathbf{D}/dt = \epsilon_0 d\mathbf{E}/dt$. Этот ток Максвелл назвал «током смещения». Это был хоть и кратковременный, но ток *реальных* зарядов, который должен был создавать магнитное поле, что позволяло объединить плотность тока смещения $\mathbf{j}_{\text{см}}$ с плотностью тока проводимости $\mathbf{j}_{\text{пр}}$ в общий (полный) ток. Суммарную плотность полного тока Максвелл и включил в I уравнение системы (7.1).

Цитирую по [5]: «Следует помнить, что вакуум в смысле электромагнитной теории есть понятие чуждое Максвеллу, так что диэлектрик включает и тот случай, который мы бы описали как пустое пространство». Для Максвелла мировой эфир не был пустым пространством. Он предположил, что эфир, как и диэлектрик, содержит связанные электрические заряды. Таким образом, исключив заряды из закона электромагнитной индукции (II уравнение), Максвелл вынужден был ввести их в процесс распространения ЭМВ. В то время это был единственный разумный выход, позволявший сохранить идею электромагнитных волн. Но для этого потребовалось наделить мировой эфир свойствами диэлектрика.

На грани веков, когда создавалась теория относительности, с первым уравнением Максвелла начали происходить чудеса. Постулаты теории относительности исключали существование абсолютной системы отсчета, каковой представлялся мировой эфир. Это понятие было безжалостно изгнано из научного обихода. Вместе с эфиром на свалку «научных отходов» выплеснули и «ребенка» – идею Фарадея о неразрывной связи электрического поля с электрическими зарядами. Казалось бы, с исчезновением мирового эфира должна была обрушиться вся система рассуждений, положенная Максвеллом в основу электродинамики. Но релятивисты, не решаясь обидеть ни Максвелла, ни Эйнштейна, изобрели «вихревое электрическое поле». Это была гениальная находка, так как она избавляла индукционный процесс (а, следовательно, и ЭМВ) вообще от всяких зарядов! В «пустоте» не могло быть тока проводимости, поэтому первое уравнение системы (7.1) получило форму

$$\text{rot } \mathbf{H} = d\mathbf{D}/dt. \quad (7.2)$$

Таким образом, магнитное поле в ЭМВ создавалось теперь только «полем электрической индукции» \mathbf{D} . Авторы этой идеи «не заметили», что электрические заряды присутствуют и в этом параметре, так как по своему физическому смыслу электрическая индукция представляет собой *поверхностную плотность зарядов*, возникающую в диэлектрике в процессе поляризации. Без зарядов переменное электрическое поле не может ни поляризовать «пустоту», ни создавать ток смещения. Отсутствующие в вакууме молекулы заменили несуществующим «вихревым электрическим полем», а производную от этого фантома назвали «током смещения в вакууме».

Во II томе Берклеевского курса физики [6] Э. Парсел приводит любопытный анализ тока смещения в *вакуумном* конденсаторе. Он показывает, что магнитное поле в вакууме ток смещения... не создает. Напряженность магнитного поля в любой точке пространства (внутри и вне конденсатора) определяется суперпозицией полей от двух полутоков проводимости – втекающего в одну пластину конденсатора и вытекающего из другой.

Сторонники непорочности системы уравнений термодинамики утверждают, что способность изменяющегося электрического поля создавать в вакууме ток смещения без участия зарядов – это эффект релятивистский, а производную $d\mathbf{D}/dt$ называют «релятивистской поправкой». Вводя в систему уравнений электродинамики понятие «ток смещения», Максвелл об этом не догадывался...

7.3. О природе электромагнитных волн

Электромагнитные волны – это венец теории Максвелла, очень важный для практики, сложный и плохо изученный природный процесс. Ошибочные представления об электрической энергии и ее формах и путаница в процессах генерации и расходования электроэнергии привели к ряду утверждений о природе ЭМВ, которые полны противоречий.

Как же сегодня представляется природа ЭМВ в «официальной» электродинамике? Энергия «вихревого электрического поля» поочередно переходит в еще менее определенное понятие – «энергию магнитного поля» и наоборот. Так как оба поля синфазны, то все это происходит в одной точке. Магнитное поле создается «током смещения», а «поток электромагнитной энергии» непрерывно пульсирует, то исчезая, то возникая вновь. Этот фантазийный «винегрет» и называется сегодня «электромагнитным излучением».

Я не тешу себя иллюзиями, что смогу вскрыть и объяснить природу электромагнитного излучения. Попытаюсь лишь предложить *возможный* механизм

образования и распространения электромагнитных волн, свободный от этих нелепостей.

7.3.1. Сторонние силы в ЭМВ

Нет необходимости доказывать, что электромагнитная индукция имеет непосредственное отношение к образованию и распространению ЭМВ. Один из двух процессов взаимопревращений в ЭМВ – это процесс *генерации* потенциальной электрической энергии (электрического поля) из энергии магнитной. Этот процесс требует участия электрических зарядов и сторонних сил.

Вакуум не является проводящей средой и не содержит свободных зарядов. Поэтому единственным током, генерирующим магнитное поле в ЭМВ, может быть только *ток смещения*. Но это не тот иллюзорный ток, который «возникает» в результате дифференцирования «вихревого поля электрической индукции», а ток смещения реальных зарядов, как его понимал Максвелл – ток поляризации «вакуума». Отсюда следует, что для существования ЭМВ в «пустом» пространстве должны существовать связанные электрические заряды противоположного знака. Это и есть тот единственный постулат, который Максвелл положил в основу всей системы уравнений электродинамики, и чего упорно не желают замечать его последователи.

Рассуждать о природе этих электронейтральных образований бессмысленно – сегодня о них можно сказать лишь, что они *существуют* и *как-то* заполняют «пустое» пространство. Известно, например, реально существующее (обнаруженное экспериментально) электронейтральное образование – позитроний. Атом позитрония представляет собой водородоподобную связь электрона с позитроном. Имеет ли позитроний какое-либо отношение к «атомам вакуума», еще предстоит выяснить. В дальнейшем мы будем называть их «позитронием» лишь для краткости.

Допустим, в некоторой плоскости пространства YOZ появляется возмущение, которое выражается в том, что заряды «позитрония» оказываются разнесенными на некоторое расстояние (Рис. 7-1). В неподвижности система двух разнесенных зарядов обладает потенциальной электрической энергией $q\Delta\varphi_0$, где q – заряд одного знака, а $\Delta\varphi_0$ – разность потенциалов между полюсами «позитронного диполя». Если предоставить систему самой себе, электрические заряды начнут ускоряться навстречу друг другу, а потенциальная энергия будет переходить в «энергию движения» электрических зарядов – энергию электрического тока. Если потенциальная энергия связанных зарядов будет изменяться по гармоническому закону, то разность потенциалов в этом месте будет описываться, допустим, функцией

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \cos \omega t. \quad (7.3)$$

Как и в гармонических индукционных процессах (см. раздел 6.), электрический ток, возникающий при сближении зарядов, будет отставать от $\Delta\varphi$ на $\pi/2$. Тогда плотность тока можно представить соотношением:

$$i = i_0 \sin \omega t = i_0 \cos(\omega t - \pi/2). \quad (7.4)$$

Если обратиться к механизму распространения волн (например, механических), то на следующем этапе должна произойти передача «энергии движения» в соседнюю точку пространства. Природа этого процесса сегодня неизвестна. Согласно существующим представлениям передача энергии в ЭМВ осуществляется посредством магнитного поля. Эта модель используется в электродинамике уже более 100 лет и дает правильные результаты – как качественные, так и количественные, что позволяет использовать ее и в наших рассуждениях.

Согласно электромагнитной модели распространения ЭМВ ток смещения создает в плоскости, перпендикулярной этому току, магнитное поле, распространяющееся в пространстве в виде волны напряженности магнитного поля H .

В соответствие с законом электромагнитной индукции Фарадея магнитный поток (и, следовательно, напряженность магнитного поля) отстает по фазе от индукционного тока на $\pi/2$. То же следует и из диаграмм гармонического индукционного процесса (см. Рис. 6-2). Осцилляции атомов позитрония можно рассматривать, как колебания тока в разомкнутом микрогенераторе (тока смещения), с той разницей, что в вакууме энергия движения не рассеивается, а целиком переходит в потенциальную энергию. Таким образом, для магнитной напряженности в плоскости YOZ , создаваемой током смещения, можно записать соотношение (сравни с (6.10)):

$$H = -H_0 \cos \omega t, \quad (7.5)$$

что создает плоскую магнитную волну в направлении оси X , поляризованную в плоскости XOZ :

$$H = -H_0 \cos(\omega t - kx). \quad (7.6)$$

По индукционному механизму магнитная волна создает волну плотности индукционного тока, опережающую ее на четверть волны:

$$i = i_0 \sin(\omega t - kx). \quad (7.7)$$

На Рис. 7-2,а пунктиром приведена волна магнитной напряженности (7.6) (без

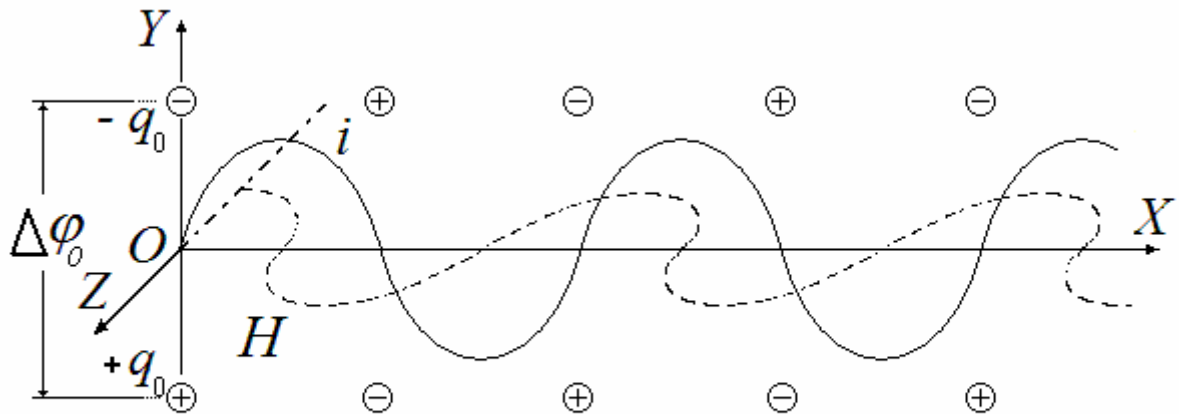


Рис. 7-1

учета плоскости поляризации) и волна плотности тока смещения (7.7) (контурная кривая).

По аналогии с током в разомкнутом микрогенераторе, ток смещения складывается из стороннего i^* (индукционного) и потенциального i' тока (аналог тока проводимости), являющегося продолжением стороннего тока. Сторонний и потенциальный токи сменяют друг друга каждую четверть периода.

Разность потенциалов, создаваемая сторонним током, играет здесь роль обратной ЭДС \mathcal{E}_i . Как и в разомкнутом микрогенераторе, она опережает индукционный ток по фазе на $\pi/2$ и образует волну, опережающую ток смещения на четверть волны:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \cos(\omega t - kx) . \quad (7.8)$$

Сторонние силы приводят к поляризации «вакуума», а потенциальные создают пульсирующий ток. Участки волны плотности тока, на которых работают сторонние силы, на Рис. 7-2,а затенены. На этих участках происходит *генерация* потенциальной

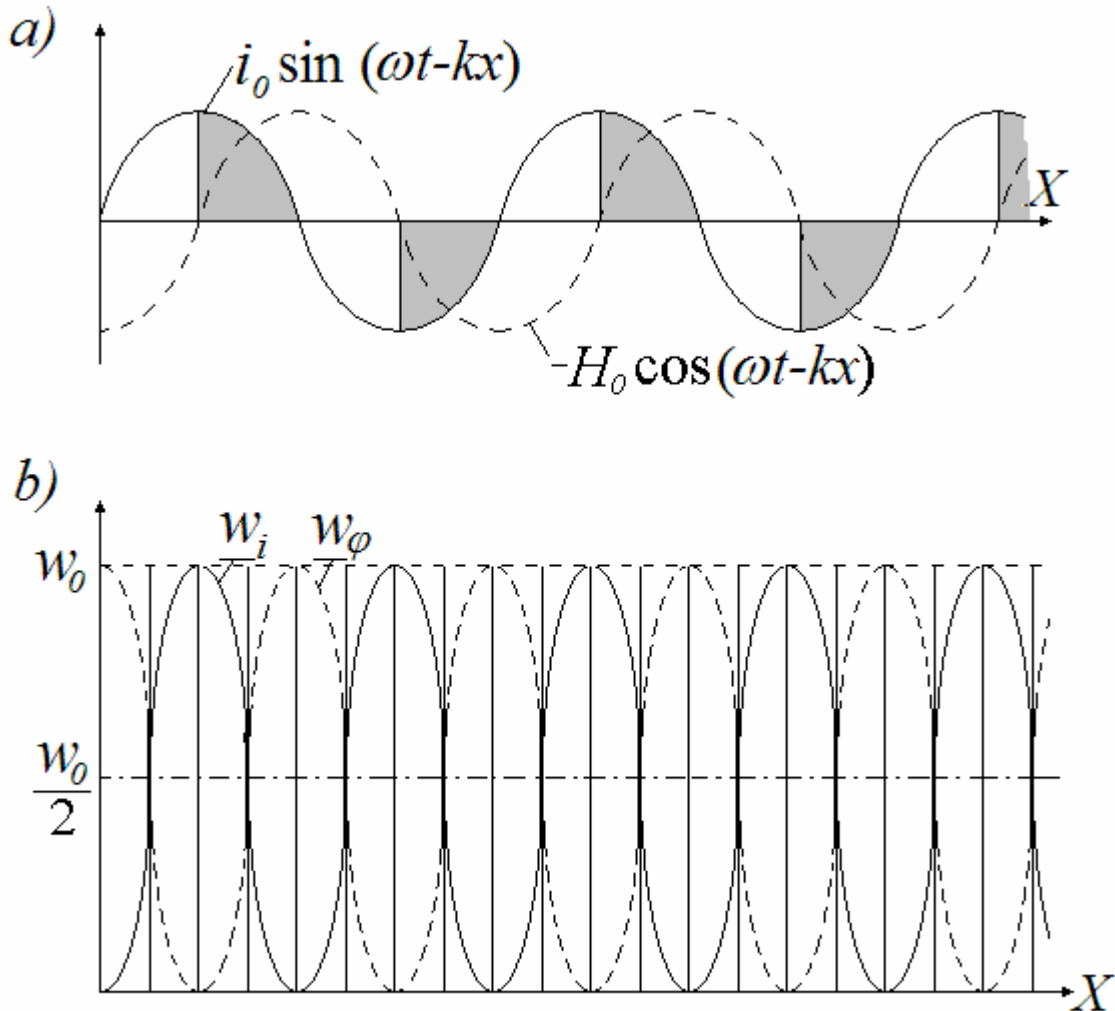


Рис. 7-2

электрической энергии. Сторонними силами в данном рассмотрении следует считать магнитные силы. На светлых участках происходит *превращение* потенциальной энергии в электрическую «энергию движения».

7.3.2. Энергия ЭМВ

Потенциальная электрическая энергия определяется соотношением $W_\varphi = q\Delta\varphi$.

Так как $q \propto \Delta\varphi$, то плотность потенциальной энергии в плоскости YOZ (с учетом (7.3)) изменяется со временем по закону

$$w_\varphi \propto \Delta\varphi^2 \propto w_{\varphi 0} \cos^2 \omega t = \frac{w_{\varphi 0}}{2} \cdot [1 + \cos(2\omega t)], \quad (7.9)$$

где $w_{\varphi 0} \propto q_0 \Delta \varphi_0$. Эта зависимость представляет косинусоиду с удвоенной частотой ($2\omega t$), приподнятую над осью абсцисс на половину амплитуды ($w_{\varphi 0}/2$) (см. Рис. 7-2,b).

Плотность «электрической энергии движения» пропорциональна квадрату плотности тока смещения: $w_i \propto i^2$. Поэтому колебания энергии тока смещения в плоскости YOZ будут определяться (с учетом (7.4)) зависимостью

$$w_i \propto w_{i0} \sin^2 \omega t = \frac{w_{i0}}{2} \cdot [1 - \cos(2\omega t)]. \quad (7.10)$$

На Рис. 7-2,b плотности потенциальной энергии w_φ (7.9) и «энергии движения» w_i (7.10) представлены волнами, распространяющимися в направлении оси X . Если отсутствуют потери энергии, то каждые четверть периода потенциальная энергия целиком переходит в «энергию движения». В любой точке волнового пространства плотность электрической энергии равна $w_{\varphi 0} = w_{i0} = w_\varphi + w_i = w_0 = \text{const}$. Это значит, что плотность *потока энергии* (модуль вектора Умова-Пойнтинга) $w_0 c = \text{const}$, то есть в любой точке плоской волны со временем не меняется (c – фазовая скорость волны).

Таким образом, то, что мы сегодня называем «электромагнитными волнами», согласно данному предположению представляет собой волны *электрической энергии*. Распространение этих волн обусловлено процессом перехода электрической энергии из потенциальной формы в «энергию движения» (энергию электрического тока) и обратно.

Механизмом, связывающим соседние точки пространства и обеспечивающим движение электрических волн, следует сегодня считать модель с участием магнитного поля, с той особенностью, что магнитное поле, не обладая собственной энергией, выполняет в этом процессе лишь роль посредника, передающего электрическую «энергию движения» в соседнюю точку пространства. Вопрос о физической природе «электрической упругости» физического вакуума остается открытым. Понять природу этого процесса можно будет лишь тогда, когда определится структура физического вакуума. Например, автор [8] считает, что вакуум состоит из перемежающихся положительных и отрицательных зарядов, образующих кубическую структуру, подобную структуре молекул NaCl. В такой модели передача «энергии движения» в соседнюю точку пространства может происходить путем обычного кулоновского взаимодействия разноименных зарядов в смежных ячейках вакуумной структуры.

[1] *Маркчев Н.Т.* Сравнение различных форм системы уравнений Максвелла – в Сб. статей «Максвелл и развитие физики XIX–XX веков» – М.: Наука, 1985. С. 93.

[2] *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Электричество. Т.3 – М.: Физматлит, 2004. С. 591.

[3] *Пирогов А.А.* Распространенная и очень вредная ошибка в представлении электромагнитных волн. – Электросвязь, 1993, №5. С. 13.

[4] *Гейнце С.С., Тимофеева Г.Я., Пирогов А.А. и др.* Синхронное радиовещание. М.: Радио и связь, 1989. С.18.

[5] *Борк А.М.* Максвелл, ток смещения и симметрия – В сб.: «Джеймс Клерк Максвелл. Статьи и речи». – М.: Наука, 1968. С. 315.

[6] *Парселл Э.* Электричество и магнетизм: Учебное руководство. Пер. с англ. – М.: Наука, 1983. – (Берклеевский курс физики, т. II). С. 249.

[7] *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 1. – М.: Наука, 1968. С. 209.1. *Маркчев Н.Т.*

[8] *Харченко К.П.* Эфир. // Интермост, 2007, №6 (53). С. 59

8. РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И НЕМНОГО МОРАЛИ

*Пусть Жираф был не прав,
Но виновен не Жираф,
А тот, кто крикнул из ветвей:
«Жираф Большо-о-ой,
Ему видней...»*

В. Высоцкий

Эти заметки мало походят на научные исследования. Их можно было бы отнести к новому жанру научных публикаций – «научные расследования». За полтора века сменилось несколько поколений ученых, воспитанных на идеях и положениях, которые в этой работе подвергаются «расследованию». Предвижу, что эти записки встретят не только несогласие и возражения, но и осуждение, и другие, более крутые предложения. Я не надеюсь встретить понимание и сочувствие ученых старшего поколения (хотя буду безумно рад, если ошибусь!). Эти заметки рассчитаны главным образом на молодых исследователей, свободных от вековых догматов, способных, умеющих и желающих думать самостоятельно.

8.1. Остановиться, оглянуться...

С первых дней знакомства человечества с электрическими явлениями слово «электричество» связывалось с электрическими зарядами. Все эксперименты М. Фарадея однозначно показывали эту неразрывную связь. Понятие «электрическое поле» Фарадей ввел в 1830 году для утверждения в электродинамике принципа близкодействия. Окончательно он сформулировал концепцию электрического (и магнитного) поля в 1852 году. По мысли Фарадея эти поля определяли некоторое «напряженное состояние» окружающей среды, создаваемого электрическими зарядами. Разрабатывая теорию электромагнитного поля, Дж. Максвелл исключил из рассмотрения электрические заряды, заменив их участие в явлениях электромагнитной индукции взаимодействием полей. Для Максвелла это было одним из рабочих приемов, от которого он вскоре отказался, введя в теорию понятие «ток смещения». Но этот эпизод в творчестве Максвелла стал роковым для всего последующего развития электродинамики. После смерти Максвелла его продолжатели и «доброжелатели» вернулись к идее взаимодействия полей. Это потребовалось, чтобы примирить систему уравнений Максвелла с зарождающейся теорией относительности. Так появились «вихревое электрическое поле», «ток смещения в вакууме», а поля из *состояния* пространства превратились в физическую реальность с массой, энергией и прочими атрибутами материальных объектов.

«Теория электромагнитного поля» свернула ход развития электродинамики со «столбовой дороги» на боковую тропинку, которая завела эту науку в тупик. За последние сто лет в теоретической электродинамике не сделано ни одного значительного открытия. Многие специалисты считают, что какой-либо серьезный анализ электромагнитных процессов лишен смысла, ибо «в электродинамике уже все открыто, и ничего ни добавить, ни убавить». Это ли не симптом стагнации?

Кратко перечислю те проблемы, которые породила теория электромагнитного поля:

1. Более полувека известны экспериментальные факты, которые невозможно объяснить взаимодействием полей. Разрешить эти «парадоксы» мешает лишь фанатическая вера в непогрешимость теории электромагнитного поля.

2. Максвелловский вариант представления электромагнитной индукции породил фантом «вихревое электрическое поле», существование которого противоречит основным положениям теории физических полей. Попытка объяснить вихревым электрическим полем процесс электромагнитной индукции в замкнутом проводящем контуре привела к двум физически различным механизмам ЭМИ, что ни понять, ни объяснить сегодня никто не может.

3. По общему мнению, вихревое электрическое поле осуществляет ускорение заряженных частиц в циклических ускорителях. Будучи непотенциальным, такое поле *физически* ничего ускорить не может, но другие механизмы работы ускорителей даже не обсуждаются.

4. Наибольший вред «теория электромагнитного поля» нанесла понятию «электрическая энергия». Весь 20-й век строились электростанции, электрическая энергия передавалась на тысячи километров, во второй половине века заработали атомные электростанции, мы исправно оплачиваем Электросбыту счета за потребленную электроэнергию, которой, оказывается, не существует! Теоретики признают лишь существование «электромагнитной энергии», да и то лишь в форме «плотности энергии электромагнитного поля».

5. Отрицание теорией одного из основных понятий электродинамики привело к тому, что до сих пор недостаточно исследованы процесс *получения* электрической энергии и *формы* ее существования. Во многих исследованиях перепутываются два физически разных процесса – генерация и расходование электроэнергии. Под магию «энергии электромагнитного поля» подпали даже такие талантливые ученые, как академик И.Е. Тамм. Так был «открыт» несуществующий «Обобщенный закон Ома», появилась путаница в основных понятиях электроэнергетики – потенциал, разность потенциалов, ЭДС, напряжение и др. К счастью, практическая электротехника пошла своим путем. Огромные достижения электроэнергетики в 20-м веке получены не благодаря, а скорее – *вопреки* представлениям теоретической электродинамики.

6. Промахи теории наиболее полно проявились в интерпретации природы электромагнитного излучения. В конце 19-го века уже было очевидно, что постулаты теории относительности несовместимы с представлениями Максвелла о токах смещения в диэлектрической среде. Но вместо глубокого и беспристрастного анализа этого противоречия была изобретена «релятивистская поправка» – «ток смещения в вакууме», как производная от «вихревого поля электрического смещения». Современная теория электромагнитного поля оказалась бессильной объяснить «парадоксы» распространения ЭМВ, предпочитая их вообще «не замечать».

Наше понимание объективных законов природы складывается из субъективных представлений реальных и (увы!) смертных людей. Оценить объективно степень адекватности тех или иных положений и открытий, сделанных на переднем фронте науки, возможно лишь с высоты новых открытий. Поэтому так важно иногда остановиться, оглянуться и – с точки зрения нового знания – критически взглянуть на уже пройденный путь.

8.2. Кто виноват?

Сразу скажу, что этот вопрос – основной для любого расследования – для «научного расследования» не имеет смысла. И в науке есть недобросовестные, корыстные и честолюбивые люди. Но не о них речь. Разговор о тех исследователях, которые, безусловно, честны и бескорыстны в своем творчестве, но результаты их исследований не выдерживают испытание временем. Поскольку наши знания относительны, то эта участь уготована любым научным результатам и открытиям. Дело только во времени... В этом заключается главная, объективная трудность научного познания, неустранимая, но преодолеваемая трудом и талантом исследователей. Но есть и другие – субъективные препятствия на тернистом пути познания.

Оценивая путь, пройденный электродинамикой за полтора века, можно заключить, что сегодняшний кризис электродинамики в большой степени обусловлен досадными субъективными причинами, но не индивидуальными, а «коллективными» (как сейчас говорят – «корпоративными»). В том, что к третьему тысячелетию электродинамика оказалась «на запасном пути», нельзя винить никого конкретно. Даже те, кто заслуживают упрека, лишь (будем надеяться!) искренне заблуждались. Поэтому, исходя из презумпции невиновности, на этом «процессе» я выступаю на стороне защиты.

Идея перейти от зарядов к взаимодействию полей, безусловно, принадлежит Максвеллу. Но Максвелл вряд ли понимал, что с помощью простых математических преобразований он породил несуществующий фантом – вихревое электрическое поле. Талантливый теоретик, Максвелл обладал богатой физической интуицией. Поэтому он довольно скоро понял свою ошибку. Об этом говорит тот факт, что свою формулу закона электромагнитной индукции он включил в систему уравнений электродинамики лишь один раз – в своей ранней работе 1862 года. Это уравнение не вошло больше ни в одну из его последующих работ. Оно отсутствует и в окончательном варианте системы, опубликованном Максвеллом в 1873 году. Идея «взаимодействия полей» снова появилась лишь после смерти Максвелла в работах Герца и Хевисайда в форме II уравнения системы. (Возможно, это объясняет, почему сегодня формулу максвелловского варианта основного закона электромагнитной индукции стыдливо, но настойчиво называют «законом Фарадея», хотя Фарадей не имеет к этой формулировке никакого отношения).

Автор [1], анализируя многочисленные варианты системы уравнений электродинамики, приходит к выводу, что «...уравнения Максвелла в их общеупотребительной форме в определенном смысле не принадлежат Д.К. Максвеллу, а скорее Г. Герцу и О. Хевисайду». «Какие причины обусловили введение Г. Герцем и О. Хевисайдом «второго уравнения»? – продолжает автор. – В конечном счете, одна – соображения симметрии ..., требовавшей двойной формы представления электромагнетизма».

В статье, опубликованной в «*Am. J. of Physics*», 1963, №11, А.М. Борк писал: «Оливер Хевисайд был первым физиком, явно отметившим симметрию уравнений Максвелла... Он обращается к двойной форме, которая была введена им в 1885 г., причем электрическая и магнитная стороны электромагнетизма симметрично представлены и связаны. Ясно, что он рассматривает «двойную форму» как существенное нововведение, не имеющееся в статьях и книгах Максвелла». Именно это «нововведение» и привело к синфазности электрической и магнитной компонент в ЭМВ.

Существенно отличаются от современных представлений и взгляды Максвелла на электрическую энергию. Пусть они были непоследовательными и в чем-то (по сегодняшним понятиям) несколько наивными, но зато лишены «релятивистских поправок». Вот как он представлял себе природу электрической энергии: «Электрическая энергия бывает двоякого рода – электростатическая и электрокинетическая. У нас есть основания к допущению, что первая зависит от свойства среды, в силу которого электрическое смещение вызывает электродвижущую силу в противоположном направлении... Электрокинетическая энергия есть просто энергия движения, вызываемого в среде электрическими токами и магнитами...» [2].

Многие идеи гениального мыслителя были искажены или деформированы его последователями. Чтобы не обидеть ни Эйнштейна, ни Максвелла, они ввели физически бессмысленные понятия "вихревое электрическое поле" и "ток смещения в вакууме". Анализ работ Максвелла, проведенный автором [1], можно дополнить предположением, что и представления о природе ЭМВ также Максвеллу не принадлежат. Известно, что в своем творчестве Максвелл часто использовал метод аналогий. Сравнивая процесс распространения электромагнитных волн с

механическими волнами, он вряд ли согласился бы с синфазностью компонент ЭМВ и, безусловно, обнаружил бы нарушение закона сохранения энергии в том факте, что энергетический поток в электромагнитных волнах пульсирует.

Последующие поправки вносились в систему уравнений с благими намерениями – чтобы сохранить наследие Максвелла. Но этими «благими намерениями» и была выстелена дорога в мировоззренческий тупик...

К большому кораблю всегда прилипает множество ракушек. Эта истина стара, как мир. Одни восторгаются и преклоняются перед талантом, обожествляя его и делая из него икону. Другие – менее бескорыстные – не прочь погреться в лучах его таланта и величия. При этом от реального человека и истинного таланта остается лишь символ, бестелесная оболочка. Эти нравы шоу-бизнеса вызывают у мыслящих людей отторжение. А в науке такие коллективные безумства могут надолго затормозить прогресс познания природы. К сожалению, этот «синдром толпы» сказался и на развитии электродинамики.

8.3. «Математическая инфляция» в физике

Есть еще одна «коллективно-субъективная» причина, которая в 20-м веке получила размах эпидемии в науке. Это – чрезмерная математизация знания, которая особенно опасна для фундаментальной основы миропонимания – физики. Никто не отрицает важности и необходимости математического аппарата для описания и анализа научных результатов во всех отраслях знания и, прежде всего, в физике. Математика – важнейший инструмент обработки, осмысления, оценки правильности и даже прогнозирования новых научных результатов. Но математика – это *только* инструмент, не более!

С конца 19-го века в науке стала преобладать другая тенденция: умозрительные математические преобразования и их результаты без достаточного экспериментального обоснования стали провозглашаться объективной физической реальностью. Вот цитаты из статьи А. Эйнштейна, посвященной Максвеллу: «Дифференциальное уравнение в частных производных вошло в теоретическую физику в качестве служанки, но постепенно оно стало госпожой...». «Континуальное поле вошло в одну из областей теоретической физики как представитель физической реальности наряду с материальной точкой» [3] и т.д.

А вот мнение на этот счет самого Максвелла: «...физическая природа величины подчинена ее математической форме. Это – та точка зрения, которая характерна для математика, но она является вторичной по времени для физического аспекта, потому что для освоения различного рода величин человеческий мозг сначала должен иметь их представленными в природе» [4].

Усердная «служанка» может нанести большой вред, когда пытается исполнять роль «госпожи». Вера теоретиков в безграничные возможности математики привела к чрезмерному изобилию математики в физике. Академик Петровской Академии наук и искусств Ю.Г. Марков назвал эту тенденцию «математической инфляцией»: «Подобно тому, как в экономике мы замещаем натуральные ценности денежными знаками, так и в физике мы замещаем физические объекты математическими знаками... В условиях математической инфляции в физике возникает феномен виртуальных физических объектов, процессов, отдельных свойств, за которыми не скрывается, в общем-то, никакой объективной реальности» [5].

В нашем «научном расследовании» есть много примеров проявления этого «феномена»...

Соотношение между теорией и практикой не так однозначно, как это иногда представляется. Тезис «практика – критерий истины» тоже следует воспринимать критически. Иногда утверждают, что электромагнитная теория не может быть неверной, так как практическая электротехника уже более века успешно развивается,

пользуясь ее законами. Но это подтверждает лишь полшутливый тезис, что «теория может объяснить все».

Теория может быть удачной или неудачной, но никакая теория не может быть *абсолютно* правильной. Удачная теория может существовать и успешно работать десятилетия, и даже столетия. Например, теория эпициклов Птолемея 14 веков (!) успешно объясняла геоцентрическое устройство мира. А идея «взаимодействия полей» существует всего лишь 100 лет...

8.4. Что делать?

На этот сакраментальный вопрос вряд ли можно ответить однозначно. Ясно, что из тупика есть лишь один выход – назад. Но за целый век обратный путь на «столбовую дорогу» уже так замусорен и завален посторонними предметами, что, боюсь, разбирать эти завалы придется не одному поколению ученых. Но зато впереди – новые горизонты, увлекательная и благодарная работа, которую делать уже придется увлеченным и молодым...

[1]. *Маркчев Н. Т.* Сравнение различных форм системы уравнений Максвелла – в Сб. статей: «Максвелл и развитие физики XIX–XX веков» – М.: Наука, 1985. С. 93.

[2]. *Максвелл Д. К.* Статьи и речи. – М.: Наука, 1968. С. 202.

[3]. *Эйнштейн А.* Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности. – В сб.: Дж. К. Максвелл. Статьи и речи – М.: Наука, 1968. С. 245.

[4]. *Дж. Максвелл* (из «Обращения к математической и физической секциям Британской ассоциации» 15.09.1870). Там же, с. 310.

[5]. *Марков Ю. Г.* Принцип Маха как источник новой парадигмы в физике. – Новосибирск, 2005. (Препринт). С. 12.

Условия использования данного документа

Все материалы в этом документе подготовлены К. Б. Канном, который сохраняет исключительные авторские права на них.

Их воспроизведение допускается исключительно на условиях лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported (CC BY-SA 3.0):

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Перевод лицензии на русский язык доступен на сайте «Викитеки»:

http://ru.wikisource.org/wiki/Creative_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_Unported