

### Локализация потока энергии в трансформаторе

(по поводу статьи М.А. Шакирова, «Электричество», 2014, № 9 и 10)

МАЛЫГИН В.М.

Трансформатор является одним из самых распространенных электротехнических устройств. Теория трансформатора (методы расчета и анализ работы) детально рассмотрена в курсах электрических машин, в самом общем виде принцип его работы изложен в курсах физики и теоретических основ электротехники (ТОЭ). Современная теория позволяет при расчете трансформаторов добиваться на практике почти предельно возможного значения КПД до 0,99. Теория эта выглядит полностью сформированной, однако с точки зрения углубленного физического понимания процесса преобразования и переноса электромагнитной энергии в трансформаторе это не совсем верно. На это обращается внимание в интересной статье М.А. Шакирова [1], привлекающей внимание к теоретическим основам работы трансформатора после долгого отсутствия публикаций в журнале на эту тему.

В [1] затронут очень широкий круг вопросов, включая перенос энергии в идеальном трансформаторе, предложение перехода от Т-образной схемы замещения трансформатора к 4Т-образной схеме, расчет значений вектора Пойнтинга в пространстве между обмотками трансформатора на основании полученных значений элементов схемы замещения и исследование переходного процесса при внезапном КЗ в его вторичной обмотке. Одновременно в [1] критикуется традиционная теория трансформатора из-за неверных представлений о физических процессах в нем.

Рассмотрим только часть затронутых в [1] проблем, а именно вопрос о физическом понимании процесса переноса энергии в пространстве в идеализированной модели трансформатора, а также принцип построения традиционной теории реального трансформатора, для чего предварительно определимся с понятиями.

**Физическое понимание в электротехнике.** Дать определение физическому пониманию довольно сложно, в [2, с. 28], например, сказано, что это нечто неточное, неопределенное и нематематическое. Но там же говорится, что физика и математика тесно связаны между собой и имеется лишь один точный способ представления законов, полученных (в большинстве случаев) путем обобщения

многочисленных результатов экспериментов, — способ дифференциальных уравнений. В то же время любое конкретное физическое явление может оказаться слишком запутанным и не поддающимся анализу путем решения дифференциальных уравнений. Однако можно получить хорошее представление о поведении системы (физическое понимание), выработав в себе понимание характера решения в различных обстоятельствах (на основании проведения многочисленных натуральных экспериментов или решений при математическом моделировании идеализированных объектов).

В электротехнике под физическим пониманием чаще всего имеют в виду понимание сущности работы исследуемого реального объекта в виде упрощенной модели (системы), отражающей основные свойства объекта, не противоречащей основным законам физики и поддающейся анализу с помощью системы уравнений электродинамики Максвелла (ЭДМ). Такой моделью, например, является идеализированный трансформатор, прохождение потока электромагнитной энергии через который обычно и рассматривают, а полученные результаты позволяют затем качественно с допустимой погрешностью представить себе картину локализации потоков энергии в реальном трансформаторе. Следует, впрочем, заметить, что современная теоретическая электротехника настолько насыщена вычислительными методами, что в ней бывает трудно отделить математические методы от описания физической сущности анализируемого явления [3].

**Идеализированный трансформатор и локализация в нем потока энергии.** Идеальный трансформатор представляет собой систему, в которой связь между магнитным потоком и токами линейна [4, с. 573], значение удельной проводимости электротехнической стали в магнитопроводе принимают равным нулю, активные сопротивления обмоток считают величиной постоянной (или ими пренебрегают), а форму (пространственную геометрию) обмоток и магнитопровода — симметричной. Однако многие авторы при описании идеального трансформатора допускают небрежность (видимо, для краткости изложения), говоря о бесконечных значениях отно-

сительной магнитной проницаемости материала магнитопровода ( $\mu_{\text{СТ}} = \infty$ ), что физически невозможно. При этом подразумевают  $\mu_{\text{СТ}} \gg 1$ , так как здесь нельзя использовать понятие бесконечности, особенно если речь идет о физическом понимании работы трансформатора и вообще о катушках индуктивности с сердечниками из ферромагнетика. В традиционной модели вовсе не исчезает, как сказано в [1], МДС при холостом ходе трансформатора, просто большие значения  $\mu_{\text{СТ}}$  позволяют пренебречь рассеянием магнитного потока  $\Phi$  за пределы магнитной цепи и значениями вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$  в магнетике по сравнению со значениями  $\mathbf{H}$  в остальной части пространства с  $\mu = 1$ . А поступление реактивной энергии из первичной обмотки (и возвращение в другие моменты времени обратно) в область пространства, заполненную магнетиком, при увеличении значений  $\mu_{\text{СТ}}$  становится все меньше, но никогда не достигает нуля.

Нужно также уточнить, что понимать под затратами реактивной мощности. Если считать затратами электромагнитной энергии преобразование ее в другие виды энергии (в данном случае энергию тепловую), то в магнитопроводе идеального трансформатора не происходит преобразования энергии, а есть ее периодическое накопление и обмен с генератором. Преобразование этой части электромагнитной энергии в тепловую происходит в первичной обмотке и в проводниках электрической цепи, в которую она входит. Если сопротивлением этих проводников пренебрегаем, то обмен энергией происходит с генератором, преобразователем механической энергии в электрическую.

Что касается «противоборства» обмоток и сохранения почти неизменной разности их МДС в трансформаторе, то здесь достаточно было в [1] обратиться к понятию обратной связи. Оно известно из теории автоматического регулирования и используется в самых разных областях техники (начиная с регулятора Уатта для паровой машины, тоже преобразователя энергии). И тогда многое стало бы понятнее. Еще А. Пуанкаре отмечал, что если физическое явление согласуется с принципом сохранения энергии и принципом наименьшего действия [5, с.134] (это касается и электродинамических явлений). Следовательно, в части переноса и преобразования электромагнитной энергии возможны аналогии с электромеханикой и радиотехникой, и с этой точки зрения трансформатор можно рассматривать в курсах электрических машин, что обычно и делается.

Перенос энергии между обмотками идеального трансформатора исследован, например, в курсе

ТОЭ [6, с.203], к которому полезно обратиться после ознакомления с [1]. К сожалению, в современных курсах ТОЭ этот вопрос упущен. При анализе работы идеализированного трансформатора можно достичь физического понимания (в указанном выше смысле) работы трансформатора и получить полную картину локализации потока энергии в пространстве между его обмотками. Делается это исходя из принципа локальности закона сохранения энергии [7, с. 285] применительно к электромагнитному полю (в теории поля), в которой и определен вектор Пойнтинга  $\mathbf{\Pi}$ . Мгновенные значения вектора  $\mathbf{\Pi}$  в макроскопических точках пространства равны векторному произведению мгновенных значений напряженностей электрического и магнитного полей, т.е.  $\mathbf{\Pi} = \mathbf{E}' \times \mathbf{H}$ . В более общей форме это выражение следует представить в виде функций от времени  $t$

$$\mathbf{\Pi}(t) = \mathbf{E}(t) \times \mathbf{H}(t). \quad (1)$$

Причем модули векторов  $\mathbf{E}(t)$  и  $\mathbf{H}(t)$  в одних и тех же точках пространства изменяются во времени по синусоидальному закону со сдвигом фаз. Наглядная картина направления вектора  $\mathbf{\Pi}$  в пространстве между обмотками (показано по одному витку), расположенными на противоположных сторонах магнитопровода в виде тора, представлена на рис. 1, взятом из [6]

Наличие симметрии позволило в [6] просто определить вектор  $\mathbf{E}$  (мгновенное значение), вынеся его за знак интеграла в выражении  $\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt}$ , в противном случае задача существенно усложняется. Так же просто удалось определить вектор  $\mathbf{H}$  исходя из закона полного тока и учитывая, что на части пути интегрирования по замкнутому контуру, проходящему через магнетик и диэлектрик (в магнетике  $\mu_{\text{СТ}} \gg 1$ ), значение  $\mathbf{H}$  мало и этой частью можно пренебречь.

Добавим, что весь рассматриваемый поток энергии можно разделить в пространстве на две

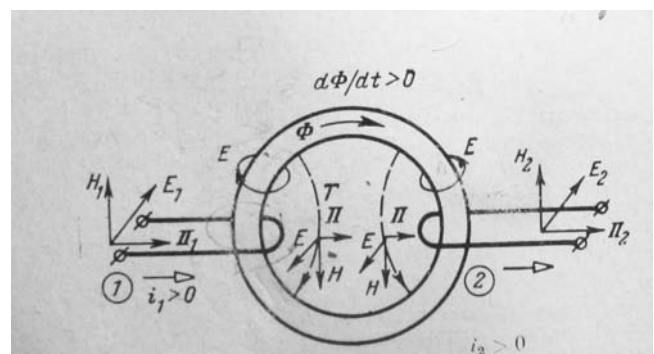


Рис. 1. Направление векторов  $\mathbf{\Pi}$  в точках пространства между обмотками трансформатора

части. Большая его часть (нагрузка активная) поступает из первичной обмотки во вторичную. Меньшая часть потока представляет собой обмен энергией, поступающей в первичную обмотку от источника сторонней ЭДС, с энергией, накапливаемой в магнитном поле (сосредоточенном в основном в магнитопроводе), а коэффициент самоиндукции является мерой своего рода «электромагнитной инерции» тока [8, с. 368].

На рис. 2 показано изменение во времени значений основных величин, характеризующих работу трансформатора, и направление векторов в упомянутых двух потоках энергии в четыре момента времени на периоде синусоидального тока (в трансформаторе с однослойными обмотками на одном стержне). Рис. 2 поможет нагляднее представить картину переноса энергии в броневом трансформаторе, рассмотренном в [1].

Идеальный трансформатор теоретически можно рассматривать в виде двух контуров тока, связанных между собой индукционным взаимодействием и размещенных в однородной среде с  $\mu=1$  [8, с. 371]. При холостом ходе такой трансформатор представляет собой один уединенный контур. При сближении контуров возникает явление взаимной индукции, увеличение которой (количества) приводит к качественному изменению системы. Часть энергии поступает во второй контур (тем больше, чем больше значение коэффициента взаимной индукции) и, если он представляет собой только активную нагрузку, уже не возвращается обратно к первому контуру. Попытка анализа процесса переноса энергии при наличии индуктивной связи между электрическими цепями с использованием понятия векторного потенциала, не прибегая к комплексной форме уравнений Максвелла, предпринята в [9].

Сделано это в связи с тем, что все физические процессы, включая энергетические процессы в трансформаторе, развиваются в пространстве и времени. Часто, используя при анализе работы

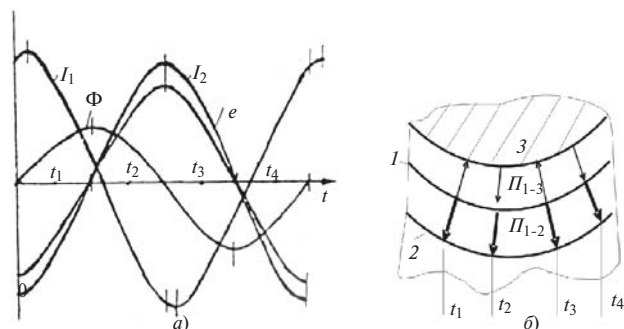


Рис. 2. Изменение во времени тока  $I$ , магнитного потока  $\Phi$  и ЭДС электромагнитной индукции  $e$  в трансформаторе (а) и направление в пространстве вектора  $\Pi$  в четыре характерных момента времени  $t_1 - t_4$  (б): 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – магнитопровод (поперечное сечение)

трансформатора комплексный метод, вводя дополнительно к трем пространственным осям координат и оси времени комплексную плоскость и мнимую ось на ней, можно облегчить расчеты. Но это несколько затеняет, делает менее наглядным физическое понимание исследуемого процесса. Ведь векторы на векторной диаграмме трансформатора это вовсе не векторы типа  $\mathbf{E}$  или  $\mathbf{H}$ , используемые в начальных уравнениях Максвелла и при решении теоремы Умова–Пойнтинга (элементы векторного анализа изложены, например, в [2] и [8]), а часто изображаемый на векторных диаграммах работы нагруженного трансформатора ток холостого хода  $I_0$  является не вектором, а только расчетной величиной, физически несуществующей, есть только токи  $I_1$  и  $I_2$  в обмотках.

В завершении темы переноса энергии в идеальном трансформаторе отметим, что здесь напрашивается любопытное сравнение с излучением энергии рамочной антенной радиопередатчика, где поле вне проводника зависит только от векторного потенциала [10, с. 243], энергия излучается и уходит безвозвратно в дальней зоне от антенны [11, с. 203]. В трансформаторе поле квазистационарное, и процессами в дальней зоне можно пренебречь. Но за счет взаимной индукции с другим замкнутым контуром, расположенном в ближней зоне, энергия также может безвозвратно излучаться из первичной обмотки, но не в разные стороны (в соответствии с диаграммой направленности излучения антенны), а в направлении к другому контуру (с активным сопротивлением). Наблюдается подобие излучению электромагнитной энергии в направляющих системах [7, с. 221], [11, с. 221]. Было бы интересно и поучительно для понимания переноса энергии изобразить картины направлений вектора  $\Pi$  в трехмерном пространстве в разные моменты времени при сближении и изменении взаимной ориентации этих контуров в пространстве и в широком диапазоне изменения частоты тока. Однако это требует большого объема вычислений, поэтому было бы полезно использование компьютерного моделирования [12].

**Традиционная теория реального трансформатора (ТТР).** В современном изложении ТТР представляет собой один из примеров решения многочисленных практических задач инженерами и учеными прикладной науки, прошедшими долгий путь от основных принципов (закон электромагнитной индукции) до практического и экономичного проектирования используемых устройств [7, с. 46].

В ТТР, например в [13] и [14], трансформатор рассматривается в основном в рамках теории электрических и магнитных цепей ТОЭ с использованием ряда допущений и экспериментально полу-

ченных зависимостей (в том числе выходящих за рамки ТОЭ, например расчет механических напряжений и температур), роль которых достаточно велика. Ценность экспериментально полученных формул в том, что, не претендуя на глубокие обобщения, они остаются верными (в тех же условиях) даже при изменении теории, их объясняющей, что отмечал еще Ампер. Например, работа трансформаторов во многом определяется их магнитными полями с большими значениями магнитной индукции  $\mathbf{B}$  в ферромагнетике, из-за нелинейных характеристик которого приходится прибегать к экспериментально полученным зависимостям. При этом можно не вникать в объяснение внутренних причин ферромагнетизма [4, с. 310] (в квантовую механику), хотя это, конечно, ограничивает физическое понимание нами процесса возникновения вторичного (собственного) магнитного поля в веществе.

Трансформатор в целом обычно представляют в виде модели, схемы замещения в виде четырехполюсника, т.е. применяют подход с позиций известного в кибернетике «черного ящика», используемый при затруднениях в построении физической модели изучаемого явления. Однако следует заметить, что такой подход присутствует и в ТОЭ под названием феноменологического (по внешним признакам), когда при решении системы фундаментальных уравнений Максвелла их дополняют материальными уравнениями [4, с. 339], разница только в глубине детализации.

Наилучший вариант при конструировании реального трансформатора (задача синтеза) не может быть найден аналитически, кроме простейших случаев [15, с. 44]. Нужно учесть много факторов: потери от основных, циркулирующих и вихревых токов в проводниках обмоток, потери на перемагничивание ферромагнетика и от вихревых токов в нем, зависимость потерь от температуры и т. д.

Для пояснения принципа работы трансформатора часто используют систему дифференциальных уравнений:

$$u_1 = L_1(di_1/dt) + M(di_2/dt) + i_1 r_1; \quad (2)$$

$$u_2 = L_2(di_2/dt) + M(di_1/dt) + i_2 r_2. \quad (3)$$

Выше сказано о роли дифференциальных уравнений в физическом понимании любого явления. Но обратим внимание, что в уравнениях (2) и (3) присутствует только производная по времени, не принято во внимание изменение значений физических величин от одной точки пространства к другой. А вот в системе уравнений Максвелла (в рамках которой мы хотим получить физическое понимание процесса переноса энергии) присутствуют

частные производные по времени и пространственным осям четырехмерного пространства-времени. Кроме того, значения собственной  $L$  и взаимной  $M$  индуктивностей обмоток в (2) и (3) аналитически определить не удастся. И при конструировании трансформатора с оптимальными параметрами приходится использовать зависимости, в том числе полученные экспериментально, и численные методы решения уравнений.

Перенос энергии в пространстве в ТТР оценивается по конечному результату: по мощности, поступающей в первичную обмотку, мощности, поступающей в электрическую цепь, подключенную к вторичной обмотке, и по мощности потерь в самом трансформаторе ([13, с. 68], более детально в [14, с. 176]). При этом считается, что безвозвратным излучением электромагнитной энергии в цепях квазистационарного переменного тока можно пренебречь, не вдаваясь при этом в подробности, в определение плотности потока электромагнитной энергии (вектора Пойнтинга) в точках пространства от истока до места ее преобразования, полагаясь на курсы физики и ТОЭ, в которых теория трансформатора детально не рассматривается. Поэтому публикация обсуждаемой работы М.А. Шакирова, возможно, придаст новый толчок теоретическим исследованиям в этой области.

Для понимания процесса переноса энергии в трансформаторе полезны и аналогии из электромеханики. Например, трансформатор в режиме холостого хода можно с энергетических позиций сравнить с вращением вала, несущего маховое колесо [8, с. 368]. Также с этих позиций можно найти много общего (не сосредотачиваясь на различии в форме, виде энергии) в переносе и преобразовании энергии в трансформаторе и в индуктивных электрических машинах (особенно в электромашинных преобразователях двигатель-генератор), в основе работы которых лежит тот же закон электромагнитной индукции и действует локальный закон сохранения энергии.

В современных учебниках по электрическим машинам, например [13, 14], нет утверждений, противоречащих физике или ТОЭ, нет ошибок в физическом понимании работы трансформатора (примеры их в [1] отсутствуют). Но у студентов может возникнуть ошибочное представление о переносе и преобразовании энергии из-за недостаточно усвоенных ими курсов физики и ТОЭ, к тому же не во всех учебниках по этим курсам затронута обсуждаемая тема. Ценность работы М.А. Шакирова в том, что она восполняет пробел по данному вопросу между учебниками по электрическим машинам и большинством учебников ТОЭ. Можно приветствовать и введение в [1] тер-

мина «коридор транспортировки мощности» для пространства между обмотками трансформатора, что подчеркивает локализацию большей части потока электромагнитной энергии именно в этой области пространства. Также представляет интерес поэтапный переход от идеализированной модели к модели реального трансформатора, но нужен дополнительный сравнительный анализ с ТТР, а время покажет, будет ли усложненная схема замещения востребована практикой.

**Противоречия в современной физике и ТОЭ с локализацией в пространстве потоков энергии.** В [6] и [1] показано направление вектора Пойнтинга в пространстве между обмотками трансформатора, из чего следует, что поток энергии выходит из проводников первичной обмотки и входит в проводники вторичной обмотки (не меняя направления в пространстве в любой момент времени при условии активной нагрузки, подключенной к вторичной обмотке). А например, от генератора (источника сторонней ЭДС) к первичной обмотке (сосредоточенной нагрузке) поток активной энергии поступает вне проводников двухпроводной линии электропередачи через окружающий их диэлектрик, как утверждается в [7, с.298] и [11, с.146]. Что противоречит одно другому!

Попытка согласовать эти два потока энергии в [16] ошибочна, на что справедливо указано в [1]. В [17, с. 142] согласование потоков не показано, но сказано, что энергия поступает в первичную обмотку через ее внешнюю поверхность (от генератора по воздуху вдоль проводников линии электропередачи, как показано чуть ранее на рис. 3-2) и тут же выходит из первичной обмотки через ту же ее поверхность и проникает в магнитопровод и во вторичную обмотку. Однако такое встречное движение энергии тоже не выдерживает критики. В [6] и [1] это противоречие обойдено молчанием, преподавание, как замечено в [3] (а большинство учебников пишут преподаватели), требует уверенности, а научный поиск беспокойства и сомнений. Фейнманом Р. в [7, с. 298] все же высказано сомнение относительно переноса энергии вне проводника с током проводимости, названо это «сумасшедшей теорией», но оправдано нашим недостаточным физическим пониманием явления.

Поливанов К.М. спустя несколько лет после издания [6] в следующей работе [18, с. 129] приводит доказательство переноса энергии по проводнику электрической цепи квазистационарного тока. Хотя сделано это с помощью математических преобразований готового решения Пойнтинга (1), что вызывает вопросы и для большей убедительности решение следовало бы начать с самой теоремы Умова–Пойнтинга. Локализация потока энергии в

проводнике вполне согласуется с картиной переноса энергии в трансформаторе и может снять упомянутое выше противоречие.

**Выводы.** Публикация работы М.А. Шакирова является полезной, так как в ней затронут важный с точки зрения теории вопрос об углублении физического понимания в рамках ЭДМ работы трансформатора в части локализации потоков энергии в занимаемом им и его электромагнитными полями пространстве, чему в современных курсах физики и ТОЭ не уделяется достаточного внимания.

Что касается локализации потока электроэнергии (от генератора к потребителю) в линии электропередачи при наличии в ней трансформатора, то необходим дополнительный анализ для устранения отмеченного выше противоречия по данному вопросу в современной теории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакиров М.А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформатора. — Электричество, 2014, № 9, с. 52–59 и № 10, с. 53–65.
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм/Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2004, вып. 5, 304 с.
3. Нетушил А.В. Фарадей и проблемы современной теоретической электротехники. — Электричество, 1992, № 4, с. 1–4.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. — М.: Физматлит, 2006, т. 3, 656 с.
5. Пуанкаре А. О науке/Пер. с франц. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983, 560 с.
6. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. — М.: Энергия, 1969, 352 с.
7. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.6: Электродинамика / Пер. с англ. — М.: Едиториал УРСС, 2004, 352 с.
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Физматлит, 2003, 616.
9. Мальгин В.М. Анализ процесса переноса энергии при наличии индуктивной связи между электрическими цепями. — Электрика, 2008, № 2, с. 27–34.
10. Матвеев А.Н. Электродинамика. — М.: Высшая школа, 1980, 383 с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Гардарики, 2003, 317 с.
12. Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля. — Электричество, 2014, № 10, с. 66–71.
13. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины, т. 1. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006, 652 с.
14. Сергеев Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины. Трансформаторы/Под ред. И.П. Копылова. — М.: Высшая школа, 1989, 352 с.
15. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. — М.: Энергия, 1981, 392 с.
16. Лейтес Л.В. Вектор Пойнтинга в реакторе и трансформаторе. — Электричество, 1978, № 7, с. 45–50.

17. **Туровский Я.** Техническая электродинамика. – М.: Энергия, 1974, 498 с.

18. **Поливанов К.М.** Теоретические основы электротехники. Т. 3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1975, 206 с.

*Автор: Малыгин Вячеслав Михайлович окончил в 1966 г. Московский институт инженеров же-*

*лезнодорожного транспорта. В 1987 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию «Диагностирование подшипниковых узлов высокоскоростных электрических машин». Начальник лаборатории НИИ электромеханики, г. Истра.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 4, pp. 60–66.*

## Location of the Energy Flux in the Transformer

(by M.A. Shakariav article, «Electricity», 2014, Nos 9, 10)

V.M. MALYGIN

### REFERENCES

1. **Shakirov M.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 9, pp. 52–59.

2. **Feinman R., Leiton R., Sands M.** *Feinmanovskiyе lektsii po fizike. Vyp. 5. Elektrichestvo i magnetizm/Per. s angl.* (Feinman lectures on physics. Iss. 5. Electricity and magnetism/Transl. from English). Moscow, Publ. Editorial URSS, 2004, 304 p.

3. **Netushil A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1992, No. 4, pp. 1–4.

4. **Sivukhin D.V.** *Obshchii kurs fiziki. T. 3. Elektrichestvo* (General course of physics. Vol. 3. Electricity). Moscow, Publ. Fizmatlit, 2006, 656 p.

5. **Puankare A.** *O nauke/Per. s frants.* (On science/Transl. from French.). Moscow, Publ. Nauka, 1983, 560 p.

6. **Polivanov K.M.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Chast' 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* (Theoretical principles of electrical engineering. Part. 3. Theory of electromagnetic field). Moscow, Publ. Energiya, 1969, 352 p.

7. **Feinman R., Leiton R., Sands M.** *Feinmanovskiyе lektsii po fizike. Vyp. 6. Elektrodinamika/Per. s angl.* (Feinman lectures on physics. Iss. 6. Electrodynamics/Transl. from English). Moscow, Publ. Editorial URSS, 2004, 352 p.

8. **Tamm I.E.** *Osnovy teorii elektrichestva* (Foundations of the theory of electricity). Moscow, Publ. Fizmatlit, 2003, 616 p.

9. **Malygin V.M.** *Elektrika – in Russ. (Electrica)*, 2008, No. 2, pp. 27–34.

10. **Matveyev A.N.** *Elektrodinamika* (Electrodynamics). Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1980, 383 p.

11. **Bessonov L.A.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoye pole* (Theoretical principles of electrical engineering. Electromagnetic field). Moscow, Publ. Gardariki,, 2003, 317 p.

12. **Butyrin P.A., Dubitskii A.D., Korovkin N.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 10, pp. 66–71.

13. **Ivanov-Smolenskii A.V.** *Elektricheskiye mashiny, t. 1* (Electrical machines, vol. 1). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2006, 652 p.

14. **Sergeyevkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A.** *Elektricheskiye mashiny. Transformatory/Pod red. I.P. Kopylova* (Electrical machines. Transformers. Edit. by I.P. Ropylov. Moscow, Publ. Vyaahaya shkola, 1989, 352 p.

15. **Leites L.V.** *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* (Electromagnetic calculations of transformers and reactors). Moscow, Publ. Energiya, 1981, 392 p.

16. **Leites L.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1978, No. 7, pp. 45–50.

17. **Turovskii Ya.** *Tekhnicheskaya elektrodinamika* (Technical electrodynamics). Moscow, Publ. Energiya, 1974, 498 p.

18. **Polivanov K.M.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. T. 3. Teoriya elektromagnitnogo polya* (Theoretical principles of electrical engineering. Vol. 3. Theory of electromagnetic field). Moscow, Publ. Energiya, 1975, 206 p.

*Author: Malygin Vyacheslav Mikhailovich (Istra, Moscow oblast, Russia) – Cand. Sci (Eng.). Head of the Laboratory of the Electromechanics and Research Institute (Istra, Moscow oblast).*

