

УДК 621.314.21

Инновационный подход к построению теории силовых трансформаторов

М. А. Шакиров, **А. А. Ткачук**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шакиров М. А., Ткачук А. А. Инновационный подход к построению теории силовых трансформаторов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 3. — С. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-7-23

Аннотация

Цель: Поставлена задача о перестройке учения о трансформаторах вследствие несостоятельности практически всех положений традиционной теории. Показано, что наряду с установленной в прошлом веке надуманностью понятий о отдельных магнитных потоках рассеяния обмоток таковыми же следует признать и считающиеся незыблемыми суждения о *главном* или *рабочем* потоке в магнитопроводе трансформатора и якобы создающим его *токе намагничивания*, или *МДС намагничивания*. **Методы:** Для доказательства проведен анализ заблуждений, допускаемых в современных учебниках при анализе ключевых тем по распределению магнитных потоков в трансформаторах, включая случаи коротких замыканий. **Результаты:** Исходя из этого, сделан вывод о недопустимости излагаемого в них объяснения работы трансформаторов, как основанного на физически несуществующих величинах и понятиях. Предлагается дополнить идею о передаче энергии от обмотки к обмотке через зазор между ними процедурами наращивания вектора Пойнтинга в первичной обмотке и, после прохождения зазора, последующей его релаксации во вторичной обмотке при передаче мощности в нагрузку. Показано отображение каждого из этих этапов на 4Т-образной схеме замещения, позволяющей одновременно с электрическими величинами анализировать распределение магнитных потоков в отдельных участках как в окне, так и в магнитопроводе трансформатора. **Практическая значимость:** Представлены новые свойства в поведении трансформаторов, в том числе в режиме короткого замыкания.

Ключевые слова: Трансформатор, первичная и вторичная обмотки, магнитный поток, схема замещения, короткое замыкание, холостой ход, ток намагничивания, векторная диаграмма.

Введение

Высокий уровень аварийности трансформаторного оборудования в мире вынуждает электроэнергетические организации, в том числе такие, как международное объединение CIGRE, все внимательнее относиться к обмену опытом по диагностике силовых трансформаторов [1]. Объяснение причины аварии трансформатора зависит от понимания физических процессов в нем, включая принцип его действия. Несмотря на первостепенное значение этой темы, она находится в неопределенном состоянии, которое установилось в результате использования сомнительных понятий о магнитных потоках *рассеяния* обмоток и *общем (главном, рабочем)* потоке в магнитопроводе трансформатора. Корректность этих понятий обсуждалась во многих работах начала прошлого века, итогом которых явилось заключение — «общепринятый способ описания рабочего процесса трансформатора, приписывающий только общему потоку ... роль передатчика энергии, **неправилен**» [2]. При этом имеет место абсурдная ситуация, поскольку официальная теория с ее, по словам из [2] и др., «физически **несуществующими** слагающими ... поля **рассеяния**» продолжает жить и внедряться во все учебники по сей день. На этот парадокс имеется весьма противоречивый ответ автора [2], поместившего в своей книге следующую нескладницу: «Несмотря на предыдущие выводы, введение понятия (**несуществующего** — (!)) магнитного рассеяния играет полезную роль, так как позволяет наглядно представить (**неправильный** — (!)) рабочий процесс трансформатора». Эта несуразность лежит в основе современной теории трансформаторов.

Причин такого положения несколько:

1. Давление авторитетов, принимающих (подобно верованиям) факт повторения основ стандартной теории в каждом последующем поколении учебников как подтверждение ее достоверности.

2. Подгонка под эту теорию идеи о передаче мощности в окне трансформатора от обмотки к обмотке с помощью вектора Пойнтинга. В частности, автор [3, р. 66] утверждает: «For a finite permeability, some of the power flow occurs into and through the iron». Автор [4, с. 182] также представил мистическую картину о передаче энергии «основным потоком» в результате якобы его «временного пересечения воздушного зазора между обмотками». Также ирреальной, как отмечено в [5], является картина со «спиральной» траекторией вектора Пойнтинга, представленная в [6]. В результате отождествления этой важнейшей идеи с традиционной в подавляющем числе учебников о ней не упоминается вовсе.

3. Табу (строгий запрет) на возможность рассмотрения работы трансформатора с наилучшим магнитопроводом, сталь которого характеризуется бесконечно большой магнитной проницаемостью [5]. В магнитопроводе такого

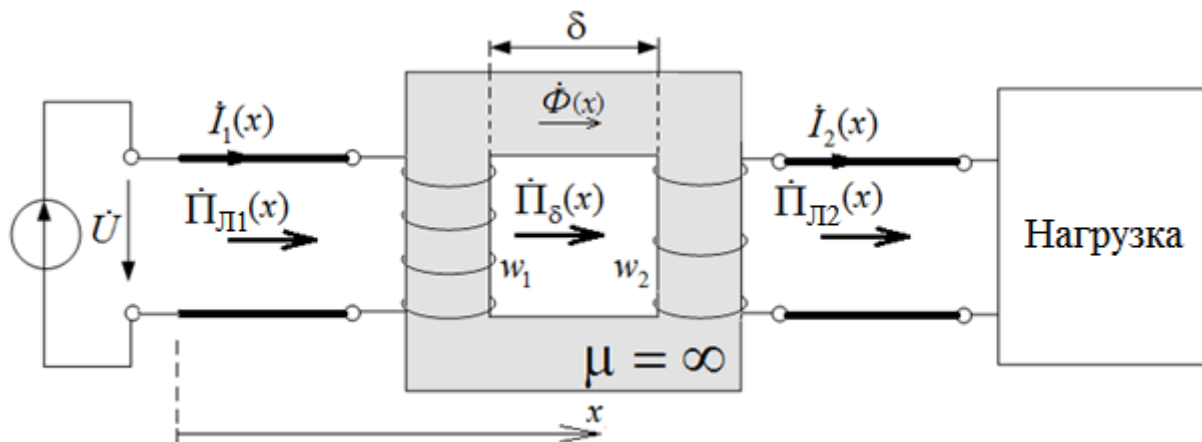


Рис. 1. Передача мощности через трансформатор

трансформатора напряженность магнитного поля равна нулю, и, согласно закону полного тока, в любой момент времени суммарная МДС обмоток (ее называют *МДС намагничивания*) равна нулю. Поскольку считается, что эта МДС якобы создает *общий рабочий* магнитный поток, то, по версии современных учебников, выходит, что трансформатор с наилучшей сталью работать не сможет (!).

Описанная ситуация требует не только подтвердить физическую несостоятельность исходных положений существующей теории, но и показать, к каким конкретно ошибкам они привели в известных учебниках и, следовательно, их опасность для трансформаторостроения в целом. Преследуется также цель ослабить уровень настороженности со стороны инженеров к новым идеям и открытиям в теории трансформаторов, изложенных частично в дискуссионных работах автора [7] и в настоящей работе.

Паразитный ток в трансформаторе. Для синусоидальных режимов пользуются векторами напряженности полей в комплексной форме $\dot{\mathbf{E}}$ и $\dot{\mathbf{H}}$ и комплексным вектором Пойнтинга:

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\mathbf{E}} \times \mathbf{H}^*.$$

Этот вектор позволяет наглядно отобразить движение электромагнитной энергии вдоль идеальных линий передач, т. е. линий без потерь активной мощности в проводах и трансформаторах с идеализированными магнитопроводами, характеризующимся магнитной проницаемостью стали $\mu = \infty$ (рис. 1). В картине движения энергии нет места «*току намагничивания \dot{I}_0* », поскольку в идеализированном трансформаторе ток холостого хода равен нулю, и в любом режиме в нем выполняется условие:

$$w_1 \dot{I}_1 = w_2 \dot{I}_2.$$

Передача энергии в δ -промежутке между обмотками осуществляется через вектор Пойнтинга $\dot{\mathbf{P}}_\delta$ электромагнитного поля, описываемого векторами напряженности $\dot{\mathbf{E}}_\delta$ и $\dot{\mathbf{H}}_\delta$. Ток \dot{I}_0 возникает в случае неидеальной стали ($\mu \neq \infty$), в том числе и в режиме х.х. В этом случае появляются и составляющие вектора Пойнтинга $\dot{\mathbf{P}}_{Fe}$ в направлении магнитопровода на покрытие активных и реактивных потерь мощности в нем. Из этих простых рассуждений вытекает, что ток \dot{I}_0 , как обусловленный потерями энергии в магнитопроводе, ведет себя как *паразитный ток (ток утечки) из-за некачественной стали, а вовсе не как причина намагничивания стали*. Отчетливо проявляются смысл и выгода использования магнитопровода с более высокой магнитной проницаемостью стали по ориентированию движения как можно большего потока энергии от обмотки к обмотке за счет сведения к минимуму (в пределе к нулю) теряемого потока энергии в магнитопроводе. Как будет показано, в разных частях магнитопровода могут протекать разные магнитные потоки, смещенные друг относительно друга по фазе, что делает еще более сомнительным утверждение о якобы возникновении хотя бы одного из них благодаря току намагничивания.

Падение магнитного напряжения в магнитопроводе

С утратой первоначального смысла тока намагничивания \dot{I}_0 изменяется и содержание величины

$$w_1 \dot{I}_0 = w_1 \dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_2,$$

принимающей вместо статуса магнитодвижущей силы (как причины движения основного потока) роль показателя некачественности стали в виде возникающих из-за этого падений магнитных напряжений. Каждый k -й участок такой стали характеризуется комплексным магнитным сопротивлением Z_k^M . При прохождении магнитного потока $\dot{\Phi}_k$ в k -м участке *такой* стали возникает падение магнитного напряжения $Z_k^M \dot{\Phi}_k$. Согласно закону полного тока сумма этих падений магнитных напряжений вдоль контура магнитопровода должна равняться $w_1 \dot{I}_0$. Так, для примера на рис. 2 в случае, когда магнитная проницаемость стали $\mu \neq \infty$, имеем:

$$w_1 \dot{I}_0 = Z_a^M \dot{\Phi}_a + Z_y^M \dot{\Phi}_y + Z_b^M \dot{\Phi}_b.$$

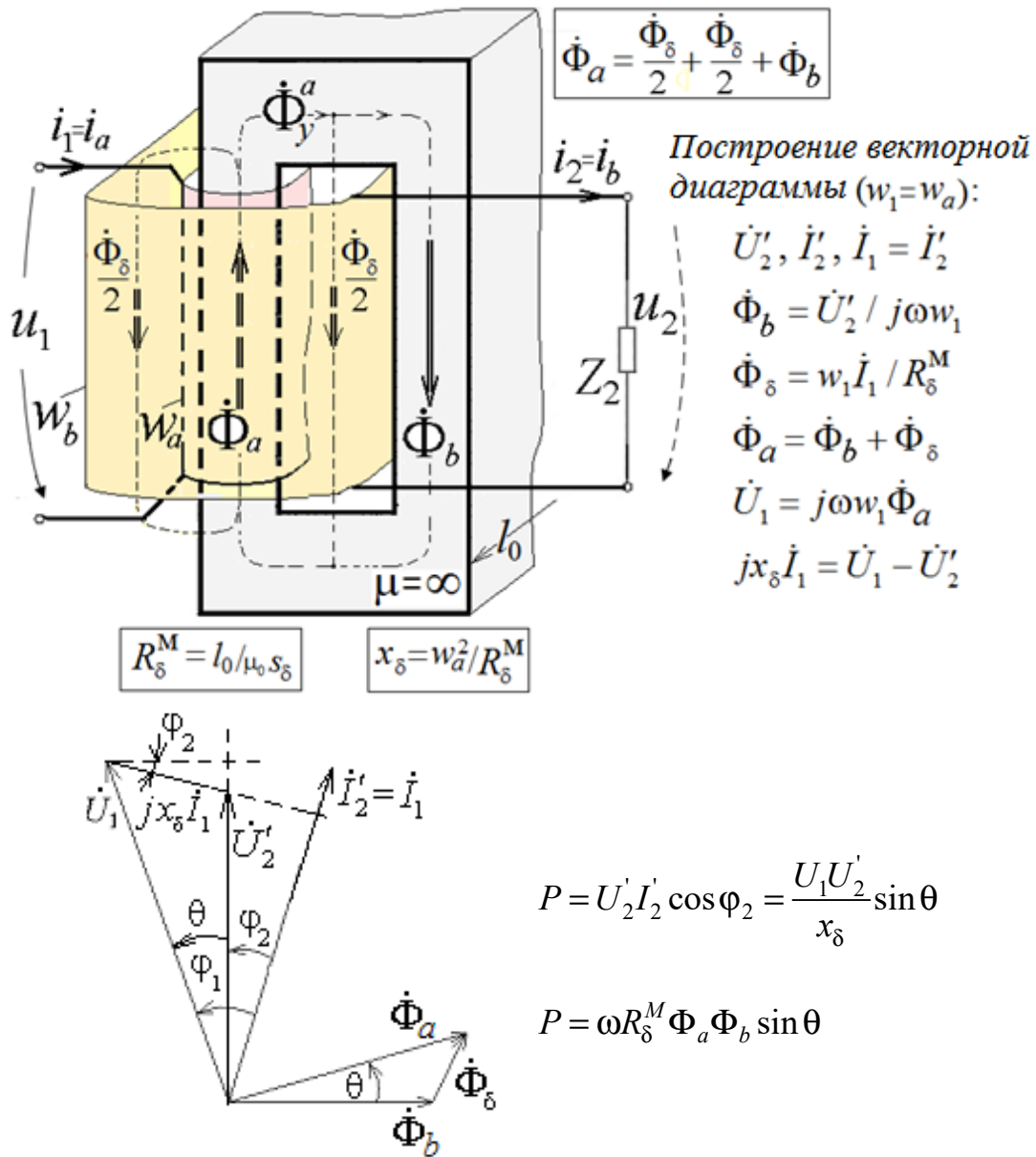


Рис. 2. Идеализированный стержневой трансформатор с тонкими обмотками и его векторная диаграмма при $\mu_{steel} = \mu = \infty$

В идеализированном же трансформаторе ($\mu = \infty$) все $Z_k^M = 0$ и $w_1 \dot{I}_0 \rightarrow 0$. Для этого случая на рис. 2 представлена последовательность уравнений для построения векторной диаграммы, из которой вытекают выводы, не совместимые с положениями существующей теории (использованы обозначения: δ — расстояние между обмотками и s_δ — площадь сечения):

– потоки в стержнях не равны друг другу ($\dot{\Phi}_a \neq \dot{\Phi}_b$); они не совпадают и по фазе; *общего* магнитного потока $\dot{\Phi}_0$ не существует;

– в случае тонких обмоток условием передачи активной мощности P является наличие угла θ между потоками стержней $\dot{\Phi}_a$ и $\dot{\Phi}_b$.

Возникает вопрос: если не *МДС намагничивания*, то что является той реальной силой, которая приводит к возникновению магнитных потоков в трансформаторе?

Причины возникновения магнитных потоков в трансформаторе

В устройствах постоянного тока магнитные потоки и токи неразделимо сопутствуют друг другу, но принято считать, что именно ток играет намагничивающую роль, создавая магнитный поток. В основе расчетов этих потоков лежит закон полного тока; причина их возникновения — *МДС намагничивания постоянного тока*.

Однако на переменном токе при расчетах потоков необходимо брать во внимание и закон электромагнитной индукции. При этом в некоторых случаях в качестве непосредственной причины их возникновения приходится принимать не МДС, а *электрическое напряжение*. Для примера на рис. 3 представлены три соленоидальные катушки высотой h и площадью поперечного сечения s с разными материалами сердечников, находящиеся под одинаковым электрическим напряжением \dot{U}_0 . При нулевом значении активного сопротивления катушек ($R = 0$) все три случая характеризуются одним и тем же уравнением:

$$\dot{U}_0 = R\dot{I} + j\omega\dot{\Psi}_0,$$

из которого следует, что независимо от свойств сердечника потокосцепление $\dot{\Psi}_0 = w\dot{\Phi}_0$ определяется исключительно значением приложенного напряжения \dot{U}_0 , которое, следовательно, выступает в роли причины намагничивания сердечника и в этом смысле может быть условно названо *электрическим намагничивающим напряжением*. Это распространяется и на случаи катушек с сердечниками с нелинейными характеристиками и потерями на гистерезис и вихревые токи; при этом, конечно, периодические токи в таких катушках будут несинусоидальными. Во всех случаях первичной магнитной величиной оказывается магнитный поток $\dot{\Phi}_0$, тогда как величина $w\dot{I}$ — вторичной, отображая собой *падение магнитного напряжения*:

$$\dot{U}^M = R^M\dot{\Phi}_0 \rightarrow w\dot{I},$$

где $R^M = h / \mu s$ — магнитное сопротивление сердечника. При $\mu = \infty$ значение $R^M = 0$ и падение магнитного напряжения $\dot{U}^M = w\dot{I} \rightarrow 0$; также и ток в этом случае $\dot{I} \rightarrow 0$, а поток $\dot{\Phi}_0$ такой же, как и в случае сердечников с $\mu \neq \infty$ (рис. 3).

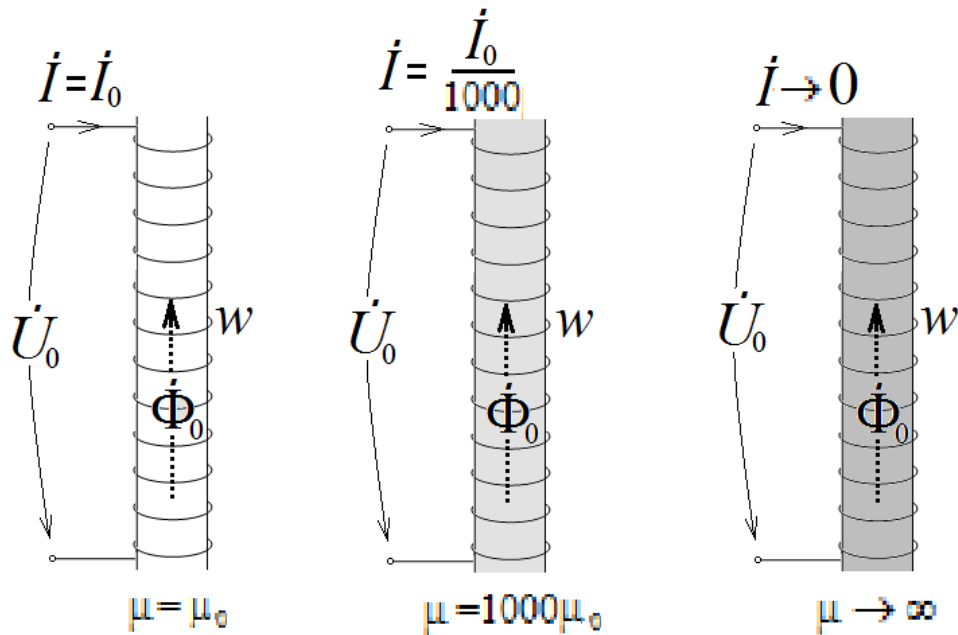


Рис. 3. Электрическое напряжение намагничивания \dot{U}_0

Переходя к трансформатору с $\mu = \infty$ (рис. 2), получаем ясный ответ на причину возникновения всех потоков в нем, в роли которой выступают два намагничивающих электрических напряжения: *независимое намагничивающее напряжение* \dot{U}_1 или соответствующее ему независимое потокосцепление:

$$\dot{\Psi}_a = \dot{U}_1 / j\omega,$$

зависимое намагничивающее напряжение $U_2' = Z_2' I_2'$ или соответствующее ему *зависимое* потокосцепление:

$$\dot{\Psi}_b' = \frac{U_2'}{j\omega} = \frac{Z_2' I_2'}{j\omega}.$$

Замечание 1. На языке магнитных цепей в качестве причины намагничивания сердечников (рис. 3) следует принять величину $w\dot{J}_0^\mu$, где \dot{J}_0^μ — *магнитный ток*:

$$\dot{J}_0^\mu = j\omega\dot{\Phi}_0 \rightarrow \frac{\dot{U}_0}{w}.$$

Понятие «магнитный ток» введено Оливером Хевисайдом [8]. Поскольку эта величина детерминирована, то она играет роль *источника магнитного тока*, который, следовательно, и определяет картину полей в катушках (рис. 3). Как показано

в [8], расчет магнитных цепей с применением понятия «магнитный ток» требует использование схемных моделей, содержащих так называемые *магнитные емкости*, что непривычно для инженеров.

Замечание 2. На языке уравнений Максвелла намагничивающая миссия напряжения \dot{U}_1 при $\mu = \infty$ трансформатора (рис. 2) проявляется через каждый виток a -обмотки. Если длина витка l , то для каждого из них справедливо уравнение:

$$\oint \dot{E} dl = \dot{E}_a l = \frac{\dot{U}_1}{w_a}, \dot{E}_a = \frac{\dot{U}_1}{w_a l},$$

где \dot{E}_a — напряженность электрического поля вдоль витка. Величина \dot{U}_1 / w_a есть *распределенное* по виткам a -обмотки первичное напряжение. Поскольку виток является сверхпроводящим (проводимость $\gamma \rightarrow \infty$), то $\gamma \dot{E}_a \rightarrow \infty$. Такой виток имеет нулевое поперечное сечение ($s_0 \rightarrow 0$), так что ток в нем характеризуется соотношением неопределенности:

$$\dot{I}_a = (\gamma \dot{E}_a) s_0 \rightarrow \infty \cdot 0,$$

которая разрешается внешними условиями, в полной мере отраженными уравнениями и векторной диаграммой (рис. 2). Имея в виду причинно-следственную связь, для данного случая закон электромагнитной индукции целесообразно записать в *обратном* порядке, т. е. в форме:

$$j\omega \dot{\Phi}_a = -\dot{E}_a l,$$

показывающей, что причиной потока $\dot{\Phi}_a$ являются намагничивающие вихри:

$$\dot{E}_a l = \dot{U}_1 / w_a,$$

через которые проявляется *намагничивающее действие электрического напряжения* первичной обмотки трансформатора (рис. 2). При этом используется обратная формулировка закона электромагнитной индукции: не изменение потока порождает ЭДС витка, а, наоборот, колебание ЭДС витка порождает магнитный поток внутри него.

Что такое антипотoki при коротком замыкании и почему они были неизвестны?

Во многих учебниках утверждается, что при коротком замыкании (к.з.) вторичной обмотки магнитопровод трансформатора размагничивается, т. е. в магнито-

проводе протекает магнитный поток, существенно меньший потока х.х. Пример простейшего трансформатора (рис. 2) показывает, что это не так. Из уравнений, приведенных на рис. 2, вытекает, что при к.з., т. е. при $U_2' = 0$, имеем (индекс *sh* от слов *short circuit* — короткое замыкание):

$$\dot{\Phi}_a^{sh} = \Phi_\delta^{sh} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega W_1}, \dot{\Phi}_b^{sh} = 0,$$

и, следовательно, в одной части магнитопровода в режиме к.з. поток $\dot{\Phi}^{sh}$ равен потоку х.х., а в другой — нулю. В общем случае при конечных толщинах обмоток потоки могут превышать поток х.х. или оказаться направленными против него [7]. В связи с этим, как и в [7], будем поток, превышающий поток х.х., называть *сверхпотоком*, а поток, встречный ему, — *антипотоком*. Со сверхпотоком при к.з. мы встречаемся, в частности, в учебнике [9, с. 22], в котором со ссылкой на экспериментальные данные приводится следующий текст: «In case of short circuit ... when the outer winding is supplied, the flux in core limb may drop to 5 or to 15 % of its no load value. In the case of supplying the inner winding the flux is rise to 105 to 115 % of no load value». Эскиз распределения магнитных потоков для первого случая со ссылкой на авторитеты W. Sauer и E. C. Cherry, а также работу [10] представлен на рис. 4, а. Он представлен зачеркнутым как ошибочный, поскольку в нем отсутствует антипоток. Его исправление (отмечено на рис. 4, б пунктиром), согласованное с положениями новой теории [7], подтверждается численными расчетами полей (рис. 4, в).

Аналогичная ошибка в учебнике [9] и ее исправление для случая, когда первичной является внутренняя обмотка, иллюстрируется на рис. 5. Экспериментальные подтверждения явления возникновения пары сверх- и антипотоков при к.з. иллюстрируются на моделях трансформаторов, созданных для студенческих лабораторных работ [11]. Это явление можно принять в качестве еще одного подтверждения мифичности понятия о токе намагничивания в электромагнитных устройствах переменного тока, поскольку в противном случае ему пришлось бы придать особое свойство создавать одновременно два взаимно противоположно направленных потока в магнитопроводе.

Замечание 3. Важно иметь в виду, что антипоток замыкается внутри короткозамкнутой обмотки, т. е. линия раздела потоков при к.з. проходит не в промежутке между обмотками, а внутри короткозамкнутой обмотки (см. рис. 5, в). Этот факт разрушает утверждение о якобы связи картин магнитного поля при к.з. трансформатора с его режимом *противовключения* — еще один миф, созданный В. Роговским в 1909 г. и поддерживаемый в некоторых учебниках [6, 12].

Некорректные картины полей. Догмат об *общем* потоке ставит авторов учебников в условия, когда они ради него вынуждены идти на нарушение правил

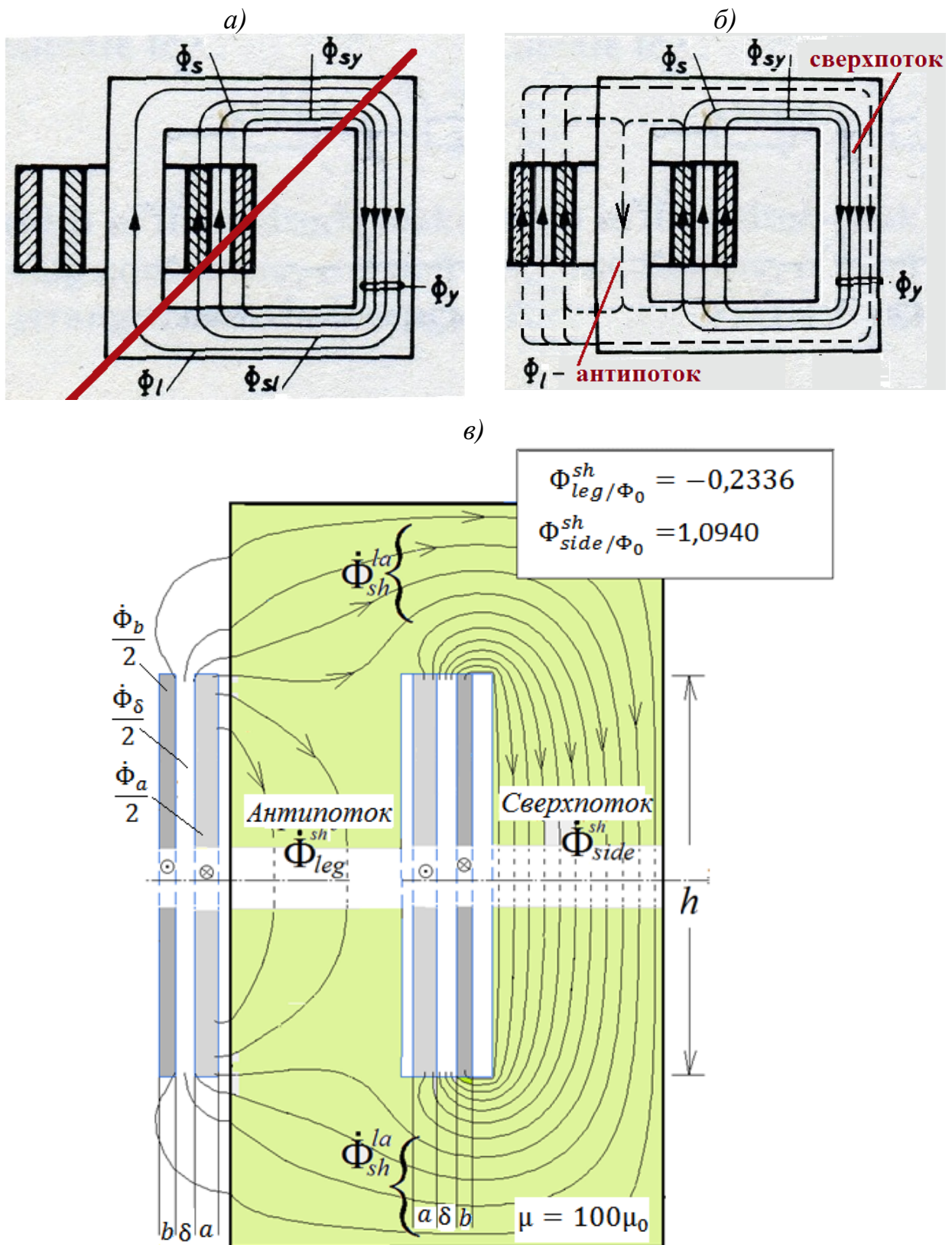


Рис. 4. Ошибочный эскиз распределения магнитных потоков в трансформаторе при короткозамкнутой внешней обмотке (а), его исправленный вариант (б) и реальная картина магнитного поля (в)

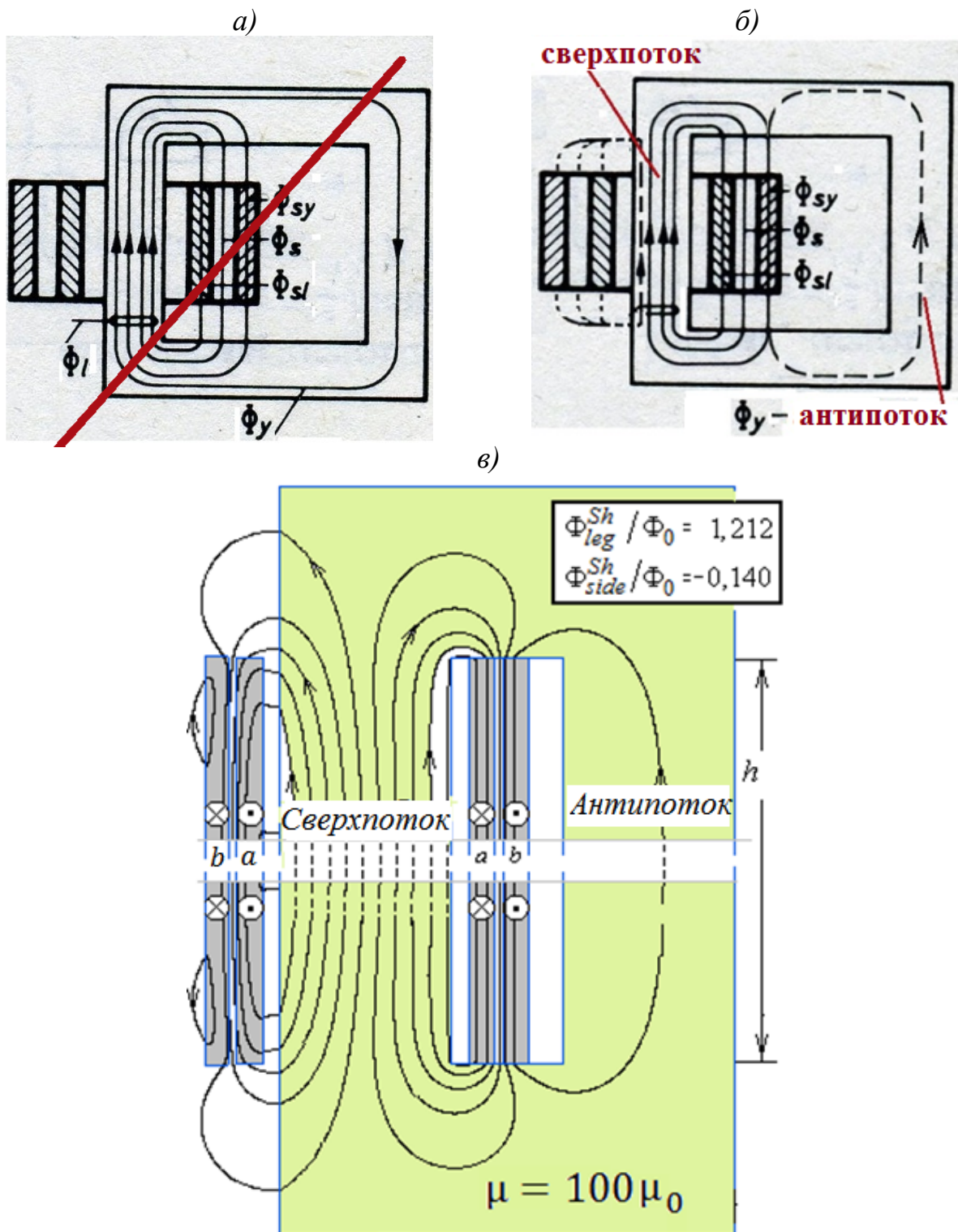


Рис. 5. Ошибочный эскиз распределения магнитных потоков в трансформаторе при короткозамкнутой внутренней обмотке (а), его исправленный вариант (б) и реальная картина магнитного поля (в)

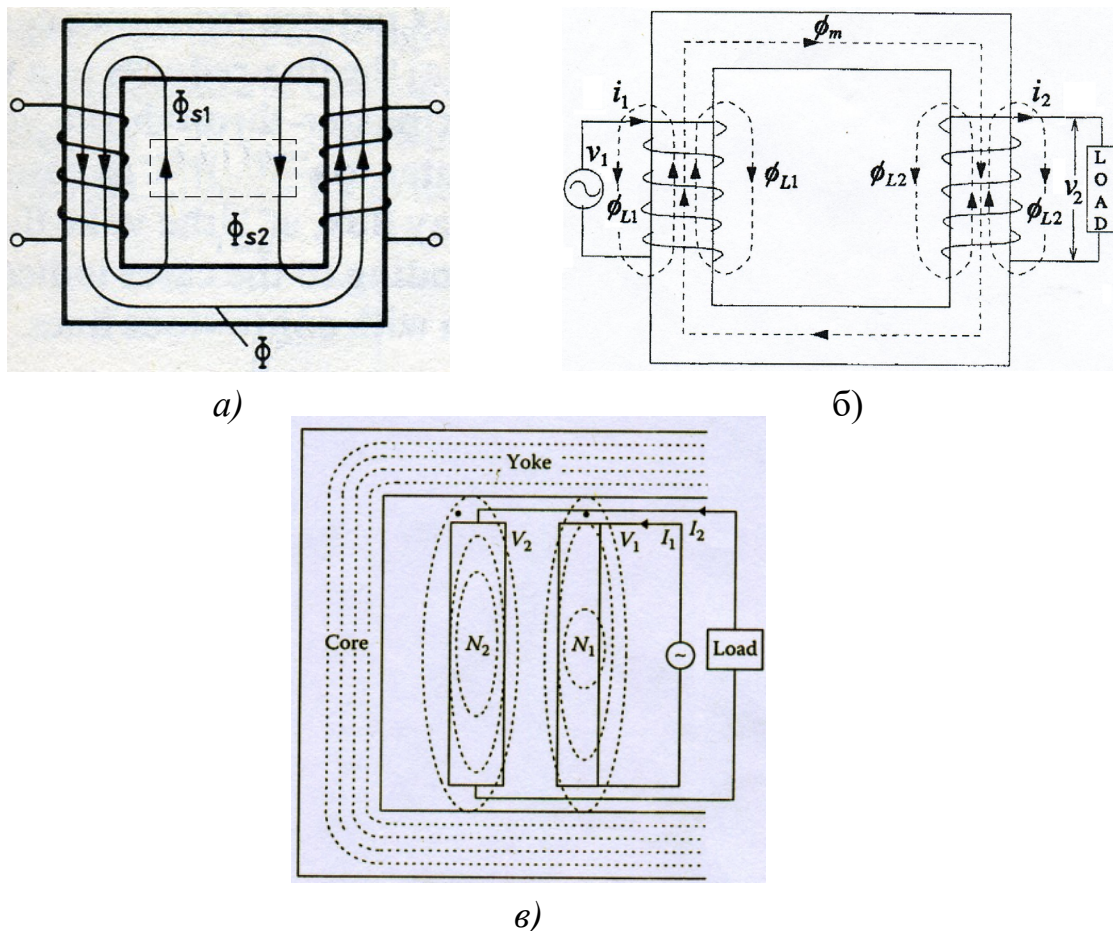


Рис. 6. Примеры некорректных эскизов изображения магнитных полей в учебниках [9, с. 25] (а), в [13, с. 15] (б) и в [14, с. 53] (в)

изображения магнитных полей (рис. 6). Некорректность поля на рис. 6, а состоит в соседстве линий индукции с взаимно противоположными направлениями в промежутке между обмотками, что возможно при наличии в этом промежутке проводника с током, которого в действительности нет (!). На рис. 6, б та же ошибка имеет место в стали правого стержня. При этом обе картины противоречат друг другу в изображении полей в окне трансформатора (!). Видимо, чтобы избежать эти недоразумения, авторы учебника [14] представили сверхпримитивный эскиз (рис. 6, в), не показав направлений линий поля, что лишено методологического содержания.

Новый подход к построению теории трансформаторов

Явление возникновения пары сверх- и антипотоков при к.з., разрушая основы официальной теории, требует ее полной замены при новом толковании принципа действия трансформатора. Суть этого толкования заключается в учете того, что

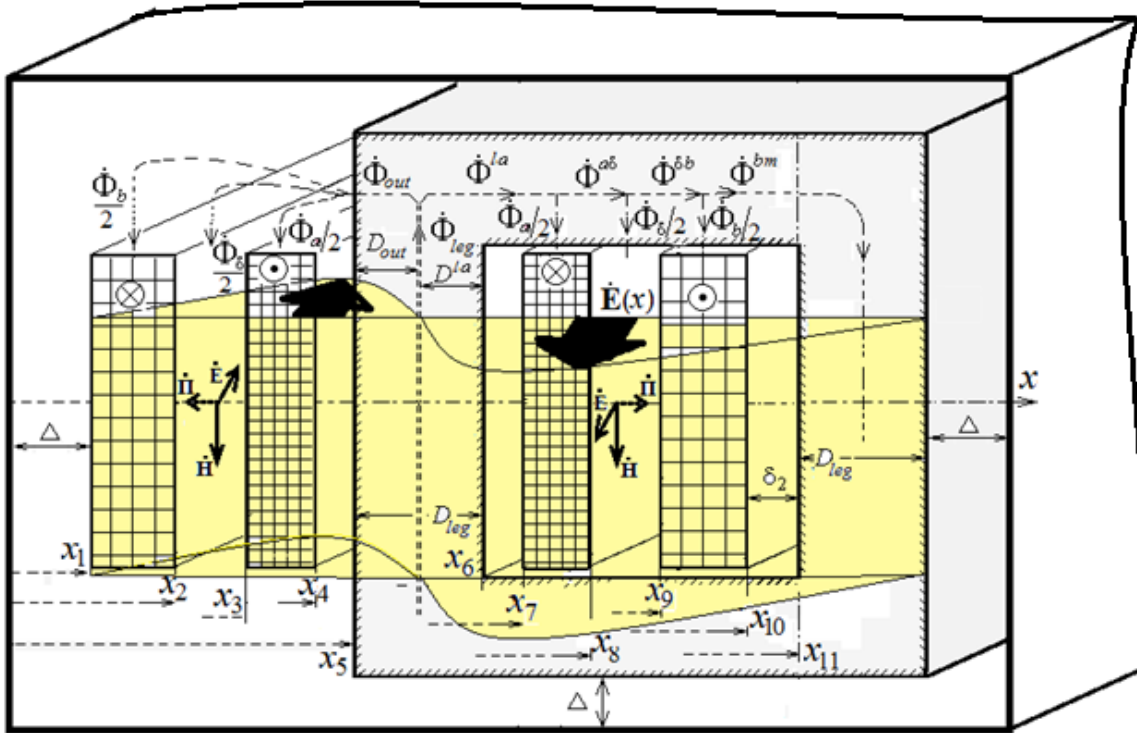


Рис. 7. Электрическое поле в идеализированном стержневом трансформаторе при реактивной нагрузке

магнитное поле в трансформаторе существует неразрывно в паре с вихревым электрическим полем \vec{E} (рис. 7) или, условно, *электрическим торнадо* в смысле его *всепроницающего* свойства: оно существует не только в промежутке между обмотками, но в толще самих обмоток и в теле стержня и бокового ярма магнитопровода. Не следует рассматривать потоки в толще обмоток как потоки рассеяния, т. е. вредные, поскольку они играют ключевую роль в формировании потока энергии в трансформаторе. В толще первичной обмотки происходит наращивание вектора Пойнтинга, а в толще вторичной — его релаксация при отдаче энергии в нагрузку.

Корректное использование вектора Пойнтинга приводит к 4Т-образной схеме замещения (рис. 8), в которой явно отображаются потоки в трансформаторе. По ней могут быть рассчитаны потоки как в стали, так и в окне трансформатора, в том числе и сверх- и антипотоки при к.з. любой из обмоток. Наращивание вектора Пойнтинга в толще первичной *a*-обмотки отображается продольной индуктивностью L_a , его продвижение через δ -промежуток — индуктивностью L_δ , а его убывание в толще вторичной *b*-обмотки — индуктивностью L'_b . Их сумма равна индуктивности к.з.:

$$L_{sh} = L_a + L_\delta + L'_b = \frac{\mu_0 w_a^2}{h} \cdot 2l_0 \left(\frac{a}{3} + \delta + \frac{b}{3} \right),$$

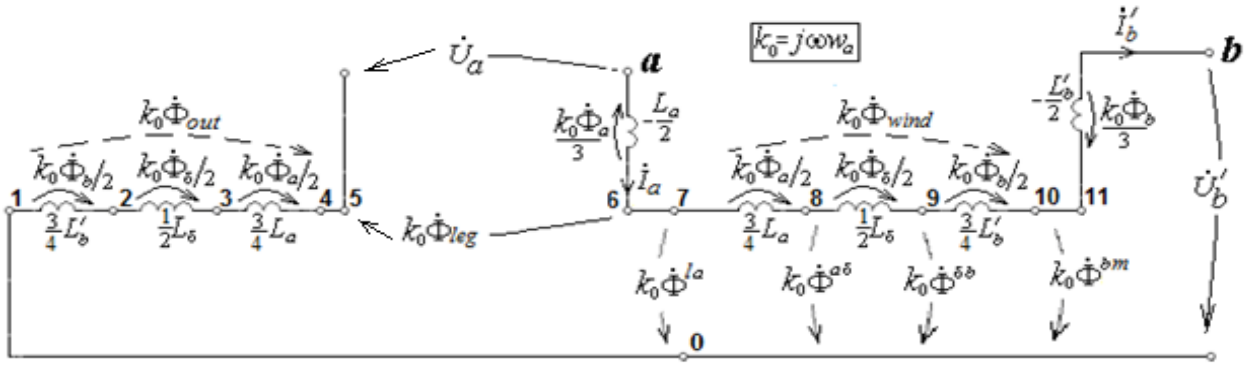


Рис. 8. 4Т-образная схема замещения идеализированного трансформатора

где h — высота обмотки, принятая здесь равной высоте окна. Величины L_a , L_δ и L'_b , как имеющие смысл индуктивностей *продвижения* (проталкивания) электромагнитной энергии в окне от первичной обмотки ко вторичной, следует называть *пойнтинговыми* индуктивностями (а не индуктивностями рассеяния).

4Т-образная схема замещения для реального трансформатора отличается наличием четырех поперечных ветвей «намагничивания» для учета потерь в стали в соответствующих участках магнитопровода. Более точно эти поперечные ветви отображают падение магнитного напряжения в участках магнитопровода при протекании в них потоков $\dot{\Phi}^{la}$, $\dot{\Phi}^{a\delta}$, $\dot{\Phi}^{\delta b}$ и $\dot{\Phi}^{bm}$.

В результате весьма грубого упрощения из 4Т-образной схемы могут быть получены известные Т- и П-образные модели и определено их место в теории и практике анализа электроэнергетических систем.

Заключение

Явление возникновения пары сверх- и антипотоков в трансформаторе показывает, что компромисс между традиционной и новой его теориями невозможен. В официальной теории заложены догмы, не дающие ей развиваться, на что указывают очевидные нестыковки, регулярно подмечавшиеся многими авторами на протяжении всего прошлого столетия. В отличие от нее, новая теория построена не на домыслах и сомнительных уравнениях, а на легко проверяемых физико-математических положениях и корректном использовании весьма убедительной идеи описания движения энергии в трансформаторе через вектор Пойнтинга, что в конечном итоге и привело к новым открытиям, в том числе явления возникновения антипотока при к.з., реальность которого подтверждена физическими и численными экспериментами.

Библиографический список

1. Ларин В. С. Вопросы трансформаторостроения на коллоквиуме исследовательского комитета А2 СИГРЭ в 2019 г. / В. С. Ларин // *Электричество*. — 2020. — № 11. — С. 60–66.
2. Марквардт Е. Г. Электромагнитные расчеты трансформаторов / Е. Г. Марквардт. — М.; Л.: ГОНТИ, Редакция энергетической литературы, 1938. — 136 с.
3. Seely S. *Electromechanical energy conversion* / S. Selly. — New York: McGraw-Hill Book Company, 1962. — 336 p.
4. Брон О. Б. Электромагнитное поле как вид материи / О. Б. Брон. — М.; Л.: ГЭИ, 1962. — 260 с.
5. Малыгин В. М. Локализация потока энергии в трансформаторе / В. М. Малыгин // *Электричество*. — 2015. — № 4. — С. 60–65.
6. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. — М.: Энергия, 1981. — 392 с.
7. Шакиров М. А. Схема замещения и векторная диаграмма автотрансформатора с отображением магнитных потоков / М. А. Шакиров // *Электротехника*. — 2019. — № 1. — С. 67–76.
8. Шакиров М. А. Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах / М. А. Шакиров // *Электричество*. — 2005. — № 11. — С. 15–27.
9. Kersai K. *Large Power Transformers* / K. Kersai, D. Kerényi, L. Kiss. — Amsterdam: Elsevier Publication, 1987. — 614 p.
10. Edelmann H. *Anschauliche Ermittlung von Transformator-Ersatzschaltbildern* / H. Edelmann // *Archiv der elektrischen Übertragung*. — № 13. — Pp. 253–261.
11. Шакиров М. А. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании / М. А. Шакиров, В. В. Андрущук, Лиюн Дуань // *Электричество*. — 2010. — № 3. — С. 55–63.
12. Вольдек А. И. *Электрические машины* / А. И. Вольдек. — Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
13. Kulkarni S. V. *Transformer Engineering. Design, Technology, and Diagnostics*. Second ed. / S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013. — 730 p.
14. Del Vecchio R. M. *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. Second ed. / R. Vecchio, B. Poulin, P. Feghali et al. — NY, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. — 363 p.

Дата поступления: 14.06.2022

Решение о публикации: 10.08.2022

Контактная информация:

ТКАЧУК Антон Андреевич — канд. техн. наук, доц.; a.a.tkachuk@mail.ru

Innovative Approach to the Creation of Power Transformer Theory

M. A. Shakirov, **A. A. Tkachuk**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shakirov M. A., Tkachuk A. A. Innovative Approach to the Creation of Power Transformer Theory. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 3, pp. 7–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-7-23

Summary

Purpose: The task of restructuring the theory of transformers due to the failure of almost all the provisions of the traditional theory is set. It is shown that along with the far-fetched concepts of windings' separate magnetic leakage fluxes, established in the last century, it's also should be confessed such the judgments, which are considered unshakable, on main or working flux in transformer magnetic core and as if creating transformer's magnetization current or m.m.f. magnetization. **Methods:** To prove this, the analysis of delusions, accepted in modern textbooks, when analyzing key topics on magnetic flux distribution in transformers, including the cases of short circuits, is carried out. **Results:** On the strength of this, it is concluded on the inadmissibility of explanation expounded therein on transformer operation as it is based on physically non-existent quantities and concepts. Instead, it is proposed to supplement the idea on energy transfer from winding to winding through a gap between them with the procedure of Poynting vector increase in a primary winding and after passing the gap, its subsequent relaxation in a secondary winding when transferring power into a load. The display of each of these stages on a 4T-shaped equivalent circuit is shown allowing to analyze simultaneously with electrical quantities the distribution of magnetic fluxes in individual sections both in window and magnetic circuit of a transformer. **Practical importance:** New properties in transformer behavior, including ones in short circuit mode, are presented.

Keywords: Transformer, primary and secondary windings, magnetic flux, equivalent circuit, short circuit, idling, magnetizing current, vector diagram.

References

1. Larin V. S. Voprosy transformatorostroeniya na kollokviume issledovatel'skogo komiteta A2 SIGRE v 2019 g [Issues of transformer engineering at the colloquium of the A2 CIGRE research committee in 2019]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2020, I. 11, pp. 60–66. (In Russian)
2. Markvardt E. G. *Elektromagnitnye raschety transformatorov* [Electromagnetic calculations of transformers]. Moscow; GONTI Publ., Redaktsiya energeticheskoy literatury Publ., 1938. 136 p. (In Russian)
3. Seely S. Electromechanical energy conversion. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962. 336 p.
4. Bron O. B. *Elektromagnitnoe pole kak vid materii* [Electromagnetic field as a kind of matter]. Moscow; GEI Publ., 1962. 260 p. (In Russian)
5. Malygin V. M. Lokalizatsiya potoka energii v transformatore [Localization of the energy flow in the transformer]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2015, I. 4, pp. 60–65. (In Russian)

6. Leytes L. V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow: Energiya Publ., 1981. 392 p. (In Russian)
7. Shakirov M. A. Skhema zameshcheniya i vektornaya diagramma avtotransformatora s otobrazheniem magnitnykh potokov [Equivalent circuit and vector diagram of an autotransformer with a display of magnetic fluxes]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2019, I. 1, pp. 67–76. (In Russian)
8. Shakirov M. A. Analiz neravnomernosti raspredeleniya magnitnykh nagruzok i poter' v transformatorakh [Analysis of uneven distribution of magnetic loads and losses in transformers]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, I. 11, pp. 15–27. (In Russian)
9. Kersai K., Kerényi D., Kiss L. *Large Power Transformers*. Amsterdam: Elsevier Publication, 1987. 614 p.
10. Edelmann H. Anschauliche Ermittlung von Transformator-Ersatzschaltbildern. *Archiv der elektrischen Übertragung*. N 13, pp. 253–261.
11. Shakirov M. A. Anomal'nye magnitnye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom zamykanii [Anomalous magnetic fluxes in a two-winding transformer with a short circuit]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2010, I. 3, pp. 55–63. (In Russian)
12. Vol'dek A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Energiya Publ., 1974. 840 p. (In Russian)
13. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. *Transformer Engineering. Design, Technology, and Diagnostics*. Second ed. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013. 730 p.
14. Del Vecchio R. M., Poulin B., Feghali P., Ahuja R., Shah D. M. *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. Second ed. NY, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 363 p.

Received: June 14, 2022

Accepted: August 10, 2022

Author's information:

Anton A. TKACHUK — PhD in Engineering, Associate Professor; a.a.tkachuk@mail.ru