



УДК 621.372.001

*М.А. Шакиров, В.В. Андрущук*

## АНТИПОТОКИ И СВЕРХПОТОКИ В ДВУХСТЕРЖНЕВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ В РЕЖИМАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*М.А. Shakirov, V.V. Andrushchuk*

### MAGNETIC SUPER FLUXES AND ANTI FLUXES IN TRANSFORMERS WITH TWO RODS UNDER SHORT-CIRCUIT

Представлены ранее неизвестные особенности магнитного поля двухстержневого трансформатора в режимах короткого замыкания, подтвержденные экспериментами, выполненными в лаборатории кафедры теоретических основ электротехники СПбГПУ. Полученные результаты несовместимы с известными Т-образными схемами замещения и ставят вопрос о создании новых схемных моделей двухстержневых трансформаторов.

ТРАНСФОРМАТОР. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯРМО. ОБМОТКА. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

Previously unknown transformer magnetic field abnormalities in short circuit regimes are presented. The phenomena have been recorded and proved by experiments in the laboratory in the subdepartment of «Theoretical foundations of electrical engineering». The results obtained are not reconcilable with the known T-circuit transformer model and put forward the challenging problem about creation of the new model of transformers.

TRANSFORMER. MAGNETIC CURRENT. YOKE. WINDING. SHORT CIRCUIT.

Выход из строя силовых трансформаторов линий электропередач крайне нежелателен. Поэтому и в прошлом и в настоящем изучение и описание их поведения в аварийных режимах, в том числе в режимах короткого замыкания (КЗ), постоянно находятся в центре внимания инженеров-электриков. В последнее время на повестке дня — полное обновление теории трансформаторов, включая принцип их действия, так как существующая теория с ее Т-образной и П-образной схемами замещения не отвечает реальным физическим процессам в трансформаторах даже в номинальном режиме их работы [1, 2]. В частности, в традиционной теории широко используется понятие «поток в стали», который, «при коротком замыкании падает почти до нуля», поскольку, как написано в учебнике [3, стр.75], «он как бы «вытесняется» из сердечника, при этом остаются только потоки рассеяния». С позиций исследований, проведенных в [1, 2], это высказывание является вымыслом, поскольку в действительности оказывается, что при КЗ:

в стали трансформатора сосуществуют несколько различных потоков;

в одном из участков в стали может возникнуть сверхпоток, т. е. поток перевозбуждения (ГОСТ 16110–82, раздел 8.18), превышающий поток холостого хода (ХХ) в этом участке при одинаковом напряжении в обоих режимах (т. е. в установившихся режимах ХХ и КЗ);

одновременно в другом участке стали может возникнуть антипоток, т. е. поток, имеющий направление, противоположное установившемуся потоку ХХ на этом участке.

К настоящему времени эти аномальные (с точки зрения традиционной теории) явления получили для однофазного двухобмоточного трансформатора **броневое типа** системное подтверждение, т. е. подтверждение в виде совокупности различных подходов, каждый из которых на равных может рассматриваться как определяющий рассматриваемые явления. Они подтверждены, во-первых, теоретическими исследованиями, приведшими к разработке новой

модели в виде 2Т-образной схемы замещения для броневых осесимметричного трансформатора (аналогичного по конструкции трансформаторам с цилиндрическим боковым ярмом известной фирмы «Brown Boveri Company»), позволившей вывести формулы для оценки его сверх- и антипоток в установившихся режимах КЗ [2]. Во-вторых, прямым построением картин магнитных потоков в азимутальной плоскости этих трансформаторов в режиме КЗ с применением современных программ анализа осесимметричных полей методами конечных элементов (МКЭ) [4]. И, наконец, в-третьих, физическими экспериментами по выявлению этих потоков в моделях броневых трансформаторов с плоской магнитной системой промышленного изготовления [5].

В отличие от осесимметричных броневых, магнитопробод двухстержневого трансформатора несимметричен относительно обмоток, поскольку одна часть каждой из обмоток находится в окне, а другая ее часть — вне окна. Это приводит к более сложной картине магнитного поля. Однако, как показано в [6] на примерах картин магнитных полей *плоскопараллельных* двухстержневых трансформаторов, в них также возникают сверх- и антипоток в режимах КЗ. Цель данной работы — подтверждение возникновения этих потоков непосредственно в экспериментах, для чего используются измерительные витки, размещенные в различных частях реальных двухстержневых трансформаторов с учетом предсказаний [6]. Как и в [5], в опытах использовались повышенные частоты (500–1000 Гц), чтобы можно было приблизиться к условиям, характерным для мощных трансформаторов, активные сопротивления обмоток которых достаточно малы по сравнению с их индуктивным сопротивлением КЗ. Эксперименты проводились для трансформаторов с высотой обмоток  $h_{обм}$  как равной высоте окна трансформатора  $h_{окн}$  (т. е. при  $h_{обм} = h_{окн}$ ), так и меньшей высоты окна (т. е. при  $h_{обм} < h_{окн}$ ).

**Примечание 1.** Приведенные ниже результаты важны также для сопоставления с экспериментами, выполненными в работе [7], автор которой прокомментировал их на основе весьма упрощенных картин магнитных полей. Упрощение состояло в пренебрежении влиянием на картины полей токов по-

ловинок обмоток двухстержневого трансформатора, находящихся за пределами его окна. Вопрос о приемлемости такого подхода поднят в [6].

### Часть 1. Трансформатор с высотой обмоток

$$h_{обм} = h_{окн}$$

Анализ картин распределения магнитных потоков в двухстержневых трансформаторах, представленных в [6], указывает на то, что (как и в броневом трансформаторе), если в одной его части возникает сверхпоток, то в другой его части одновременно возникает антипоток. Наиболее явно это свойство выражено в трансформаторе с высотой обмоток  $h_{обм} = h_{окн}$ . Далее для удобства, ориентируясь на изображение четверти двухстержневого трансформатора (рис. 1, а), будем пользоваться понятием левой и правой половин его обмоток. Стальное стыковое ярмо для краткости будем называть просто стыком.

**Сверх- и антипоток в трансформаторе при КЗ внешней обмотки.** Более сложный характер распределения магнитных потоков в двухстержневом трансформаторе по сравнению с броневым вытекает из сравнения их магнитных полей при КЗ внешней обмотки (рис. 1). Плоскопараллельная картина поля (рис. 1, а) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 1, б) — из работы [4]. Поля в двухстержневых трансформаторах обладают как продольной, так и поперечной антисимметрией. Поэтому на рис. 1, а картина поля представлена в пределах сектора второго квадранта прямоугольной системы координат, ограниченного положительной осью  $y$ , отрицательной осью  $x$  и баком, играющим роль идеального электромагнитного экрана. Поле на рис. 1, б построено для произвольной азимутальной плоскости броневых трансформатора с концентрическим боковым ярмом.

Различия полей (см. рис. 1) очевидны. В частности, в отличие от броневых, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внешней обмотки наблюдается *общий* поток в стали, охватывающий все четыре половинки обмоток окна. Однако больший интерес представляет выявление *сходства* картин полей с целью привлечения для описания работы двухстержневого трансформатора тех же схем замещения (магнитоэлектрических [8], 2Т-образных [2]), которые были ранее получены для броневых

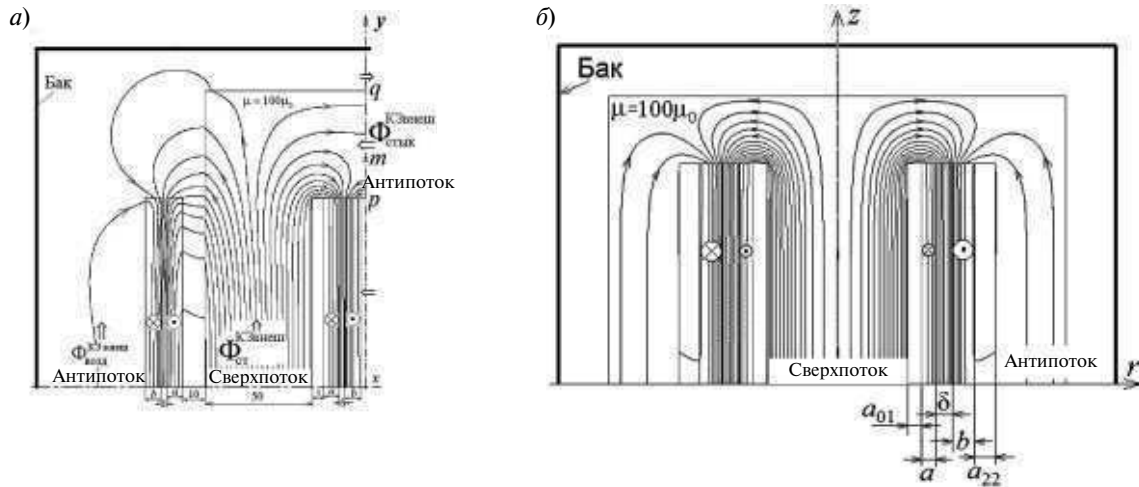


Рис. 1. Сравнение магнитных полей при КЗ внешней обмотки двухстержневого (а) и броневое (б) трансформаторов с высотами обмоток равными высоте окна

трансформатора. Сходными являются следующие особенности полей броневое и двухстержневого трансформаторов при КЗ их внешних обмоток:

образование сверхпотоков в стержнях;

подобие магнитных полей в окнах. Если принять, что поле в левых половинках обмоток двухстержневого трансформатора практически такое же, как и в правых половинках (по крайней мере, в их серединах на оси  $x$ ), то можно считать, что поля в обмотках обоих типов трансформаторов также подобны;

антипоток в середине бокового яра броневое трансформатора (см. рис. 1, б) соответствует антипоток  $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$  в средней части стыка двухстержневого трансформатора на линии  $p, q$  (рис. 1, а), равный

$$\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = \Phi_{\text{тр}} - \Phi_{\text{тq}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{тр}}$  — собственно антипоток, поскольку ориентирован встречно направлению потока ХХ. Здесь и далее верхний индекс (в данном случае: КЗ внеш) показывает, какая из обмоток подвергнута короткому замыканию. Через  $t$  обозначена точка, разделяющая общий поток  $\Phi_{\text{тq}}$  и собственно антипоток  $\Phi_{\text{тр}}$ . Остальные потоки, пересекающие ось  $y$ , при  $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$  пренебрежимо малы. Таким образом, сечение средней части стыка двухстержневого трансформатора

является аналогом сечения в средней (по высоте) части бокового яра броневое трансформатора.

Сказанное подтверждается испытаниями, проведенными на двухстержневом трансформаторе ОСМ1–2,5 УЗ, высота обмоток которого совпадает с высотой окна (рис. 2, а). Внутренней является обмотка на 380 В, а внешней — на 220 В. Устройство позволяет намотать измерительные витки на среднюю часть стыкового яра, как показано на рис. 2, а, не демонтируя трансформатор.

Используется измерительная схема с двухлучевым осциллографом, описанная в [5]. Вначале на осциллограф подаются опорное напряжение от сети и напряжение от измерительных витков в режиме ХХ, т. е. при питании 380-вольтовой обмотки при отключенной внешней 220-вольтовой обмотке. Синусоиды обоих сигналов совмещаются. После закорачивания 220-вольтовой обмотки получаем осциллограмму (рис. 2, б), которая показывает, что сигнал с измерительных витков, а вместе с ним и магнитный поток в стыке, поменял фазу практически на 180 градусов. Таким образом осциллограмма (рис. 2, б) подтверждает образование антипотока в стыке с амплитудой  $\Phi_{\text{тстык}}^{\text{КЗ внеш}}$ . Отношение амплитуд синусоид (рис. 2, б) определяет коэффициент магнитного состояния стыка при КЗ:

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -\frac{\Phi_{\text{тстык}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} = -0,262, \quad (2)$$

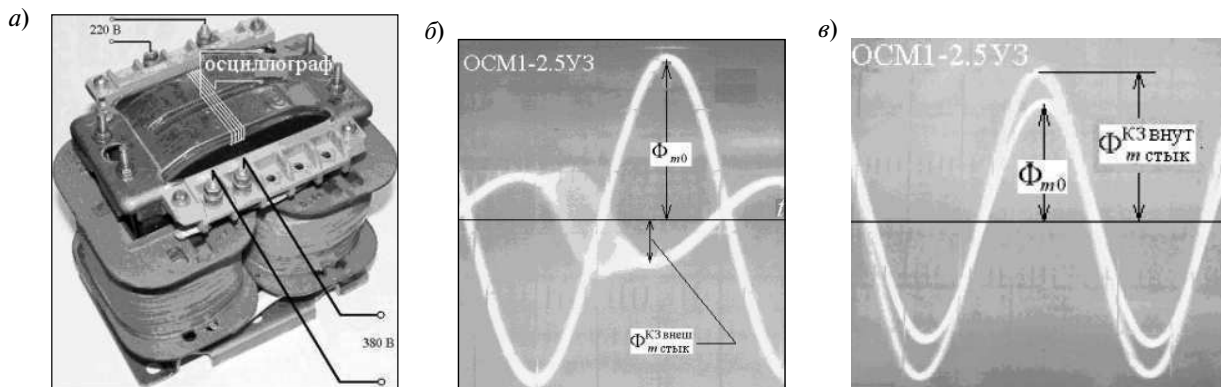


Рис. 2. Трансформатор OSM1–2,5 УЗ с измерительными витками, охватывающими его стык, (а) и осциллограммы потоков в его стыке при КЗ внешней обмотки (б) и внутренней обмотки (в)

что весьма близко к теоретическому его значению, вычисляемому по формуле

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -\frac{b}{2a + 6\delta + 2b}. \quad (3)$$

Смысл обозначений ( $a, \delta, b$ ) пояснен на рис. 1. Полагая, что в трансформаторе OSM1–2,5 УЗ

$$a = b; \quad \delta = 0, \quad (4)$$

получаем

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = -0,25. \quad (5)$$

Отличие рассчитанного коэффициента (5) от экспериментального (2) составляет менее 5 %.

Согласно рис. 1,  $a$  сверхпоток  $\Phi_{m \text{ ст}}^{\text{КЗ внеш}}$  должен наблюдаться в стержне. Формула для коэффициента магнитного состояния стержня при КЗ имеет вид

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = \frac{\Phi_{m \text{ ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} = 1 + \frac{a}{2a + 6\delta + 2b}, \quad (6)$$

что с учетом (4) дает

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = 1,25. \quad (7)$$

**Примечание 2.** Для подтверждения этого результата необходим эксперимент с использованием измерительных витков на стержне. Для их установки требуется разборка трансформатора, что нетрудно реализовать в лабораторных условиях электротехнических отделений любого вуза.

**Сверх- и антипотoki в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки.** Картины распределения

магнитных потоков при КЗ внутренней обмотки двухстержневого трансформатора настолько сложны, что вряд ли доступны даже для качественного предсказания. По-видимому, впервые они получены в [6] (рис. 3, а). Картина потоков при КЗ для броневого трансформатора (рис. 3, б) взята из работы [4].

Из сравнения полей на рис. 3 следует, что, как и в броневом, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внутренней обмотки наблюдается следующее:

в стержнях возникают антипотoki. Весьма неожиданно то, что этот антипоток в двухстержневом трансформаторе замыкается через левые половинки обмоток, находящиеся вне окна трансформатора;

общий поток в стали отсутствует;

магнитные силовые линии поля в окне параллельны осям обмоток; в области левых половинок обмоток это условие выполняется приближенно в их средних по высоте частях;

имеет место сверхпоток, но в двухстержневом трансформаторе он возникает в средней части стыка в результате объединения в точке  $m$  потоков от левых и правых половинок обмоток (явление, не поддающееся умозрительному предсказанию).

Таким образом, подтверждается отмеченное выше наблюдение: сечение средней части стыка двухстержневого трансформатора играет роль сечения в средней (по высоте) части бокового ярма броневого трансформатора. Возникновение сверхпотока в среднем сечении стыка подтверждается экспериментально осциллограммой

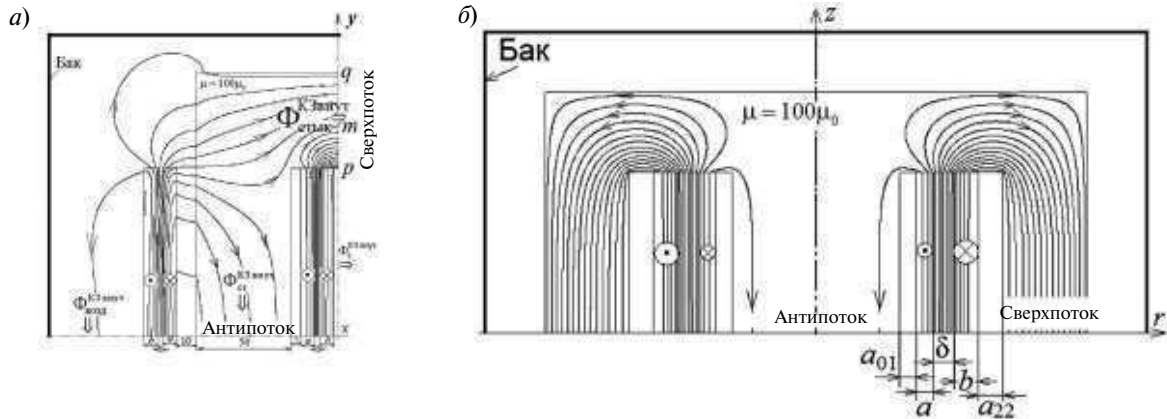


Рис. 3. Сравнение магнитных полей при КЗ внутренней обмотки двухстержневого (а) и броневое (б) трансформаторов с высотами обмоток равных высоте окна

рис. 2, в, из которой следует, что коэффициент магнитного состояния стыка при КЗ

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = \frac{\Phi_{\text{т стык}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = 1,257, \quad (8)$$

что весьма близко к теоретическому его значению, вычисляемому по формуле

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = 1 + \frac{b}{2a + 6\delta + 2b}. \quad (9)$$

Подстановка сюда данных из (4) дает

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} = 1,25, \quad (10)$$

что практически не отличается от экспериментального значения (8).

Согласно рис. 2, а в стержне при КЗ должен наблюдаться антипоток. Коэффициент магнитного состояния стержня определяется по формуле

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = -\frac{\Phi_{\text{т ст}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = -\frac{a}{2a + 6\delta + 2b}, \quad (11)$$

то есть с учетом (4) дает

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внут}} = -0,25. \quad (12)$$

Экспериментальное подтверждение (11) и (12) связано с реализацией Примечания 2.

**Примечание 3.** Соотношения (3), (6), (9) и (11) повторяют формулы для броневое трансформатора [2]. При этом принималась во внимание возможность отождествления сечения стыка двухстержневого трансформатора с сечением бокового ярма броневое трансформатора. Между тем выражения

(6) и (11) для оценки потоков в стержнях при КЗ в двухстороннем трансформаторе применялись и ранее в [7] с использованием упрощенных картин поля (см. Примечание 1). Однако антипоток и сверхпоток в стыке при КЗ в [7] обнаружены не были. Отчасти, как будет показано ниже, это можно объяснить исключением из рассмотрения в [7] моделей трансформаторов с высотой обмоток  $h_{\text{обм}} = h_{\text{окн}}$ .

### Часть 2. Трансформатор с высотой обмоток

$$h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$$

В отличие от маломощных, в силовых трансформаторах в силу целого ряда технологических причин высота обмоток  $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$ . Модель такого трансформатора, собранная на основе описанного в учебном пособии [9] устройства с О-образным раздвижным железным сердечником, представлена на рис. 4. Сердечник имеет прямоугольное поперечное сечение, его площадь  $S_{\text{Fe}} = 5 \times 5,7 = 28,5 \text{ см}^2$ . Все размеры на рис. 4 приведены в мм. Показано последовательное соединение катушек внутренней обмотки. Ее общее число витков  $w_1 = 330$ . Аналогичным образом соединены катушки внешней обмотки; число ее витков  $w_2 = w_1 = 330$ . Коэффициент трансформации  $n = w_1 / w_2 = 1$ .

Соотношение между высотами обмотки и окна

$$\frac{h_{\text{окн}}}{h_{\text{обм}}} = 0,888. \quad (13)$$

Поперечные размеры (рис. 4) были использованы в [6] для расчета *плоскопараллельных* магнитных полей при КЗ бесконечно протяженного

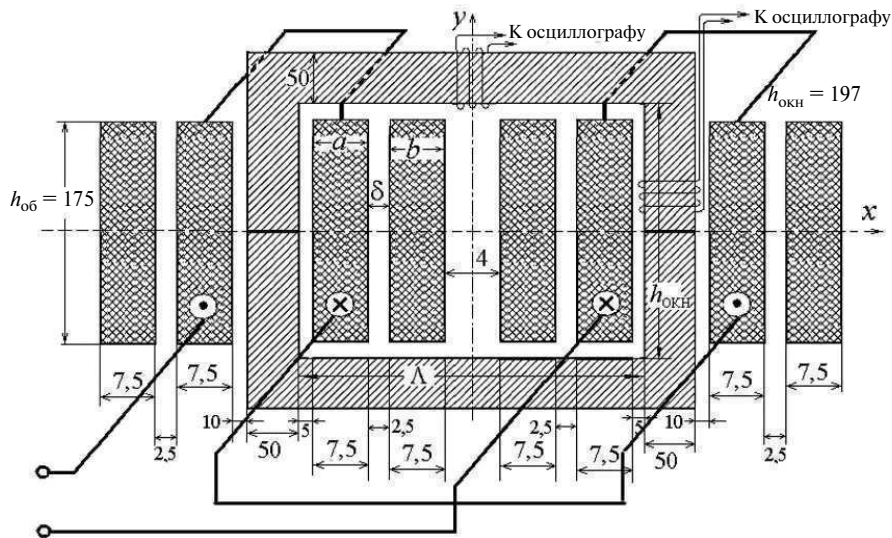


Рис. 4. Двустержневой трансформатор с высотой обмоток  $h_{обм} < h_{окн}$

в направлении оси  $z$  трансформатора. Полученные при этом картины магнитных потоков легли в основу их опытных измерений с помощью специальных витков, намотанных на стык и на сердечник, как показано на рис. 4. Измерения проводились на частотах 500–1000 Гц.

**Сверх- и антипоток в трансформаторе при КЗ внешней обмотки**

Типовые картины распределения магнитных потоков при КЗ внешней обмотки приведены на рис. 5. Плоскопараллельная картина поля (рис. 5, а) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 5, б) — из работы [4].

Как видно, в отношении возникновения *сверхпотоков в стержнях* в обоих случаях наблю-

даются те же картины, что и на рис. 1, а и б. Это также подтверждается осциллограммой (рис. 6, а) для трансформатора (рис. 4), из которой находим коэффициент магнитного состояния

$$k_{ст}^{КЗ\ внешне} = \frac{\Phi_{m\ ст}^{КЗ\ внешне}}{\Phi_0} = 1,5. \quad (14)$$

Согласно (6) эта величина, даже если принять зазор  $\delta = 0$ , получается равной

$$k_{ст}^{КЗ\ внешне} = 1 + \frac{7,5}{2 \cdot 7,5 + 6 \cdot 0 + 2 \cdot 7,5} = 1,25, \quad (15)$$

что близко к значению  $k_{ст}^{КЗ\ внешне} = 1,223$ , получаемому непосредственно из картины поля (рис. 5, а). Однако значение (15) существенно меньше экспериментального результата (14).

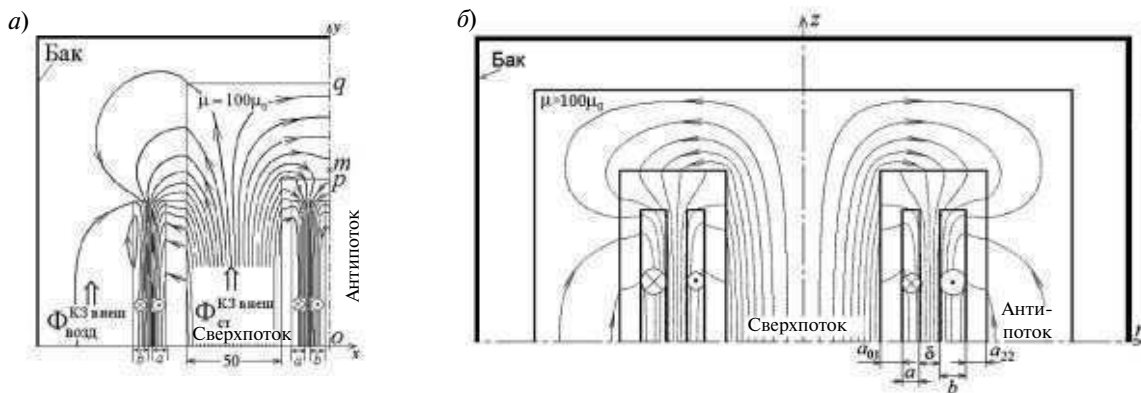


Рис. 5. Сравнение магнитных полей при КЗ внешней обмотки двухстержневого (а) и броневое (б) трансформаторов с высотами обмоток  $h_{обм} < h_{окн}$

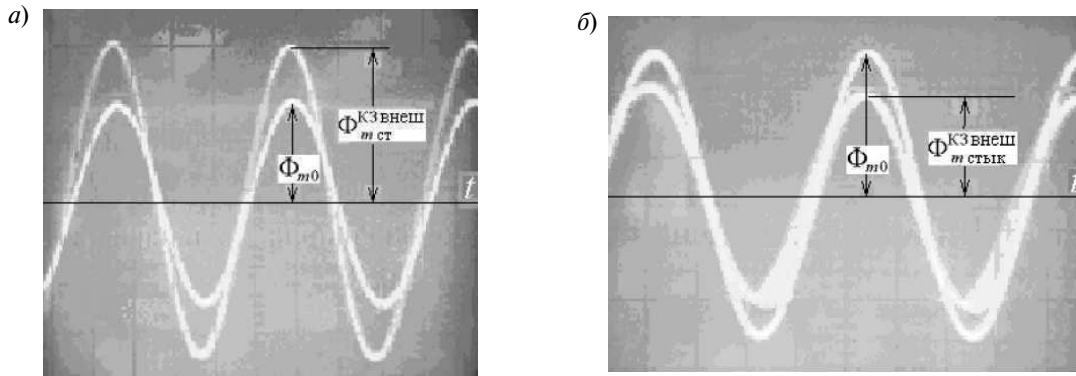


Рис. 6. Осциллограммы потоков в стержне (а) и в стыке (б) двухстержневого трансформатора с высотами обмоток  $h_{обм} < h_{окн}$  при КЗ его внешней обмотки

Объяснить это расхождение в рамках данной работы не удастся.

Вне стержня картины полей на рис. 1 и рис. 5 существенно различаются. Особенность поля в броневом трансформаторе (рис. 5, б) состоит в том, что часть потока стержня *проникает* за края бокового ярма (чего не было при  $h_{обм} = h_{окн}$  (см. рис. 1, б)). Тем не менее в средней части стали бокового ярма по-прежнему имеет место антипоток, и он может быть измерен с помощью витков, намотанных на эту часть бокового ярма [5].

Картина поля в двухстержневом трансформаторе (рис. 5, а) значительно сложнее. Ее сравнение с полем на рис. 1, а показывает, что точка  $m$ , разделяющая общий поток  $\Phi_{mq}$  и собственно антипоток  $\Phi_{mp}$  в стали стыка, смещена к граничной точке  $p$  между окном и стыком. И, следовательно, при  $h_{обм} < h_{окн}$  может оказаться, что магнитный поток в стыке

$$\Phi_{стык}^{КЗ\ внешне} = \Phi_{mp} - \Phi_{mq} > 0, \quad (16)$$

т. е. вместо антипотока в стыке при КЗ внешней обмотки будет протекать попросту уменьшенный поток XX. Это полностью объясняет, почему (в отличие от осциллограммы на рис. 1, б) на осциллограмме рис. 6, б антипоток не наблюдается, и коэффициент (2) следует записать в виде

$$k_{стык}^{КЗ\ внешне} = \frac{\Phi_{m\ стык}^{КЗ\ внешне}}{\Phi_0} = 0,69, \quad (17)$$

т. е. положительным числом. Также положительным этот коэффициент получается и из анализа

картины поля на рис. 5, б ( $k_{стык}^{КЗ\ внешне} = 0,187$ ). Чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе точка ветвления потоков  $m$  к точке  $p$  на границе окна и стыкового ярма. А это означает, что в эксперименте с измерительными витками, охватывающими середину стыкового ярма, антипоток не выявится, потому что там при  $h_{обм} < h_{окн}$  он либо очень слабый, либо практически отсутствует. Это объясняет, почему в экспериментах на моделях силовых двухстержневых трансформаторов, описанных в [7], ни разу не были выявлены антипотоки в стыковом ярье.

**Примечание 4.** Как отмечалось в [6], картины всех магнитных полей для двухстержневых трансформаторов (включая картины на рис. 1, а; 3, а и 5, а) согласуются с очевидным положением, что отбрасываемая при их построении часть трансформатора, расположенная справа от оси  $y$ , может быть заменена условным идеальным боковым ярмом с  $\mu = \infty$ . Но в этом случае все магнитные потоки, пронизывающие ось  $y$ , пройдут через среднее поперечное (на оси  $x$ ) сечение этого идеального ярма, образуя *обобщенный стыковой антипоток*

$$\Phi_{общ. стык}^{КЗ\ внешне} = \Phi_{mq} - \Phi_{mp} - \Phi_{op} \quad (18)$$

подобно тому, как образуется антипоток в середине бокового ярма в броневом трансформаторе. Все потоки в (18) берутся положительными, а знаки перед ними — с учетом направления пересечения ими оси  $y$ . Согласно картине поля на рис. 5, а имеем

$$\begin{aligned} k_{общ. стык}^{КЗ\ внешне} &= -\frac{\Phi_{общ. стык}^{КЗ\ внешне}}{\Phi_0} = k_{стык}^{КЗ\ внешне} - \frac{\Phi_{op}}{\Phi_0} = \\ &= 0,187 - 0,2913 = -0,1043. \end{aligned} \quad (19)$$

Обобщенный стык совпадает с плоскостью  $y, z$ , на которой соприкасаются (стыкуются) левая и правая (отброшенная на рис. 5, а) части трансформатора.

Чтобы «поймать» обобщенный стыковой антипоток в эксперименте, следует охватить измерительными витками одновременно со стыком прилегающую к нему половину воздушного промежутка *op* между внешними обмотками в окне трансформатора.

**Сверх- и антипотoki в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки.** На рис. 7 приведены типовые картины распределения магнитных потоков при КЗ внутренней обмотки. Плоскопараллельная картина поля (см. рис. 7, а) взята из работы [6], а осесимметричная картина (рис. 7, б) — из работы [4].

В отношении *антипотоков в стержнях* в обоих случаях наблюдаются те же картины, что и на рис. 3, а и б. Это также подтверждается осциллограммой (рис. 8, а) для трансформатора (рис. 4), из которой находим коэффициент магнитного состояния

$$k_{ст}^{КЗ\ внут} = \frac{\Phi_{ст}^{КЗ\ внут}}{\Phi_0} = -0,5. \quad (20)$$

Согласно (11) эта величина, даже если принять зазор  $\delta = 0$ , оказывается равной

$$k_{ст}^{КЗ\ внут} = -\frac{7,5}{2 \cdot 7,5 + 6 \cdot 0 + 2 \cdot 7,5} = -0,25, \quad (21)$$

что близко к значению  $k_{ст}^{КЗ\ внеш} = -0,219$ , получаемому непосредственно из картины поля (см. рис. 7, а). Значение (21) вдвое меньше экспериментального результата (20), что в рамках данной работы объяснить не удается.

**Примечание 5.** Не исключено, что значительные расхождения между (20) и (21), а также между (14) и (15) обусловлены тем, что экспериментальные

величины (14) и (20) получены при испытаниях реальных *трехмерных* устройств, тогда как (15) и (21) посчитаны по формулам (6) и (11) для *двухмерных* устройств. Кроме того, строго говоря, (6) и (11) были выведены не для двухстержневых, а для броневых трансформаторов с высотой обмоток  $h_{обм} = h_{окн}$ .

В отличие от картины поля на рис. 3, а значительная часть потока внешней обмотки на картине поля рис. 7, а протекает мимо стали. Поэтому вместо сверхпотока в стыке на рис. 7, а протекает просто уменьшенный поток ХХ, что и подтверждается осциллограммой (рис. 8, б), согласно которой

$$k_{стык}^{КЗ\ внут} = \frac{\Phi_{стык}^{КЗ\ внут}}{\Phi_0} = 0,18. \quad (22)$$

Непосредственно из картины поля на рис. 7, а имеем  $k_{стык}^{КЗ\ внут} = 0,786$ . Сказанное объясняет, почему в экспериментах на моделях силовых двухстержневых трансформаторов, описанных в [7], также не выявлен ни один случай образования при КЗ свехпотока в стыковом яре.

**Примечание 6.** Как следует из картины поля на рис. 7, б, сверхпоток в средней части бокового ярма броневых трансформатора образуется в результате объединения трубок поля, спускающихся сверху и проникающих в боковое ядро сбоку от внешней обмотки. Принимая во внимание Примечание 4, приходим к выводу, что аналогом этому сверхпотoku является обобщенный стыковой сверхпоток при КЗ двухстержневого трансформатора, равный

$$\Phi_{общ. стык}^{КЗ\ внут} = \Phi_{mq} + \Phi_{mp} + \Phi_{op}. \quad (23)$$

Здесь все слагаемые взяты со знаком плюс, как одинаково ориентированные в направлении оси *x*. В результате по картине поля на рис. 7, а получаем

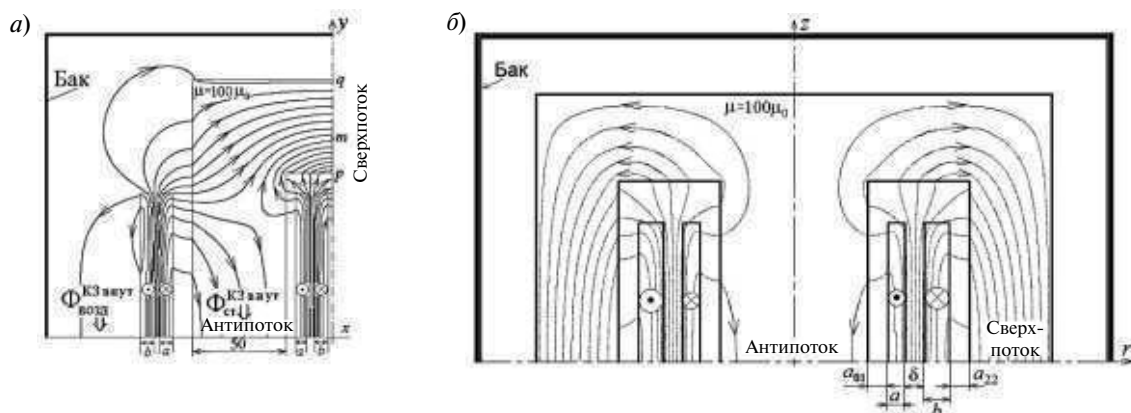


Рис. 7. Сравнение магнитных полей при КЗ внутренней обмотки двухстержневого (а) и броневых (б) трансформаторов с высотами обмоток  $h_{обм} < h_{окн}$



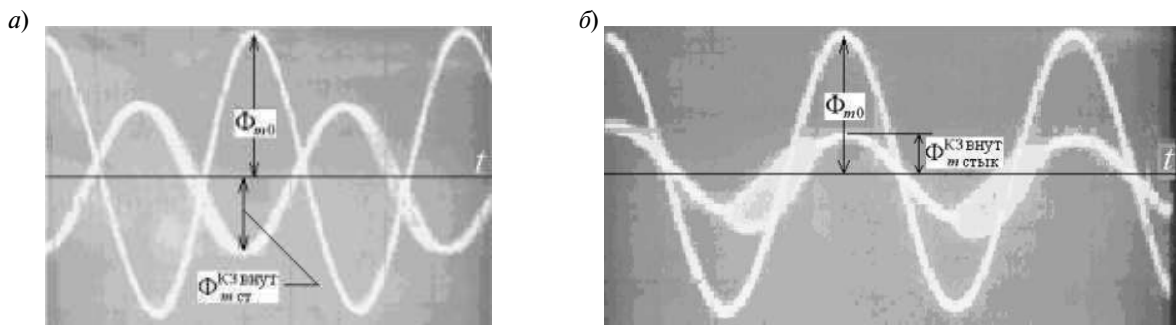


Рис. 8. Осциллограммы потоков в стержне (а) и в стыке (б) двухстержневого трансформатора с высотами обмоток  $h_{\text{обм}} < h_{\text{окн}}$  при КЗ его внутренней обмотки

$$k_{\text{общ. стык}}^{\text{КЗ внут}} = \frac{\Phi_{\text{общ. стык}}^{\text{КЗ внут}}}{\Phi_0} = k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внут}} + \frac{\Phi_{\text{оп}}}{\Phi_0} = 0,786 + 0,3198 = 1,1058. \quad (24)$$

Способ экспериментальной проверки возникновения обобщенного стыкового сверхтока при КЗ двухстержневого трансформатора с помощью измерительных витков описан в конце Примечания 4.

Экспериментально подтверждено, что в двухстержневом трансформаторе с высотой обмоток, равных высоте окна, при коротких замыканиях одновременно возникают сверх- и антипоток. Эти потоки протекают в средних сечениях стальных стержней и стыковых ярем.

Это утверждение сохраняет силу и в случае, когда высоты обмоток меньше высоты окна, если вместо потока через стальное стыковое ядро рассматривать суммарный поток через стыковую плоскость, разделяющую двухстержневой трансформатор на две симметричные части, каждая из которых содержит по стержню.

Приведенные экспериментальные результаты важны для постановки новых опытов с целью разработки приемлемой схемы замещения силовых двухстержневых трансформаторов и ее использования для исследования аномальных процессов при внезапных коротких замыканиях в энергосетях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, Г.Н.** Трансформаторы и реакторы: новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 204 с.
2. **Шакиров, М.А.** 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электротехника.— 2010. № 5.— С. 19–36.
3. Теоретические основы электротехники. Том 1. [Текст] / Под ред. проф. П.А. Ионкина.— М.: Высшая школа, 1976.— 544 с.
4. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов, Дуань Лиюн // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №1(95).— С. 107–120.
5. **Шакиров, М.А.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Дуань Лиюн // Электротехника.— 2010. № 3.— С. 55–63.
6. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков при коротких замыканиях в двухстержневых трансформаторах [Текст] / М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2013. № 4(183).— С. 61–77.
7. **Григорьев, И.Б.** Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом потока рассеяния [Текст] / И.Б. Григорьев // Электротехника.— 1975. № 4.
8. **Шакиров, М.А.** Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / М.А. Шакиров // Электротехника.— 2005. №11. С. 15–17.
9. **Калантаров, П.Л.** Руководство к лаборатории переменных токов. Ч. 1 [Текст] / П.Л. Калантаров.— М.: Госэнергоиздат, 1949.— 188 с.

## REFERENCES

1. **Aleksandrov G.N., Shakirov M.A.** Transformatory i reaktory: novye idei i printsipy [Tekst].— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006.— 204 s. (rus.)
2. **Shakirov M.A.** 2T-obraznye skhemy zameshcheniia transformatorov [Tekst]. Elektrichestvo.— 2010. № 5.— S. 19–36. (rus.)
3. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom. 1 [Tekst] / Pod red. prof. P.A. Ionkina. M.: Vysshaya shkola, 1976.— 544 s. (rus.)
4. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V., Duan' Liun.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov v bronevykh transformatorakh pri korotkikh замыkaniyakh [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №1(95).— S. 107–120. (rus.)
5. **Shakirov M.A., Andrushchuk V.V., Duan' Liun.** Anomal'nye magnitnye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom замыkaniy [Tekst]// Elektrichestvo.— 2010. № 3.— S. 55–63. (rus.)
6. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov pri korotkikh замыkaniyakh v dvustozhnykh transformatorakh [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2013. № 4(183).— S. 61–77. (rus.)
7. **Grigorov I.B.** Potoki v magnitoprovodakh moshchnykh silovykh transformatorov i avtotransformatorov s uchetom potoka rasseianiia [Tekst] // Elektrotehnika.— 1975. № 4. (rus.)
8. **Shakirov M.A.** Analiz neravnomernosti raspredeleniia magnitnykh nagruzok v transformatorakh na osnove magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniia [Tekst] // Elektrichestvo.— 2005. №11.— S. 15–27. (rus.)
9. **Kalantarov, P.L.** Rukovodstvo k laboratorii pere-mennykh tokov. Ch.1 [Tekst].— M.: Gosenergoizdat, 1949.— 188 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШАКИРОВ Мансур Акмелович** — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; действительный член Академии электротехнических наук; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: manshak@mail.ru

**АНДРУЩУК Виктор Васильевич** — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия;

## AUTHORS

**SHAKIROV Mansur A.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: manshak@mail.ru

**ANDRUSHCHUK Victor V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia;