



УДК 621.372.001

М.А. Шакиров, Ю.В. Варламов

КАРТИНЫ АНОМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ДВУХСТЕРЖНЕВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

M.A. Shakirov, U.V. Varlamov

PICTURES ANOMALOUS MAGNETIC FLUXES AT SHORT-CIRCUIT OF THE TRANSFORMER WITH TWO RODS

Изложена методология построения картин магнитных полей в стали и окне двухстержневых трансформаторов в режимах короткого замыкания с использованием пакета отечественной программы *ELCUT*. Представлены оригинальные картины магнитных полей, подтверждающие явления возникновения сверх- и антипоток в этих трансформаторах.

ТРАНСФОРМАТОР. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯРМО. ОБМОТКА. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

The methodology of constructing of the magnetic fields in a steel box and window of 2-rod transformers in the short-circuit mode using the software package *ELCUT* is proposed. Presents the original paintings of magnetic fields, confirming the phenomenon of super-and reverse fluxes in that transformers.

TRANSFORMER. MAGNETIC CURRENT. YOKE. WINDING. SHORT CIRCUIT. FINITE ELEMENT METHOD

Трансформаторы — важнейшие элементы линий электропередач. Поэтому совершенствованию их конструкций и свойств всегда уделялось пристальное внимание. В последнее время выяснилось, что, несмотря на более чем столетнюю историю, теория трансформаторов нуждается в существенном пересмотре вплоть до уточнения принципа их действия [1]. Толчком к этому послужило установление факта возникновения в стержне и боковом ярме короткозамкнутого броневых трансформатора *сверх-* и *антипоток*. Сверхпоток в данной части трансформатора называется поток в ней при коротком замыкании (КЗ) трансформатора, если он выше, чем поток при холостом ходе (ХХ), а под антипоток — этот поток при КЗ, если он оказывается направленным встречно потоку при ХХ (при одном и том же напряжении на зажимах трансформатора в обоих режимах, т. е. в режимах ХХ и КЗ). Строгое теоретическое обоснование этим явлениям и вывод новых схем замещения

броневых трансформатора, способных учитывать сверх- и антипоток при КЗ, приведены в [2]. Возникновение сверх- и антипоток в броневых трансформаторах было подтверждено экспериментально на базе магнитных систем трансформаторов типа ОСМ-1МУЗ [3], а также численными расчетами и построениями картин осесимметричных магнитных полей методами конечных элементов (МКЭ) для трансформаторов с *цилиндрическими* боковыми ярмами (аналогичными конструкции ярма в трансформаторах известной фирмы «Brown Boveri Company») [4]. Эта же конструкция была положена в основу всех аналитических соотношений теории [2], границы применимости которой, строго говоря, ограничены указанным видом геометрии ярма однофазных броневых трансформаторов.

Вместе с тем из общих физических соображений вытекает, что сверх- и антипоток должны возникать при КЗ в силовых трансформаторах любой другой конструкции, в том числе

в весьма распространенном типе — однофазных *двухстержневых* трансформаторах. Цель статьи — подтвердить существование этих потоков в короткозамкнутом двухстержневом трансформаторе путем численного расчета его магнитных полей с помощью МЭК. Исследуется магнитное поле прототипа реального трансформатора, созданного на кафедре ТОЭ СПбГПУ, который позволяет экспериментально наблюдать эти явления с помощью измерительных витков в установившихся режимах КЗ. Термин *прототип* подразумевает, что задача расчета поля рассматривается в упрощенной плоскопараллельной постановке для *идеализированного* двухстержневого трансформатора при пренебрежении потерями в стали и активными сопротивлениями обмоток.

Описание лабораторной установки, моделирующей силовой двухстержневой трансформатор

Использовалась описанная в [3] магнитная система с О-образным раздвижным железным сердечником (рис. 1, а), на левую и правую части которого намотано по 6 цилиндрических катушек из медного провода толщиной $\Delta = 2,5$ мм (рис. 1, б).

Каждая из катушек — $(A_1, A_2), (B_1, B_2), \dots, (a_1, a_2), (b_1, b_2), \dots$ — образует слой с числом витков, равным 55. Слои обмоток вплотную прилегают друг к другу. Поэтому за толщину слоя принимается диаметр провода $\Delta = 25$ мм. Сопротивление слоя постоянному току $R_\Delta = 0,1$ Ом. При значении воздушного зазора

$\delta_{\text{зав}} = 0$ (рис. 1, б) высота окна — $h_{\text{окн}} = 175$ мм, а его ширина — $\Lambda = 49$ мм. Высота обмотки катушек — $h_{\text{об}} = 0,874h_{\text{окн}} = 153$ мм. Длина пути по средней линии железа равна 0,76 м, а поперечное сечение сердечника квадратного сечения — $S_{\text{Fe}} = 5 \times 5,7 = 28, \text{ см}^2$. Допустимый ток в обмотках равен 10 А. Установка позволяет моделировать двухстержневые трансформаторы с различными числами витков *внутренней* и *внешней* (наружной) обмоток.

Пример такого трансформатора, рассматриваемого в первой части статьи, показан на рис. 2. В нем, в отличие от макета (рис. 1, б), высота обмоток принята равной высоте окна ($h_{\text{об}} = h_{\text{окн}}$). Во второй части рассматриваются поля трансформатора с укороченными обмотками ($h_{\text{об}} < h_{\text{окн}}$). Внутренняя обмотка каждого стержня содержит по три катушки, последовательно подключенные друг к другу с помощью соединительных проводников, расположенных за пределами обмоток; ее ширина равна $a = 3 \times 2,5 = 7,5$ мм. Внешняя обмотка стержня также содержит по три последовательно соединенные катушки; ее ширина $b = 3 \times 2,5 = 7,5$ мм. Таким образом, рассматривается трансформатор с одинаковыми внутренней и внешней обмотками. Каждая обмотка содержит $w_1 = w_2 = 2 \times (3 \times 55) = 330$ витков. Коэффициент трансформации $n = w_1 / w_2 = 1$. Зазор между внутренней и внешней обмотками равен $\delta = 2,5$ мм. Расстояние между внешними обмотками левого и правого стержней равно 4 мм. Зазоры между сердечником и внутренними обмотками равны с одной стороны 10 мм, а с другой — 5 мм. На рис. 2 показаны также

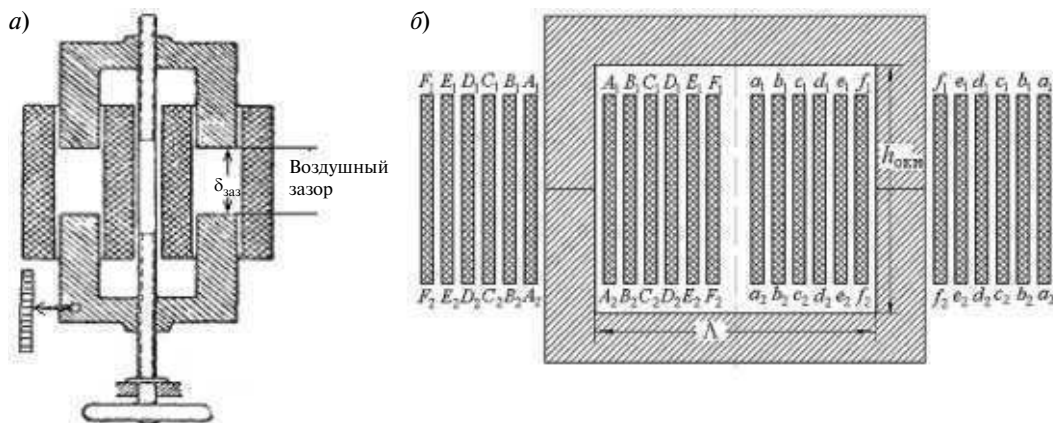


Рис. 1. Макет двухстержневого трансформатора (а) и послойная геометрия его обмоток (б)

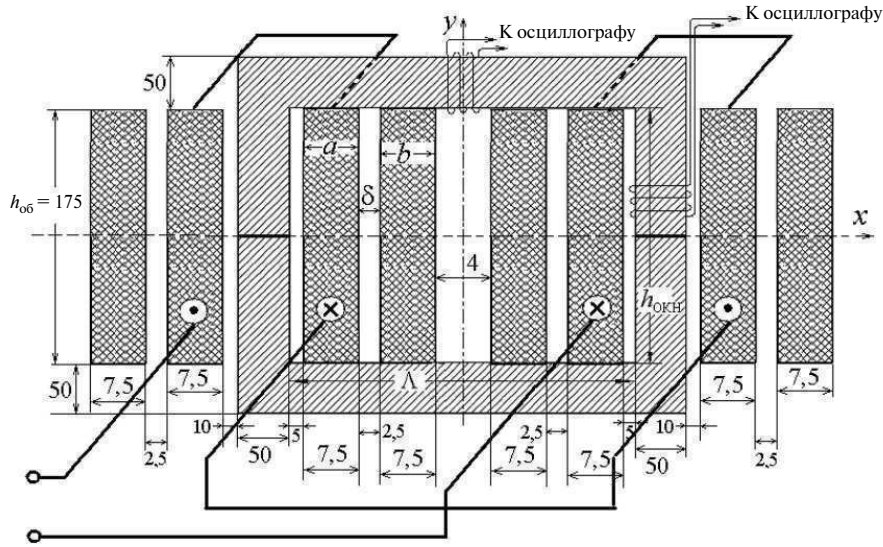


Рис. 2. Двухстержневой трансформатор при высоте обмоток, равной высоте окна ($h_{об} = h_{окн}$)

измерительные витки, подсоединяемые к осциллографу; они позволяют контролировать изменения магнитных потоков в различных частях стали трансформатора.

Результаты экспериментальных исследований

В отличие от броневое, двухстержневой трансформатор не имеет бокового ярма. Поэтому режимы КЗ в них выглядят по-разному. Согласно [2], если в одной части магнитопровода броневое трансформатора при КЗ наблюдается сверхпоток, то в другой его части одновременно должен возникать антипоток, что и было экспериментально подтверждено в [3]. Вопрос о возможности экспериментального наблюдения одновременно сверх- и антипотока в двухстержневом трансформаторе при КЗ до последнего времени оставался открытым. Следует также иметь в виду, что применение полученных для броневое трансформатора [2] формул для коэффициентов магнитного состояния (КМС) в средней части стержней двухстержневых трансформаторов в виде

$$k_{ст}^{КЗ\ внешне} = \frac{\dot{\Phi}_{ст}^{КЗ\ внешне}}{\dot{\Phi}_0} \bigg|_{U_{внут}^{XX} = U_{внеш}^{КЗ\ внешне}} \approx 1 + \frac{a}{2a + 6\delta + 2b}; \quad (1)$$

$$k_{ст}^{КЗ\ внутр} = \frac{\dot{\Phi}_{ст}^{КЗ\ внутр}}{\dot{\Phi}_0} \bigg|_{U_{внеш}^{XX} = U_{внут}^{КЗ\ внутр}} \approx$$

$$\approx -\frac{b}{2a + 6\delta + 2b} \quad (2)$$

требует оговорок, поскольку в них, в частности, не учитывается влияние конечной длины двухстержневого трансформатора в направлении оси z. Здесь в выражениях (1), (2) и далее верхние индексы «КЗ внеш» и «КЗ внутр» указывают, какая из обмоток — внешняя или внутренняя — находится в замкнутом состоянии; Φ_0 — поток XX при том же напряжении U^{XX} , при котором рассматривается режим КЗ трансформатора ($U^{КЗ}$). Подставив в (1) и (2) значения a, b, δ , приведенные на рис. 2, получаем для плоскопараллельного трансформатора

$$k_{ст}^{КЗ\ внешне} \approx 1 + \frac{7,5}{2 \cdot 7,5 + 6 \cdot 2,5 + 2 \cdot 7,5} = 1,17; \quad (3)$$

$$k_{ст}^{КЗ\ внутр} \approx -\frac{7,5}{2 \cdot 7,5 + 6 \cdot 2,5 + 2 \cdot 7,5} = -0,17. \quad (4)$$

В экспериментах с описанным выше реальным трансформатором (конечной длины и $h_{об} < h_{окн}$) с помощью измерительных витков были обнаружены существенно большие значения КМС стержней по сравнению с (3) и (4):

$$k_{ст}^{КЗ\ внешне} = 1,5; \quad (5)$$

$$k_{ст}^{КЗ\ внутр} = -0,52, \quad (6)$$

что в рамках настоящей работы объяснить не удалось. Эксперименты проводились на частоте

$f=1000$ Гц, чтобы обеспечить известное условие $2\pi f L_{K3} \gg R_{обм}$, характерное для силовых трансформаторов. Практически такие же значения КМС для стержней получены в экспериментах и на частотах 500 Гц и 300 Гц.

Постановка задачи численного анализа магнитного поля идеализированного двухстержневого трансформатора

Картина поля в трансформаторе имеет смысл лишь для случаев, когда индукции в любом его месте совпадают по фазе (или находятся в противофазе). Теоретически это условие соблюдается в режимах КЗ, а также при чисто L - или C -нагрузках идеализированного трансформатора, при сопротивлениях обмоток

$$R_1 = R_2 = 0 \tag{7}$$

и пренебрежении потерями в стали магнитопровода. В этих случаях при магнитной проницаемости стали $\mu = \text{const}$ картина поля будет по виду одинаковой в любой момент времени, отличаясь лишь интенсивностью для конкретного момента времени. В данной работе, как и в [4], картина поля строится для действующих значений токов обмоток и все расчеты ведутся относительно действующих значений потоков и индукций. Конечное значение μ позволяет наблюдать распределение магнитного поля в стали. Варьируя значения μ в различных частях магнитопровода, можно косвенно оценить влияние насыщения на изменение картины магнитного поля в трансформаторе.

Необходимость численного анализа полей в данной работе обусловлена, во-первых, тем, что требуется определить условия одновременного появления сверх- и антипотоков в двухстержневых трансформаторах, а также выявить участки их дислокации в магнитопроводе с целью организации соответствующих экспериментов; во-вторых, стремлением оценить в режимах КЗ магнитные потоки в различных частях трансформатора, недоступных для наблюдений в экспериментах; в третьих, задачей оценки точности соотношений (1), (2), что весьма важно для создания корректной теории двухстержневых трансформаторов.

Для построения поля в режиме КЗ с помощью известной программы *ELCUT* необходимо задать токи КЗ I_1^{K3} и I_2^{K3} соответственно во

внутренней и внешней обмотках. Связь между этими токами устанавливается через собственные (L_1, L_2) и взаимную (M) индуктивности обмоток, которые также определяются с помощью программы *ELCUT*. Тем самым исключается предвзятая информация об индуктивности КЗ L_{K3} , ибо она рассчитывается не по приближенным формулам из учебников, а в результате предварительного анализа соответствующих магнитных полей на основе МКЭ.

Примечание 1. Используются небольшие значения относительной магнитной проницаемости стали μ_r (2000, 1000, 100 и т. д.), при которых весьма точно оцениваются значения L_1, L_2 и M в пределах возможностей разбиения областей на конечные элементы, допустимых программой *ELCUT*. При большем μ_r может потребоваться задание более мелкого шага сетки МКЭ, который для программы *ELCUT* может оказаться критическим с точки зрения точности расчетов полей. В данной работе все расчеты выполнены при шаге сетки, равном 0,2 мм.

Часть 1. Идеализированный трансформатор с высотой обмоток, равной высоте его окна

Поскольку поля в двухстержневых трансформаторах обладают как продольной, так и поперечной *антисимметрией*, то далее они будут рассматриваться в пределах сектора второго квадранта прямоугольной системы координат, ограниченного положительной осью y и отрицательной осью x (см. рис. 2). Третьей границей области служит бак трансформатора, играющий роль *идеального электромагнитного экрана* (рис. 3). На этой границе векторный потенциал поля принимается равным нулю. На осях x и y граничное условие задается относительно касательной составляющей напряженности магнитного поля, которая принимается равной нулю ($H_\tau = 0$).

Наиболее просто строится картина поля для режима ХХ: в дополнение к указанным граничным условиям достаточно задаться током в одной из обмоток, равным, например, 1А, и внести в программу значение его плотности в этой обмотке. На рис. 3, а построена картина поля при ХХ внешней обмотки, что потребовало задания тока внутренней обмотки $I_1 = 1$ А. На этой картине демонстрируются положительные направления магнитных потоков при ХХ в различных частях трансформатора, с которыми далее сравниваются направления потоков в режимах КЗ.

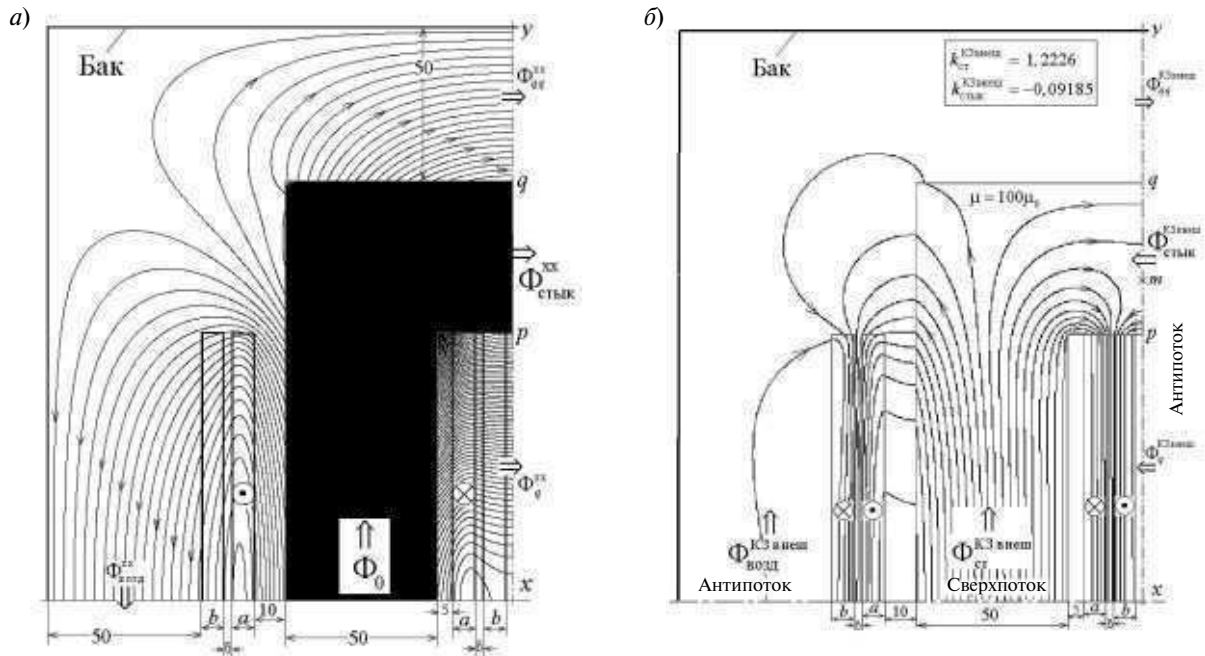


Рис. 3. Магнитное поле двухсержневого трансформатора в режиме XX (а) и короткого замыкания внешней обмотки (б) при $h_{об} = h_{окн}$

Для построения полей в файл исходных данных программы *ELCUT* заносятся: плоскопараллельная геометрия магнитопровода и обмоток; граничные условия; значения относительной магнитной проницаемости магнитопровода μ_r ; плотности токов J_1 и J_2 соответственно внутренней и внешней обмоток.

Определение собственной индуктивности внутренней обмотки L_1 по МКЭ. В основе численного определения собственной индуктивности L_1 лежит энергетическое соотношение для внутренней обмотки с током I_1 :

$$\frac{L_1 I_1^2}{2} = W_1, \quad (8)$$

откуда получаем

$$L_1 = 2 \frac{W_1}{I_1^2} \Rightarrow 2W_1. \quad (9)$$

Задавшись токами обмоток $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = 0 \text{ A}$ и введя в программу *ELCUT* соответствующие плотности токов обмоток

$$J_1 = \frac{(w_1 / 2) I_1}{ah_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0,0075 \cdot 0,175} = 125714 \text{ A/m}^2, \quad (10)$$

$$J_2 = 0, \quad (11)$$

находим энергию магнитного поля W_1 . Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном при $\mu = 100\mu_0$, $h_{об} = h_{окн}$ получено $W_1 = 0,61804 \text{ Дж}$. Следовательно $L_1 = 2W_1 = 2 \cdot 0,61804 = 1,23608 \text{ Гн}$.

Определение собственной индуктивности внешней обмотки L_2 по МКЭ. Задаем токами обмоток $I_1 = 0$, $I_2 = 1 \text{ A}$ и вводим в программу плотности токов

$$J_1 = 0; \quad (12)$$

$$J_2 = \frac{(w_2 / 2) I_2}{bh_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0,0075 \cdot 0,175} = 125714 \text{ A/m}^2. \quad (13)$$

Получив энергию магнитного поля W_2 , находим

$$L_2 = 2 \frac{W_2}{I_2^2} \Rightarrow 2W_2. \quad (14)$$

Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном при $\mu = 100\mu_0$ и $h_{об} = h_{окн}$ получено $W_2 = 0,62028 \text{ Дж}$. Следовательно, $L_2 = 2W_2 = 2 \cdot 0,62028 = 1,24056 \text{ Гн}$.

Определение взаимной индуктивности M между обмотками по МКЭ. Задаем ненулевыми значениями токов в обеих обмотках: $I_1 = 1 \text{ A}$,

$I_2 = 1$ А. Вводим в программу соответствующие плотности токов:

$$J_1 = \frac{(w_1 / 2)I_1}{ah_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0,0075 \cdot 0,175} = 125714 \text{ А/м}^2, \quad (15)$$

$$J_2 = \frac{(w_2 / 2)I_2}{bh_{об}} = \frac{165 \cdot 1}{0,0075 \cdot 0,175} = 125714 \text{ А/м}^2. \quad (16)$$

Программа позволяет найти энергию магнитного поля W , которая, с другой стороны, может быть представлена в виде

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} - M I_1 I_2 + \frac{L_2 I_2^2}{2}. \quad (17)$$

В нашем случае (при $I_1 = 1$ А и $I_2 = 1$ А)

$$W \Rightarrow \frac{L_1}{2} - M + \frac{L_2}{2} \Rightarrow W_1 - M + W_2, \quad (18)$$

где W_1, W_2 — величины, найденные на 1-м и 2-м этапах. Из (18) следует расчетное соотношение

$$M = W_1 + W_2 - W. \quad (19)$$

Для рассматриваемого трансформатора с идеальным экраном и $\mu = 100\mu_0$ получено $W = 0,002837$ Дж. Следовательно,

$$M = 0,61804 + 0,62028 - 0,002837 = 1,235483 \text{ Гн.}$$

Формулы всех трех этапов и результаты расчетов по программе *ELCUT* для различных значений $\mu = \mu, \mu_0$ магнитопровода представлены в табл. 1.

Здесь же представлены индуктивности КЗ при питании трансформатора как со стороны внутренней обмотки ($L_{КЗ}^{КЗ\text{внеш}}$), так и со стороны внешней обмотки ($L_{КЗ}^{КЗ\text{внут}}$).

Сверх- и антипоток в трансформаторе при КЗ внешней обмотки. При численном расчете магнитных полей обычно необходимо задать токи. В нашем случае удобно задаться током $I_1^{КЗ\text{внеш}}$, например $I_1^{КЗ\text{внеш}} = 1$ А. Тогда для тока в короткозамкнутой внешней обмотке имеем

$$I_2^{КЗ\text{внеш}} = -\frac{M}{L_2} I_1^{КЗ\text{внеш}}. \quad (20)$$

Задание тока $I_1^{КЗ\text{внеш}}$ адекватно заданию следующего напряжения на зажимах внутренней обмотки идеализированного трансформатора:

$$U_{\text{внут}}^{КЗ\text{внеш}} = \omega L_{КЗ}^{КЗ\text{внеш}} I_1^{КЗ\text{внеш}}, \quad (21)$$

где

$$L_{КЗ}^{КЗ\text{внеш}} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}. \quad (22)$$

Но при этом же напряжении должен рассматриваться и режим ХХ и определяться поток ХХ — Φ_0 , входящий в выражения КМС (1). Отсюда

$$\Phi_0 = \frac{U_{\text{внут}}^{ХХ}}{\omega w_1} = \frac{U_{\text{внут}}^{КЗ\text{внеш}}}{\omega w_1} = \frac{L_{КЗ}^{КЗ\text{внеш}}}{w_1} I_1^{КЗ\text{внеш}}, \quad (23)$$

Таблица 1

Собственные и взаимные индуктивности обмоток трансформатора с идеальным электромагнитным экраном при $h_{об} = h_{окн}$

Параметр	Значение параметра при указанных $\mu = \mu, \mu_0$				
	$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	$\mu = \mu_0$
$L_1, \text{ Гн}$	24,479	12,245	1,2360	0,1339	0,0205
$L_2, \text{ Гн}$	24,483	12,250	1,2405	0,1385	0,0256
$M, \text{ Гн}$	24,478	12,245	1,2354	0,1334	0,0204
$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	0,99989	0,99979	0,9977	0,9795	0,8892
$L_{КЗ}^{КЗ\text{внеш}} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$	0,00520	0,00520	0,00565	0,00542	0,00429
$L_{КЗ}^{КЗ\text{внут}} = L_2 - \frac{M^2}{L_1}$	0,00520	0,00520	0,00567	0,00560	0,00537

что позволяет представить (1) в следующем удобном для численного анализа виде:

$$k_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}} = \frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} \Big|_{\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{XX}} = \dot{U}_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}} = w_1 \frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}} I_1^{\text{КЗ внеш}}} \quad (24)$$

Аналогично для КМС в средней части стыкового ярма можно записать

$$k_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}} = \frac{\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}}{\Phi_0} \Big|_{\dot{U}_{\text{внут}}^{\text{XX}} = \dot{U}_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}} = w_1 \frac{\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}} I_1^{\text{КЗ внеш}}} \quad (25)$$

Величины $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}$ и $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ определяются с помощью программы *ELCUT*.

Примечание 2. Значение μ сердечника при XX не связано со значением μ стали при КЗ. Поэтому определять ток намагничивания при XX, который обеспечивает поток Φ_0 XX трансформатора, из цепочки равенств

$$I_0 = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{XX}}}{\omega L_1} = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{КЗ внеш}}}{\omega L_1} = \frac{L_{\text{КЗ}}^{\text{КЗ внеш}}}{L_1} I_1^{\text{КЗ внеш}} = (1 - k^2) I_1^{\text{КЗ внеш}}, \quad (26)$$

бессмысленно, поскольку при XX μ сердечника, а вместе с ним и L_1 , могут во много раз превышать их значения в режиме КЗ. Из картины поля (рис. 3, б), построенной при $\mu = \mu_{\text{ст}} = \mu_{\text{стык}} = 100\mu_0$, видно, что для рассматриваемого режима КЗ следует задавать $\mu_{\text{ст}} \ll \mu_{\text{стык}}$. Однако в данной работе для облегчения понимания ее содержания принимается $\mu_{\text{ст}} = \mu_{\text{стык}} = \mu$; получаемые при этом картины поля следует рассматривать в качестве промежуточного этапа для последующего осознанного выбора $\mu_{\text{ст}}$ и $\mu_{\text{стык}}$.

Последовательность подготовительных расчетов для построения поля и определения потоков отражена в поз. 1–4 табл. 2. Задается ток внутренней обмотки $I_1^{\text{КЗ внеш}} = 1$ А. По формуле (20) вычисляется ток в короткозамкнутой обмотке $I_2^{\text{КЗ внеш}}$ и определяются заносимые в программу *ELCUT* плотности токов КЗ в обмотках:

$$J_1^{\text{КЗ внеш}} = \frac{(w_1 / 2) I_1^{\text{КЗ внеш}}}{ah_{\text{об}}};$$

$$J_2^{\text{КЗ внеш}} = - \frac{(w_2 / 2) I_2^{\text{КЗ внеш}}}{bh_{\text{об}}}. \quad (27)$$

В поз. 5 — поток XX Φ_0 , найденный по формуле (23). Прямым делением найденных программой значений потоков $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗ внеш}}$ и $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ в средних частях стержня и стыкового ярма на поток XX Φ_0 вычислены соответствующие значения КМС, приведенные в поз. 6 и 7. Все потоки, полученные с помощью программы, изображены в табл. 2 подчеркнутыми; это означает, что все они отнесены к потоку Φ_0 . Поток $\Phi_{\text{возд}}^{\text{КЗ внеш}}$ от обмоток до бака имеет отрицательный знак и может рассматриваться как антипоток (весьма незначительный), пронизывающий внешнюю короткозамкнутую обмотку. Величины $\Phi_{a/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\Phi_{a/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\Phi_{b/\text{слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\Phi_{b/\text{справа}}^{\text{КЗ внеш}}$ в поз. 9–12 представляют собой относительные значения потоков в толщах соответственно левых и правых половинок обмоток. Примечательно, что значения этих величин справа и слева практически одинаковы (за исключением случая $\mu = \mu_0$). Также практически совпадают значения потоков слева и справа в промежутках между обмотками ($\Phi_{\delta\text{-слева}}^{\text{КЗ внеш}}$, $\Phi_{\delta\text{-справа}}^{\text{КЗ внеш}}$), приведенных в поз. 13–14.

Образование антипотока в стыковом яре трансформатора при $h_{\text{об}} = h_{\text{окн}}$ является неожиданным и в этом смысле может рассматриваться как важное для теории трансформаторов открытие. Примечателен сам факт *существования* в стали ярма встречно направленных потоков с разветвлением в точке *m* (рис. 3, б), в которой магнитная индукция обращается в ноль. Более наглядная картина разветвления потоков представлена на рис. 4, а (для случая $\mu = 100\mu_0$), из нее следует, что антипоток $\Phi_{\text{стык}}^{\text{КЗ внеш}}$ формируется из разности двух потоков, один из которых (Φ_{mp}) действительно ориентирован встречно направлению потока XX, а другой, существенно меньший (Φ_{mq}), — по направлению потока XX. Положение точки разветвления *m* в табл. 2 представлено отношением отрезков mp / pq , а соотношение между встречно направленными потоками в стыковом яре — отношением Φ_{mq} / Φ_{mp} . Реальный антипоток Φ_{mp} пронизывает только короткозамкнутую (внешнюю) обмотку в окне трансформатора.

Таблица 2

**Подготовительные расчеты к построению картины магнитного поля и расчету КМС
при короткозамкнутой внешней обмотке ($h_{об} = h_{окн}$)**

№	Параметр	Значения параметров при указанных $\mu = \mu_r \mu_0$				
		$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	$\mu_{Fe} = \mu_0$
1	$J_1^{КЗвнеш}$	1	1	1	1	1
2	$J_2^{КЗвнеш}$ см.(20)	-0,999812	-0,99959	-0,9959	-0,963098	-0,79476
3	$J_1^{КЗвнеш}$ см.(27)	125714	125714	125714	125714	125714
4	$J_2^{КЗвнеш}$ см.(27)	-125690	-125663	-125200	-121075	-99912
5	Φ_0 (Вб) см. (23)	$1,575 \cdot 10^{-5}$	$1,575 \cdot 10^{-5}$	$1,713 \cdot 10^{-5}$	$1,643 \cdot 10^{-5}$	$1,300 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{КЗвнеш}$ см. (24)	1,1949	1,3198	1,2226	1,1949	0,9058
7	$k_{стык}^{КЗвнеш}$ см. (25)	-0,1713	-0,1150	-0,0918	-0,1125	-0,0801
8	$\Phi_{возд}^{КЗвнеш}$	-0,0526	-0,0483	-0,0469	-0,0386	-0,0171
9	$\Phi_{a/слева}^{КЗвнеш}$	0,2788	0,2564	0,2546	0,2492	0,2025
10	$\Phi_{a/справа}^{КЗвнеш}$	0,2819	0,2591	0,2573	0,2517	0,2038
11	$\Phi_{b/слева}^{КЗвнеш}$	0,2788	0,2547	0,2538	0,2574	0,2713
12	$\Phi_{b/справа}^{КЗвнеш}$	0,2819	0,2592	0,2583	0,2609	0,2724
13	$\Phi_{\delta/слева}^{КЗвнеш}$	0,1865	0,1715	0,1709	0,1728	0,1811
14	$\Phi_{\delta/справа}^{КЗвнеш}$	0,1879	0,1727	0,1721	0,1738	0,1815
15	Φ_{qq}	-0,0051	-0,0050	-0,0033	0,0079	0,0267
16	Φ_q	-0,000084	-0,000229	0,00241	0,0107	-0,0552
17	$\Phi_{x=0}^{общ}$	-0,1764	-0,1198	-0,0927	-0,0945	-0,1147
18	$\frac{mp}{pq}$	0,37	0,33	0,326	0,35	0,35
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	2,69	1,85	1,7	2,15	3,19

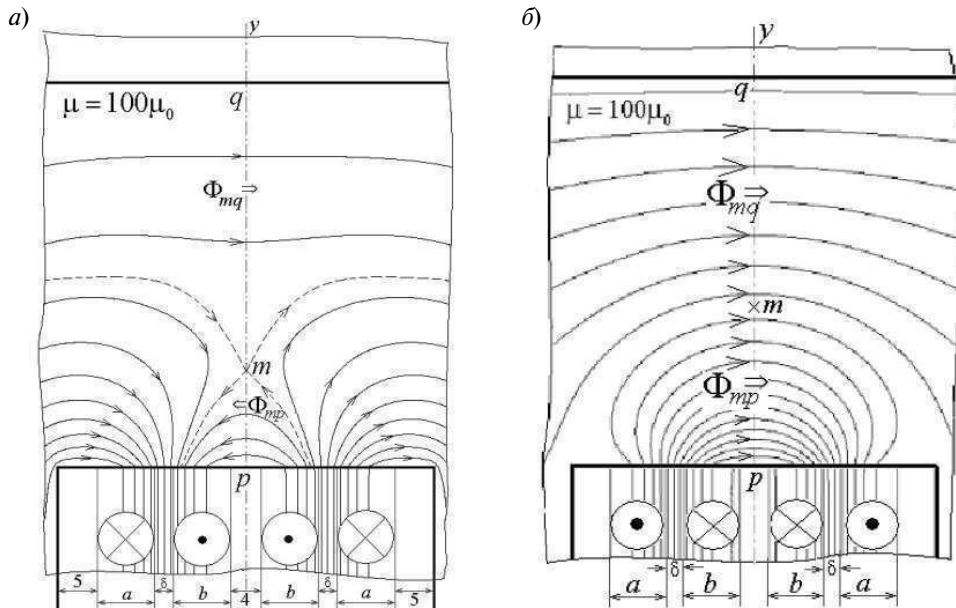


Рис.4. Магнитное поле в верхнем стыковом ярме двухстержневого трансформатора при короткозамкнутой внешней обмотке шириной b (а) и при короткозамкнутой внутренней обмотке шириной a (б) при условии $h_{об} = h_{окн}$

Поперечные по отношению к оси y потоки Φ_{qq} (от стыкового ярма до бака), $\Phi_{стык} = k_{стык}^{КЗ\text{внеш}}$ (в средней части стыкового ярма) и Φ_q (в окне трансформатора) создают *общий антипоток*, равный (с учетом принятых на рис. 3, а направлений)

$$\Phi_{|x=0}^{общ} = \Phi_q + \Phi_{стык} + \Phi_{qq}. \quad (28)$$

В частности, согласно табл. 2 при $\mu = 100\mu_0$ имеем

$$\begin{aligned} \Phi_{|x=0}^{общ} &= 0,00241 - 0,09185 - 0,0033 = \\ &= -0,0927. \end{aligned} \quad (29)$$

Значения $\Phi_{|x=0}^{общ}$ приведены в поз. 17 табл. 2.

Примечание 3. Из табл. 2 следует, что знаки потоков Φ_{qq} и Φ_q зависят от значения μ . Отрицательный знак Φ_{qq} является признаком появления дополнительной точки ветвления на оси y между стыковым ярмом и баком, а положительный знак Φ_q — признаком образования замкнутых линий поля в промежутке между внешними обмотками. Важно отметить, что при $h_{об} = h_{окн}$ знаки величин в поз. 7 и поз. 17 совпадают и являются отрицательными.

Примечание 4. В отличие от броневого трансформатора, в котором при любом КЗ отсутствуют общие потоки, т. е. потоки в стали, охватывающие

одновременно обе обмотки, в двухстержневом трансформаторе при КЗ внешней обмотки он присутствует в виде потока в стали Φ_{mq} (рис. 3, б). Однако он охватывает не две, а одновременно все четыре обмотки! Его соседство в точке раздела m с антипоток Φ_{mp} опровергает сформулированный автором [5] принцип: «в любом поперечном сечении магнитопровода не может быть одновременно два противоположно направленных и территориально разделенных потока».

Сверх- и антипотoki в трансформаторе при КЗ внутренней обмотки. Алгоритм построения картины поля аналогичен изложенному выше, и для случая, когда $h_{об} = h_{окн}$, можно воспользоваться данными табл. 1. Отличие состоит в том, что теперь первичной становится внешняя обмотка шириной b , и, следовательно, изменятся, как показано в табл. 3, подготовительные расчеты при определении токов обмоток и их плотностей, поскольку теперь изначально необходимо задаться током внешней обмотки $I_2^{КЗ\text{внут}} = 1$ А, а ток внутренней обмотки определить по формуле

$$I_1^{КЗ\text{внеш}} = -\frac{M}{L_1} I_2^{КЗ\text{внеш}}. \quad (30)$$

Формула для потока XX принимает вид

$$\Phi_0 = \frac{U_{\text{внеш}}^{XX}}{\omega w_2} = \frac{U_{\text{внеш}}^{КЗ\text{внут}}}{\omega w_2} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{КЗ\text{внут}}}{w_2} I_2^{КЗ\text{внеш}}. \quad (31)$$

Таблица 3

Подготовительные расчеты к построению картины магнитного поля и расчету КМС при короткозамкнутой внутренней обмотке ($h_{об} = h_{окн}$)

№	Параметр	Значения параметров при указанных $\mu = \mu_r \mu_0$				
		$2000\mu_0$	$1000\mu_0$	$100\mu_0$	$10\mu_0$	μ_0
1	$I_2^{КЗвнут}$	1	1	1	1	1
2	$I_1^{КЗвнеш}$, А, см. (30)	-0,999975	-0,99998	-0,9995	-0,99628	-0,99492
3	$J_1^{КЗвнут}$	-125710	-125712	-125654	-125247	-125075
4	$J_2^{КЗвнут}$	125714	125714	125714	125714	125714
5	Φ_0 , Вб, см. (31)	$1,575 \cdot 10^{-5}$	$1,576 \cdot 10^{-5}$	$1,719 \cdot 10^{-5}$	$1,700 \cdot 10^{-5}$	$1,628 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{КЗвнут}$	-0,2144	-0,3259	-0,2211	-0,1841	-0,0959
7	$k_{стык}^{КЗвнут}$	1,2190	1,105	1,07	0,947	0,4584
8	$\Phi_{возд}^{КЗвнут}$	0,05289	0,0530	0,04679	0,07702	0,1815
9	$\Phi_{a/слева}^{КЗвнут}$	0,2789	0,2787	0,2552	0,2545	0,2487
10	$\Phi_{a/справа}^{КЗвнут}$	0,2890	0,2817	0,2582	0,2596	0,2680
11	$\Phi_{b/слева}^{КЗвнут}$	0,2769	0,2767	0,2553	0,2520	0,2463
12	$\Phi_{b/справа}^{КЗвнут}$	0,2820	0,2817	0,2582	0,2604	0,2706
13	$\Phi_{\delta_слева}^{КЗвнут}$	0,1865	0,1864	0,1839	0,1713	0,1730
14	$\Phi_{\delta_справа}^{КЗвнут}$	0,1879	0,1877	0,1721	0,1735	0,1804
15	Φ_{qq}	0,0054	0,0056	0,0093	0,0435	0,1568
16	Φ_q	0,00078	0,00137	0,01345	0,1132	0,4620
17	$\Phi_{x=0}^{общ}$	1,2257	1,1125	1,0927	1,1033	1,0773
18	$\frac{mp}{pq}$	0,44	0,44	0,43	0,43	0,55
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	1,76	1,75	1,71	2,1	3,3

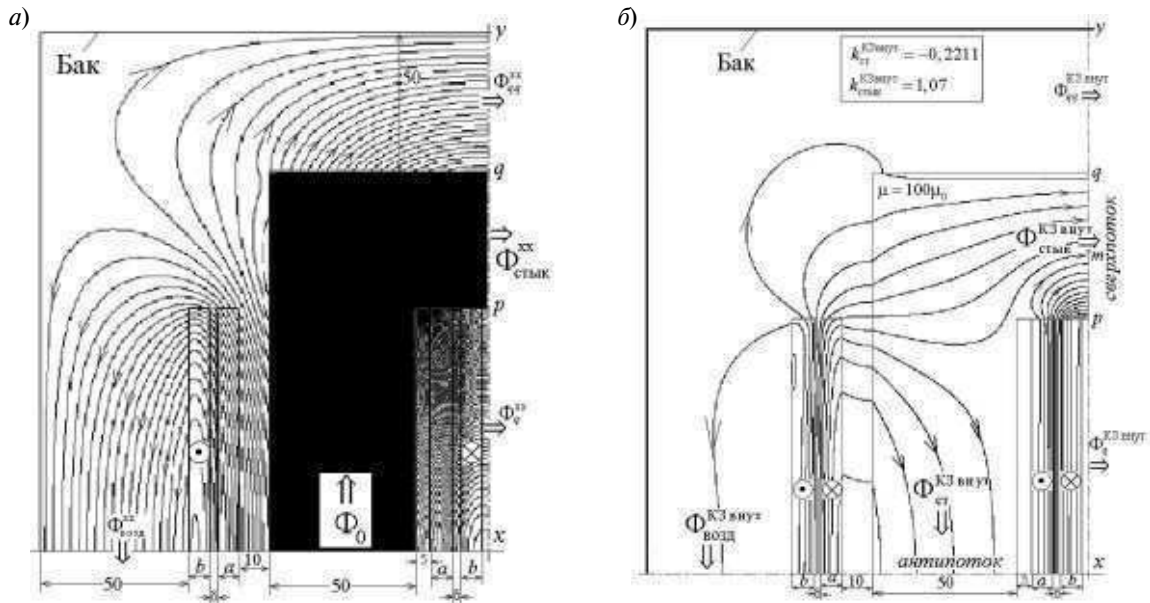


Рис. 5. Магнитное поле двухстержневого трансформатора в режиме XX (а) и короткого замыкания внутренней обмотки (б) при $h_{об} = h_{окн}$

Определив плотности токов в обмотках и занеся их в программу *ELCUT*, получим картины полей при XX и КЗ (рис. 5). Из анализа табл. 3 и рис. 5, б следует:

антипоток возникает в стержне и занимает значительную часть сечения левой половины короткозамкнутой внутренней обмотки;

значения потоков в толщах левых и правых половинок обмоток практически одинаковы; также практически совпадают значения приведенных в поз. 13–14 потоков слева и справа в промежутках между обмотками;

сверхпоток имеет место в стыковом ярме (см. также рис. 4, б); в точке соприкосновения *t* происходит объединение потока Φ_{mq} , исходящего из левых половин обмоток вне окна, с потоком Φ_{mr} , исходящим из правых половин обмоток в окне трансформатора;

все поперечные по отношению к оси *y* потоки (Φ_{qq} , $\Phi_{стык}$, Φ_q) ориентированы одинаково и потому входят в (28) со знаком плюс; в частности согласно табл. 3 при $\mu = 100\mu_0$ имеем

$$\Phi_{|x=0}^{общ} = 0,0093 + 1,07 + 0,01345 = 1,0927 \quad (32)$$

(значения $\Phi_{|x=0}^{общ}$ приведены в поз. 17 табл. 3);

в отличие от случая КЗ внешней обмотки (см. примечание 4) при КЗ внутренней обмот-

ки общего потока в стали, охватывающего одновременно две или четыре обмотки, не существует!

Часть 2. Идеализированный трансформатор с укороченной высотой обмоток

Физические процессы в стыковом ярме короткозамкнутого трансформатора с укороченными обмотками, т. е. при $h_{об} < h_{окн}$, значительно сложнее, что, в частности, подтверждается картинками магнитных полей, представленными на рис. 6 и рис. 7 в случае $\mu = 100\mu_0$ для двух вариантов укорочения обмотк. Эти картины показывают, что *допущение о почти отсутствии поля в пространстве между внешними обмотками в окне (практически соблюдающееся при $h_{об} = h_{окн}$) в данном случае не выполняется.*

Методика построения полей не отличается от алгоритма, приведенного в первой части работы. Результаты расчета индуктивностей укороченных обмоток на основе МКЭ приведены в табл. 4 (аналог табл. 1).

Подготовительные расчеты и потоки в различных частях трансформатора при КЗ **внешней обмотки**, полученные по программе *ELCUT*, приведены в табл. 5, составленной по аналогии с табл. 2.

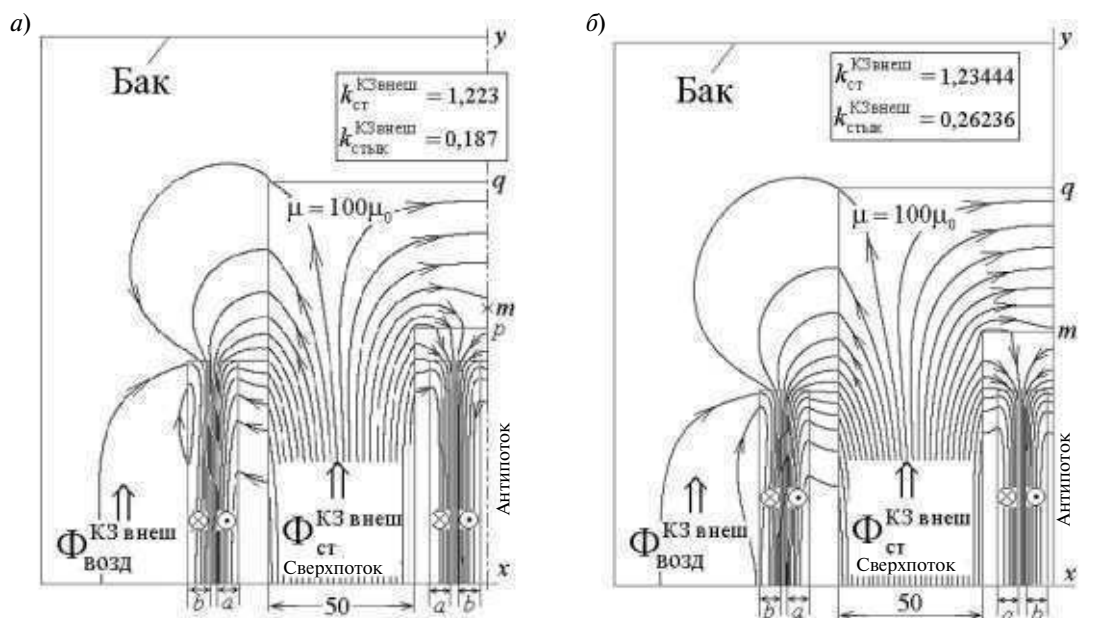


Рис. 6. Магнитное поле при короткозамкнутой внешней обмотке трансформатора с укороченными обмотками высотой $h_{об} = 0,874h_{окн}$ (а) и $h_{об} = 0,77h_{окн}$ (б)

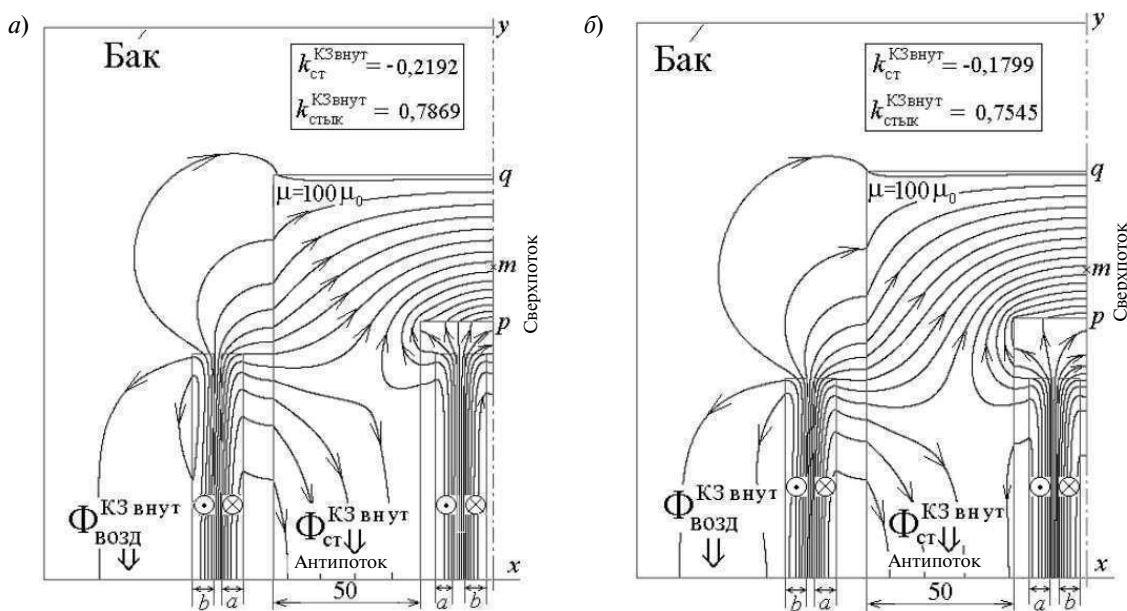


Рис. 7. Магнитное поле при короткозамкнутой внутренней обмотке трансформатора с укороченными обмотками высотой $h_{об} = 0,874h_{окн}$ (а) и $h_{об} = 0,77h_{окн}$ (б)

Таблица 4

Собственные и взаимные индуктивности обмоток трансформатора с идеальным электромагнитным экраном при $h_{об} = h_{окн}$ и $\mu = 100\mu_0$

Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
	$h_{об} = 0,874h_{окн} = 153$ мм	$h_{об} = 0,77h_{окн} = 135$ мм
L_1 , Гн	1,24125	1,24648
L_2 , Гн	1,24528	1,25032
M , Гн	1,2401	1,2449
$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$	0,99744	0,99719
$L_{кз}^{кз\text{внеш}} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$	0,0063385	0,007070
$L_{кз}^{кз\text{внут}} = L_2 - \frac{M^2}{L_1}$	0,0063588	0,007092

Таблица 5

Подготовительные расчеты к построению картины магнитных полей в случае КЗ внешней обмотки трансформатора с укороченными обмотками и $\mu = 100\mu_0$

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0,874h_{окн} = 153$ мм (рис. 6, а)	$h_{об} = 0,77h_{окн} = 135$ мм (рис. 6, б)
1	$I_1^{кз\text{внеш}}$, А	1	1
2	$I_2^{кз\text{внеш}}$ (см. (20))	-0,99584	-0,99590
3	$J_1^{кз\text{внеш}}$ (см. (27))	143790	163265
4	$J_2^{кз\text{внеш}}$ см. (27)	-143193	-162552
5	Φ_0 (см. (23))	$1,92075 \cdot 10^{-5}$	$2,1424 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{кз\text{внеш}}$ (см. (24))	1,223	1,234
7	$k_{стык}^{кз\text{внеш}}$ (см. (25))	0,1869	0,26236
8	$\Phi_{возд}^{кз\text{внеш}}$	0,0590	0,0714
9	$\Phi_{a/\text{слева}}^{кз\text{внеш}}$	0,2624	0,2621
10	$\Phi_{a/\text{справа}}^{кз\text{внеш}}$	0,2588	0,2672
11	$\Phi_{b/\text{слева}}^{кз\text{внеш}}$	0,2575	0,2602

Окончание табл. 5

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0,874h_{окн} = 153$ мм (рис. 6, а)	$h_{об} = 0,77h_{окн} = 135$ мм (рис. 6, б)
12	$\Phi_{b/справа}^{КЗ\text{ внеш}}$	0,2635	0,2682
13	$\Phi_{\delta\text{ слева}}^{КЗ\text{ внеш}}$	0,1739	0,1765
14	$\Phi_{\delta\text{ справа}}^{КЗ\text{ внеш}}$	0,1756	0,1787
15	Φ_{qq}	-0,0012	-0,0013
16	Φ_q	-0,2891	-0,3618
17	$\Phi_{x=0}^{общ}$	-0,1043	-0,1008
18	$\frac{mp}{pq}$	0,09	0,00
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	0,055	0,000

Сравнение картины поля на (рис. 3, б) с полями на рис. 6 показывает: чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе *точка ветвления потоков* t к точке p на границе окна и стыкового ярма. На рис. 6, б точка t практически совпадает с этой границей, и весь антипоток оказывается в окне между внешними обмотками. Поэтому знаки коэффициента $k_{стык}^{КЗ\text{ внеш}}$ в табл. 5 (в отличие от табл. 2) положительны. А это означает, что в эксперименте с измерительными витками, охватывающими середину стыкового ярма, антипоток не выявится, потому что там он либо очень слабый, либо практически отсутствует. Чтобы его «поймать» следует поместить измерительные витки в воздушном промежутке между внешними обмотками в окне. Отрицательный знак Φ_{qq} указывает на наличие дополнительной точки разветвления в промежутке между стыковым ярмом и баком.

Подготовительные расчеты и потоки в различных частях трансформатора при КЗ **внутренней** обмотки, полученные по программе *ELCUT* при $h_{об} < h_{окн}$ и $\mu = 100\mu_0$, приведены в табл. 6 (аналог табл. 3), а картины полей — на рис. 7.

Сравнение картины поля на рис. 5, б с полями на рис. 7 показывает, что и здесь чем сильнее укорочение обмоток, тем ближе *точка ветвления потоков* t к точке p на границе окна и стыково-

го ярма. Экспериментально обнаружить сверхпоток в стыковом ярме с помощью измерительных витков, охватывающих середину стыкового ярма, невозможно, потому что существенную его часть составляет поток Φ_q между внешними обмотками в окне трансформатора.

Картины всех магнитных полей (рис. 3–7) согласуются с очевидным положением, что отбрасываемая при их построении часть трансформатора, расположенная справа от оси u , может быть заменена условным *боковым ярмом* с $\mu = \infty$, что важно с точки зрения возможной идентификации двухстержневого трансформатора с броневым и его 2Т-образной схемой замещения. Однако отмеченное положение не всегда соблюдают. В качестве примера на рис. 8 приведены «картины замыкания магнитных потоков» при КЗ в двухстержневых трансформаторах «без боковых ярм», как их (т. е. эти картины) представляли в 70-е годы прошлого столетия [5]. Автор [5] утверждает, что «они получены путем измерений потоков в геометрических моделях мощных трансформаторов, выполненных в масштабе 1:3, на повышенной частоте для соблюдения условия (7)».

Однако их сравнение с картинами полей на рис. 6 и 7 показывает, что в [5] неточно интерпретированы результаты опытных измерений.

Таблица 6

Подготовительные расчеты к построению картины магнитных полей в случае КЗ внутренней обмотки трансформатора с укороченными обмотками и $\mu = 100\mu_0$

№	Параметр	Величины параметров при двух значения $h_{об}$	
		$h_{об} = 0,874h_{окн} = 153 \text{ мм}$ (рис. 7, а)	$h_{об} = 0,77h_{окн} = 135 \text{ мм}$ (рис. 7, б)
1	$I_2^{КЗвнут}, \text{ А}$	1	1
2	$I_1^{КЗвнут}$ (см. (30))	-0,99905	-0,99840
3	$J_1^{КЗвнут}$	-143654	-163004
4	$J_2^{КЗвнут}$	143791	163265
5	Φ_0 (см. (31))	$1,92693 \cdot 10^{-5}$	$2,1491 \cdot 10^{-5}$
6	$k_{ст}^{КЗвнут} = \frac{\Phi_{ст}^{КЗвнут}}{\Phi_0}$	-0,2192	-0,1799
7	$k_{стык}^{КЗвнут} = \frac{\Phi_{стык}^{КЗвнут}}{\Phi_0}$	0,78695	0,75455
8	$\Phi_{возд}^{КЗвнут}$	0,06476	0,07855
9	$\Phi_{a/слева}^{КЗвнут}$	0,2593	0,2626
10	$\Phi_{a/справа}^{КЗвнут}$	0,2632	0,2681
11	$\Phi_{b/слева}^{КЗвнут}$	0,2567	0,2593
12	$\Phi_{b/справа}^{КЗвнут}$	0,2635	0,2682
13	$\Phi_{\delta_слева}^{КЗвнут}$	0,1737	0,1762
14	$\Phi_{\delta_справа}^{КЗвнут}$	0,1756	0,1787
15	Φ_{qq}	0,0083	0,0079
16	Φ_q	0,3105	0,3878
17	$\Phi_{x=0}^{общ}$	1,1058	1,1517
18	$\frac{mp}{pq}$	0,34	0,31
19	$\frac{\Phi_{mp}}{\Phi_{mq}}$	1,25	0,579

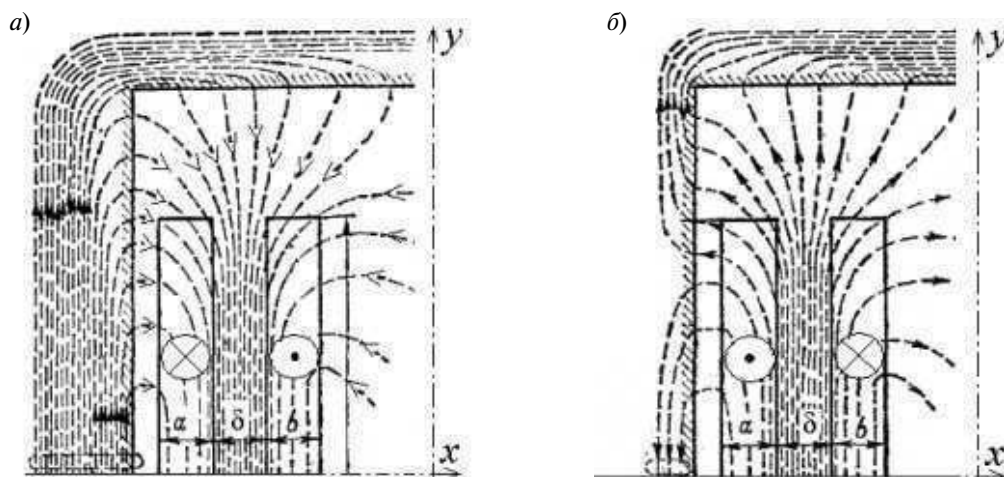


Рис. 8. Картины магнитных потоков при КЗ внешней обмотки (а) и внутренней обмотки (б), приведенные в [5] с добавлением осей x, y

Это выражается, во-первых, в небрежности изображения форм линий, пересекающих ось y (они должны быть перпендикулярны оси y), и, во-вторых, в полном пренебрежении влиянием на поле трансформатора токов *половин* обмоток, расположенных вне его окна (также поступают авторы всех учебников при выводе сопротивления КЗ трансформатора). Кроме того, автором [5] не представлен ни один случай экспериментального наблюдения сверхтока и антитока в стыке двухстержневого трансформатора, что имеет место при $h_{обм} = h_{окн}$.

Примечание 5. Возможное оправдание картин на рис. 8 тем, что они построены на основе измерений в *трехмерных* моделях, неприемлемо, поскольку в трехмерных моделях доля частей обмоток, расположенных вне окна, увеличивается с половины до 3/4. Соответственно повышается и роль их токов в картине магнитного поля трансформатора. Сомнительно также обоснование того, что можно пренебрегать ролью левых половин обмоток в представлении двухстержневого трансформатора как результата *распрямления* броневых трансформатора, предварительно разрезанного по одной из его азимутальных плоскостей (подобно *распрямлению* электрических машин). Из сказанного вытекает необходимость более тщательного сопоставления методов моделирования полей, что выходит за рамки настоящей работы.

Результаты [5] следует рассматривать в качестве дополнительных аргументов к необходимости пересмотра и обновления теории двухстержневых трансформаторов. Следует подчеркнуть

справедливость установленного автором [5] экспериментально (с помощью измерительных витков) наблюдения: хотя картина магнитного поля в магнитопроводе *«принципиально зависит от расположения короткозамкнутой обмотки, вне магнитопровода — практически нет»*. Это также подтверждается сопоставлением картин полей на рисунках 3, б и 5, б; 6, а и 7, а; 6, б и 7, б, наконец, просто из сравнения полей на рис. 4. Наблюдение [5] следует дополнить вытекающим из сопоставления поз. 9–14 таблиц 2, 3, 5 и 6 положением о практическом совпадении значений потоков, пронизывающих половины обмоток вне и внутри окна. Это важно с точки зрения *породнения* броневых и двухстержневых трансформаторов и адаптации 2Т-образной схемы замещения броневых трансформаторов для описания поведения двухстержневого трансформатора.

Приведенные в работе картины магнитных полей показали, что, как и в броневом, в двухстержневом трансформаторе аномальные потоки КЗ существуют попарно: одновременно со сверхтоком в одной его части возникает антипоток в другой его части (и наоборот).

При КЗ и в броневых, и в двухстержневых трансформаторах наблюдаются сгущения магнитных линий в областях стыковых ярем, к которым непосредственно прилегают обмотки. Из этого следует, что, вопреки распространенному мнению, независимо от размеров поперечных

сечений стыковых ярем в указанных областях при КЗ возможно сильное насыщение стали.

Примеры картин магнитных полей могут быть использованы для постановки физических экспериментов в реальных устройствах, что

важно для обновления теории двухстержневых трансформаторов и построения более корректных их схем замещения, в которых естественным образом учитывались бы обнаруженные в работе явления.

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. **Шакиров, М.А.** Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук,

Дуань Лиун // Электротехника.— 2010. № 3.— С. 55–63.

4. **Шакиров, М.А.** Картины аномальных магнитных потоков в броневых трансформаторах при коротких замыканиях [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиун // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. №1(95).— С. 107–120.

5. **Григорьев, И.Б.** Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом потока рассеяния [Текст] / И.Б. Григорьев // Электротехника.— 1975. № 4.

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. **Shakirov M.A., Andrushchuk V.V., Duan' Liun.** Anomal'nye magnitnye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom замыкании // Elektrichestvo.— 2010. № 3.— S. 55–63. (rus.)

4. **Shakirov M.A., Varlamov Yu.V., Duan' Liun.** Kartiny anomal'nykh magnitnykh potokov v bronevykh transformatorakh pri korotkikh замыкании [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №1(95).— P. 107–120. (rus.)

5. **Grigoriev I.B.** Potoki v magnitoprovodakh moshchnykh silovykh transformatorov i avtotransformatorov s uchetom potoka rasseianiia [Tekst] // Elektrotekhnik 1975. № 4. (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

ВАРЛАМОВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия; e-mail: vyv2@rambler.ru

AUTHORS

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

VARLAMOV Yuriy V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vyv2@rambler.ru