

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.02

УДК 621.314

И.С. Снитько¹, А.И. Тихонов²

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

²Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина, Иваново, Российская Федерация

УТОЧНЕНИЕ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА ПОЛЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

При построении имитационных моделей силовых трансформаторов, называемых по-другому цифровыми двойниками, применяемых на всех этапах его жизненного цикла и соответствующих довольно жестким требованиям с точки зрения точности и быстродействия, определяющее значение имеет верное определение параметров объекта. Под параметрами силового трансформатора понимаются не только переменные, используемые в традиционных математических моделях, но и параметры, ранее в них не учитываемые, но необходимые для создания цифровых двойников, отвечающих заданным требованиям. **Цель работы** заключается в разработке методики уточнения активных сопротивлений обмоток силового трансформатора с учетом добавочных потерь в обмотках и потерь в баке. Решение данной задачи включает в себя подзадачу по уточнению потерь в баке силового трансформатора и, возможно, с использованием полевых задач, которые, в свою очередь, требуют обоснования граничных условий. Для решения поставленных задач использован метод конечных элементов для расчета магнитного поля в двумерной постановке. **Результаты:** обоснован выбор граничных условий при построении полевых моделей силовых трансформаторов, определена зависимость удельных потерь в стальных элементах конструкции от индукции возле стенки данной конструкции, а также сформулирована методика уточнения потерь в баке трансформатора с последующим уточнением активных сопротивлений трансформатора. Полученные выводы могут быть использованы при разработке цифровых двойников силовых трансформаторов, применяемых на всех этапах жизненного цикла объекта. Кроме того, разработанная методика может быть распространена на специальные трансформаторы, а также трансформаторы с нестандартной конфигурацией для уточнения их параметров.

Ключевые слова: силовой трансформатор, имитационная модель, цифровой двойник, потери в баке, уточнение потерь, полевая модель.

I.S. Snitko¹, A.I. Tihonov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russian Federation

SPECIFICATION OF THE ACTIVE RESISTANCES OF THE POWER TRANSFORMER BASED ON THE RESULTS OF THE CALCULATION OF FIELD MODELS

When building simulation models of power transformers, called, in other words, digital twins, used at all stages of its life cycle and meeting fairly stringent requirements in terms of accuracy and speed, the correct determination of the object's parameters is crucial. The parameters of a power transformer are understood not only as variables used in traditional mathematical models, but also as parameters that were not previously taken into account in them, but are necessary to create digital counterparts that meet specified requirements. **The purpose of the work** is to develop a methodology for clarifying the active resistances of the windings of a power transformer, taking into account additional losses in the windings and losses in the tank. The solution to this problem includes a subtask for clarifying losses in the tank of a power transformer and is possible using field tasks, which, in turn, require justification of boundary conditions. To solve the tasks set, the finite element method was used to calculate the magnetic field in a two-dimensional formulation. **Results:** the choice of boundary conditions in the construction of field models of power transformers is justified, the dependence of specific losses in steel structural elements on induction near the wall of this structure is determined, and a method for clarifying losses in the transformer tank with subsequent refinement of the active resistances of the transformer is formulated. The obtained conclusions can be used in the development of digital counterparts of power transformers used at all stages of the object's life cycle. In addition, the developed technique can be extended to special transformers, as well as transformers with non-standard configuration to clarify their parameters.

Keywords: power transformer, simulation model, digital twin, tank losses, loss refinement, field model.

Введение

Развитие современных науки и производства напрямую связано с цифровизацией экономики [1, 2]. Энергетическая сфера движется в русле концепции «Цифровая трансформация 2030» [3], в рамках которой должен быть реализован «технологический обмен информацией в объеме задач оперативно-технологического управления» [3].

Для оперативного анализа состояния оборудования по результатам данных, снятых с эксплуатируемого оборудования, целесообразно использовать так называемые «цифровые двойники» (ЦД), представляющие собой имитационные модели, которые с высокой точностью и быстродействием позволяют воспроизводить возможные последствия произошедших событий и принятых решений [4].

Кроме цифровых двойников, применяемых на стадии эксплуатации оборудования, стандарт [4] предполагает и возможность разработки цифрового прототипа изделия, разрабатываемого на этапе проектирования. К данным моделям также предъявляются жесткие требования с точки зрения отнесения их к классу имитационных моделей [5].

В энергетической сфере наиболее трудоемким с точки зрения разработки имитационных моделей является оборудование подстанций ввиду сложности конструкции, разнообразия режимов работы и большого числа влияющих факторов. Распределительные электрические сети 6–10 кВ являются наиболее масштабными в составе ПАО «Россети» с точки зрения количества оборудования. При этом износ трансформаторного оборудования на конец 2022 г. превышает 80 % [6], что свидетельствует о большой потребности в новом оборудовании в скором времени. Исходя из этого, на сегодняшний день именно силовые трансформаторы для распределительных сетей нуждаются в своевременной диагностике и анализе режимов работы, а также детальном проектировании с последующим внедрением в цифровую сеть энергосистемы в целом. В настоящее время проблеме разработки цифровых двойников посвящено большое число работ, причем подходы различаются достаточно сильно [7–9].

Вопросы, связанные с созданием цифровых двойников вновь изготавливаемых силовых трансформаторов, усложняются следующими аспектами:

– сложность достаточно точного описания характеристик материалов, из которых производится оборудование, усугубляемая технологическими особенностями их обработки при изготовлении трансформатора. В первую очередь речь идет о стали, из которой выполняется магнитопровод: кривая намагничивания может различаться даже внутри одной партии, а изменение свойств в процессе раскроя и сборки носит случайный характер;

– параметры трансформатора, определенные на этапе проектирования, носят довольно приближенный характер, что заложено в методику проектирования и приемки трансформатора допускаемыми отклонениями [10];

– в целом методика проектирования, используемая до настоящего времени, разработана в середине прошлого века [11], поэтому она не предполагает определение полного перечня параметров, необходимого для создания цифрового двойника трансформатора.

Для снижения влияния первого аспекта предложена методика коррекции имитационной модели однофазного трансформатора [12], которая может быть расширена до методики коррекции трехфазного трансформатора.

Вопросы, связанные с уточнением параметров трансформатора, полученными при проектировании, решаются внедрением подсистемы расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов [13]. При этом используются методики, в своей основе содержащие современные методы решения сложных технических задач, такие как расчет поля методом конечных элементов в САЕ-системах, а также разветвленные цепные модели, учитывающие большое число процессов, происходящих в трансформаторе.

В данной статье будут рассмотрены вопросы, касающиеся выбора граничных условий при рассмотрении полевых моделей силового трансформатора, а также связанные с этим вопросы уточнения параметров силового трансформатора.

Выбор граничных условий для моделей магнитного поля силового трансформатора

При построении имитационных моделей силовых трансформаторов целесообразно использовать цепные модели, обладающие высоким быстродействием, поскольку для цифровых двойников характерной особенностью является обработка данных, в том числе и в режиме реального времени. Модели, описанные в [14, 15], являются ярким примером таких моделей, но они громоздки и сложны с точки зрения обработки входных данных.

В [16] описан подход синтеза цепных и полевых моделей. При этом подходе быстродействие цепных моделей дополняется точностью полевых моделей. Причем данная модель гораздо проще тех, что описаны в [14, 15]. В [17] рассмотрены вопросы, связанные с уточнением параметров короткого замыкания (КЗ) при формировании имитационной модели с учетом рекомендаций по построению полевых моделей для заданных целей [18]. Однако данные рекомендации не учитывают процессы, происходящие в баке трансформатора, а также изменение параметров силового трансформатора ввиду этого влияния.

Как известно, при работе трансформатора часть магнитного потока замыкается вне магнитопровода. При этом распределение происходит не только по воздуху, но и по ферромагнитным деталям конструкции – прессующие кольца обмоток, прессующие балки ярм, бак. Магнитный поток, замыкающийся по этим элементам, вызывает дополнительные потери, обусловленные вихревыми токами. Причем наибольший вес имеют потери в баке ввиду его массивности.

Кроме определения потерь величина магнитного потока, замыкающегося по баку, необходима для выбора граничных условий при построении полевых моделей.

Исследование эффекта вытеснения магнитного поля из массивного металлического элемента проводилось на тестовой модели, построенной с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics (рис. 1), состоящей из двух областей:

- стальная стенка с электропроводностью $10,6 \times 10^6$ См/м и нелинейной кривой намагничивания (область 3);
- воздушная среда.

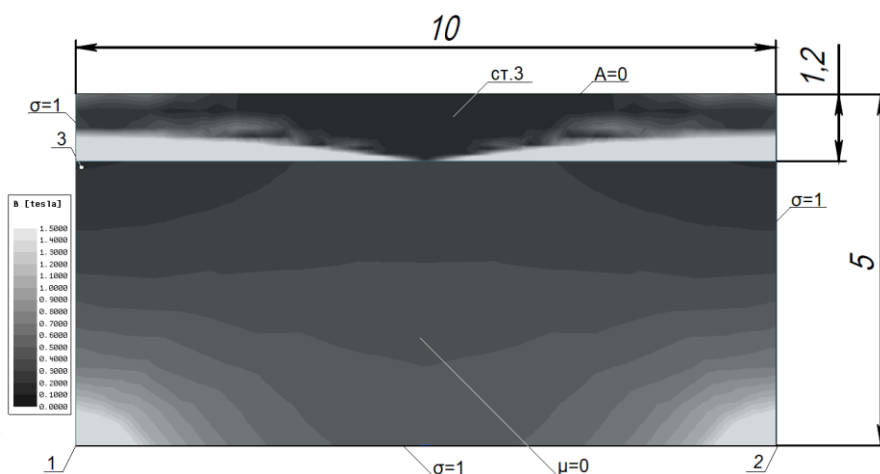


Рис. 1. Расчетная область для исследования эффекта вытеснения

Данная модель соответствует участку силового трансформатора со стальным баком вблизи стенки бака. Воздушная среда может быть заменена на другой диэлектрик (например, трансформаторное масло), поскольку данные материалы являются идентичными с точки зрения распределения магнитного поля, которое создается проводниками с током, расположенными в точках 1 и 2, частотой от 50 до 700 Гц. Величина магнитной индукции регистрировалась в точке 3 (возле стенки).

Задача решалась для следующих случаев:

- 1) на границе раздела двух сред задано условие Неймана (полное проникновение поля в бак);
- 2) на границе раздела двух сред задано условие Дирихле (полное вытеснение поля из бака);
- 3) на границе раздела двух сред задано условие открытой задачи.

4) Задача с вытеснением магнитного поля из бака (с учетом вихревых токов).

Картина распространения поля для четвертого случая для частоты 50 Гц приведена на рис. 2. На рис. 3 представлен график распределения индукции на оси симметрии при частоте 50 Гц.

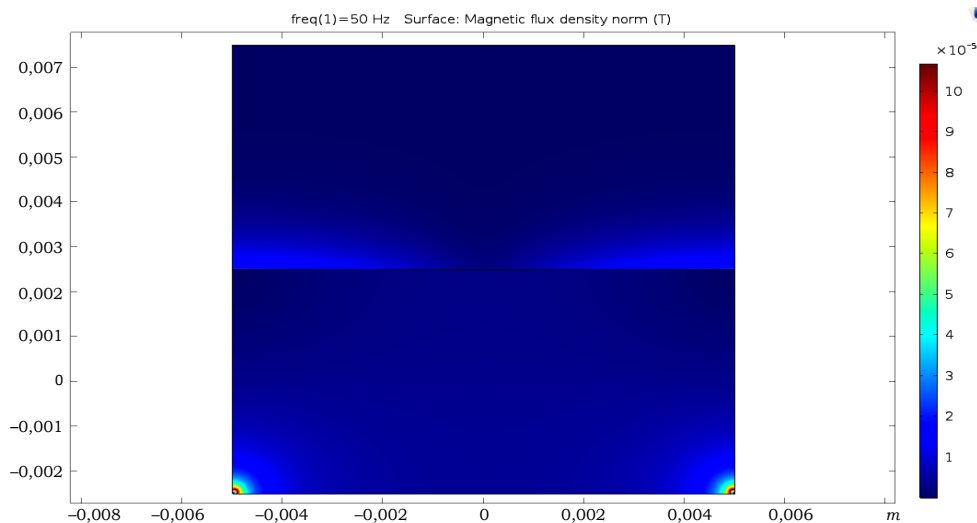


Рис. 2. Картина распространения поля при частоте 50 Гц (задача с учетом вихревых токов)

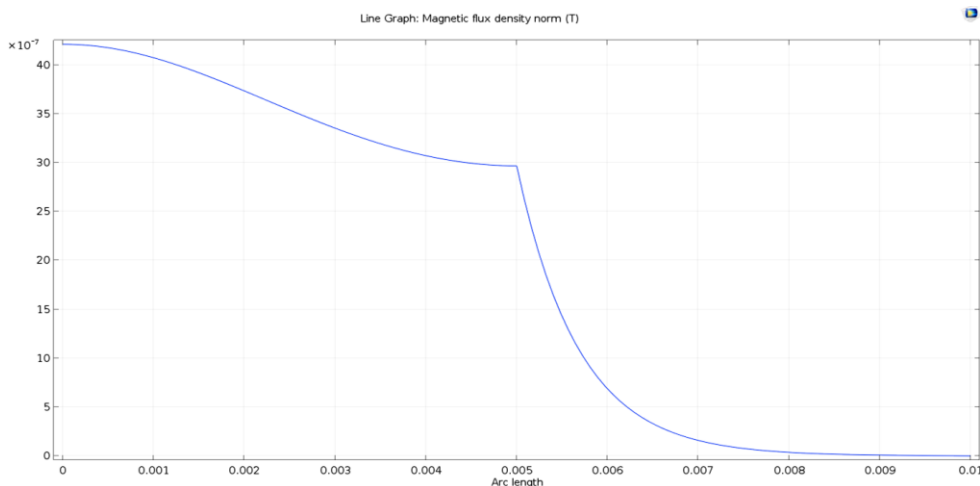


Рис. 3. Распределение индукции на оси симметрии при частоте 50 Гц

Величина общего потока вблизи стенки бака для рассмотренных случаев на частоте 50 Гц приведена в таблице.

Результаты расчета величины основного магнитного
потока на частоте 50 Гц

Случай	Условие Неймана	Условие Дирихле	Открытая задача	Задача с вытеснением тока
Общий поток вблизи стенки бака, Вб	$1,0647 \cdot 10^{-7}$	$9,8584 \cdot 10^{-8}$	$1,0037 \cdot 10^{-7}$	$1,0643 \cdot 10^{-7}$

Результаты свидетельствует о том, что величина потока вблизи стенки бака для случая условия Неймана наиболее близка к реальной задаче вытеснения поля в баке. Коэффициент, учитывающий изменение величины общего потока вблизи стенки бака, близок к единице:

$$k_{\sigma} = \frac{\Phi_{\text{вытесн}}}{\Phi_{\text{Нейман}}} = \frac{1,0643 \cdot 10^{-7}}{1,0647 \cdot 10^{-7}} = 0,9996. \quad (1)$$

Следовательно, при построении полевых моделей для уточнения параметров силовых трансформаторов целесообразно использовать граничное условие Неймана на границе расчетной области, повторяющей границы бака, что значительно упростит итоговую задачу по расчету поля силового трансформатора ввиду исключения объекта с нелинейной характеристикой малой толщины, требующего высокой степени дискретизации.

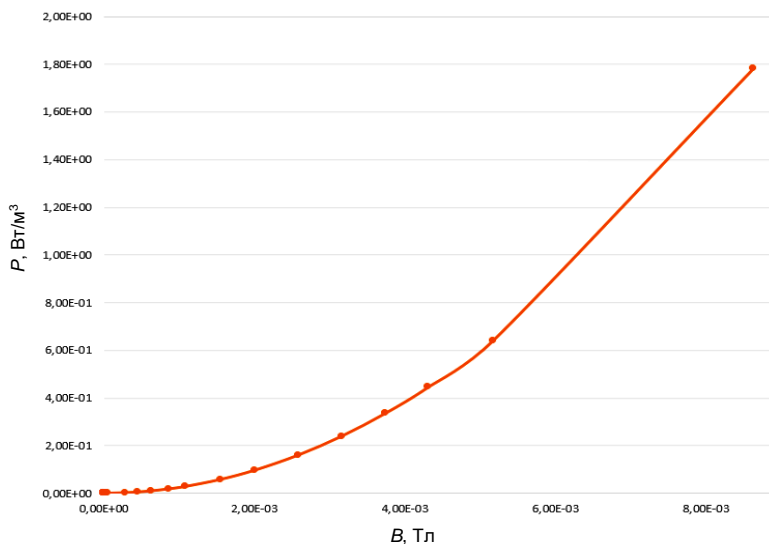


Рис. 4. Зависимость удельных потерь в стенке бака от индукции возле стенки бака при 50 Гц

С применением тестовой модели, приведенной на рис. 1, по результатам серии расчетов была определена зависимость удельных потерь, обусловленных вихревыми токами, в единице объема стального бака от индукции возле стенки бака (в точке 3) (рис. 1).

С учетом данной зависимости могут быть определены дополнительные потери в металлических элементах конструкции силового трансформатора по известной величине индукции магнитного поля вблизи них.

В [13] приведены аналогичные зависимости удельных потерь для частот до 700 Гц, которые могут быть использованы для высокочастотных трансформаторов.

Уточнение величин активных сопротивлений для модели силового трансформатора

Омическое сопротивление проводников, из которых выполнены обмотки, определяется по широко известной формуле:

$$r_{\text{п}} = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом/м·мм²; l – длина проводника, м; S – сечение проводника, мм².

Однако сопротивления, которые используются в схемах замещения трансформатора [19], отличаются от омического по нескольким причинам:

1) при протекании переменного тока по проводнику необходимо учитывать эффект вытеснения, что увеличивает сопротивление проводника за счет уменьшения эффективного сечения;

2) добавочные потери в массивных ферромагнитных элементах конструкции трансформатора, вызванные вихревыми токами, также представляются активным сопротивлением. Поэтому целесообразно увеличить сопротивления обмоток на величину сопротивления, эквивалентного добавочным потерям:

$$r = \rho \frac{l}{S} + \frac{P_{\text{д}}}{I^2}, \quad (3)$$

где $P_{\text{д}}$ – добавочные потери в трансформаторе, отнесенные к рассматриваемой обмотке, Вт; I – ток в обмотке, А.

В [11] учет эффекта вытеснения тока в k -м проводнике обмотки (рис. 5) производится по формуле:

$$P_{dk} = P_{оснк} k_{dk} = P_{оснк} \cdot \left[1 + 5,2\beta^2 \left(\frac{f}{\rho} \right)^2 a^4 (k - 0,5)^2 \right], \quad (4)$$

где $P_{оснк}$ – основные потери в k -м проводнике, рассчитанные при условии отсутствия эффекта вытеснения тока, Вт; f – частота тока, Гц; ρ – удельное электрическое сопротивление металла обмоток, мкОм·м; a – размер проводника в направлении, перпендикулярном к линиям магнитной индукции поля рассеяния, м; β – коэффициент, который определяется по формуле:

$$\beta = \frac{b \cdot m}{l_{об}} k_p, \quad (5)$$

где b , m – соответственно размер проводника, м, и число проводников в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния; $l_{об}$ – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м; d – диаметр круглого проводника, м; k_p – коэффициент приведения поля рассеяния (коэффициент Роговского).

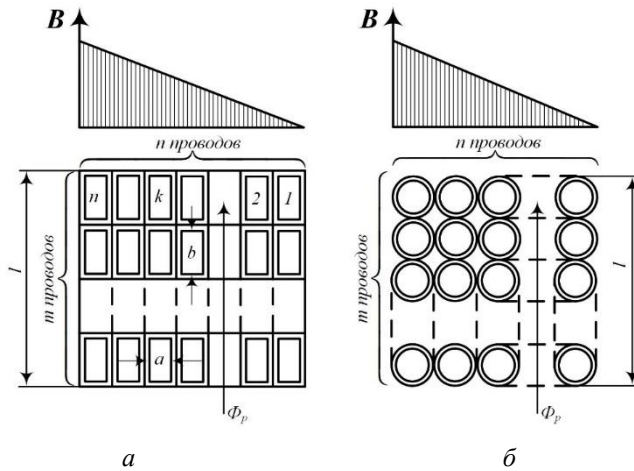


Рис. 5. К определению добавочных потерь в обмотках:
 a – из прямоугольного провода; b – из круглого провода

Эта формула проверена длительным периодом применения методики проектирования, поэтому можно считать ее не вызывающей сомнений. Однако в случае фольговых обмоток методика расчета

эффекта вытеснения тока гораздо сложнее и требует применения специальных методик, как, например, в [20].

Расчет добавочных потерь является сложной задачей, а ее решение основано на большом числе допущений, среди которых усредненные свойства материалов, построение поля рассеяния в различных областях трансформатора. Для упрощения этой задачи в [11] для трансформаторов от 100 до 63000 кВА предлагается упрощенная формула:

$$P_6 \approx 10kS, \quad (6)$$

где S – полная мощность трансформатора, кВА; k – коэффициент, определяемый мощностью трансформатора.

Уточненное значение потерь мощности в баке (после его расчета) при мощности трансформатора 10 000–63 000 кВА там же предлагается по формуле:

$$P_6 \approx \frac{ku_p^2 \Phi^2 l^3 10^4}{P_6 (l_{o6} + 2(R - r_{12}))^2}, \quad (7)$$

где k – эмпирический коэффициент; Φ – поток одного стержня, Вб; p_6 – периметр гладкого бака, м; R – средний радиус овального бака, м; $R = (A + B - 2C)/4$ (A – длина бака, м, B – ширина бака, м, C – расстояние между осями стержней, м); r_{12} – средний радиус канала рассеяния, м.

Очевидно, что формулы дают очень приближенный результат.

Расчет и уточнение потерь в стенках бака трансформатора, а также уточнение активных сопротивлений обмоток, предлагается проводить по следующему алгоритму:

1) на двухмерной полевой задаче, в которой рассматривается торцевое сечение трансформатора в осесимметричной постановке с граничными условиями Неймана (рис.6), в программном комплексе Comsol Multiphysics определяется величина индукции магнитного поля вдоль границы, заменяющей стенку бака (рис. 7).

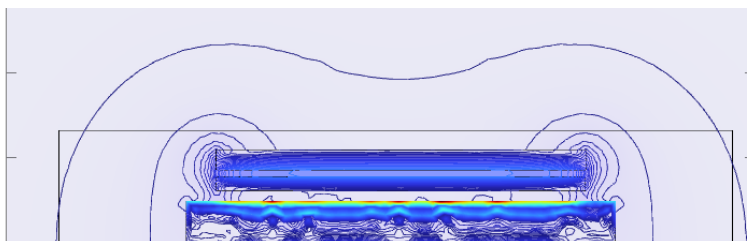


Рис. 6. Картина магнитного поля при частоте 50 Гц

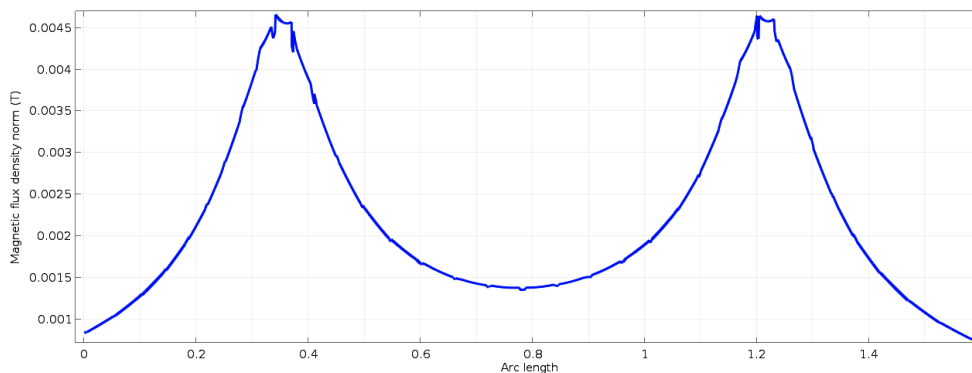


Рис. 7. Распределение индукции вдоль боковой границы расчетной области для частоты 50 Гц

В этом случае имитируется идеальный опыт короткого замыкания, т.е. намагничивающие силы обмоток равны по величине и противоположны по направлению;

2) по результатам расчета распределения индукции с учетом зависимости на рис. 5 определяются потери в баке по формуле:

$$P_{\delta} \approx \gamma d_b L_b \int_{\ell_{\delta}} P(B(y_b)) dy \approx \gamma d_b L_b \sum_{i=1}^N P(B(y_{bi})) \Delta y_b, \quad (8)$$

где γ – удельный вес стали, кг/м³; d_b – толщина стенки бака, м; L_b – периметр бака в горизонтальном сечении, м; ℓ_{δ} – периметр бака в вертикальном сечении, м; $P(B)$ – аппроксимированная сплайнами зависимость по рис. 4; y_b – координата точки на периметре бака в горизонтальном сечении, м; Δy_b – шаг дискретизации на периметре бака в горизонтальном сечении, м.

3) рассчитывается активное сопротивление обмотки в схеме замещения трансформатора по (3).

По предлагаемой методике расчета были уточнены потери в баке для проекта трансформатора ТМГ-1000-10/0,4. Потери в стенках бака составили 105 Вт. В свою очередь, потери, определенные по упрощенной формуле (6), составляют 250 Вт.

Данное расхождение определяется несколькими факторами: сильно завышенное значение добавочных потерь, определенных по упрощенной формуле, а также отсутствие на данном этапе исследований информации об уровне потерь в других массивных элементах конструкции (прессующие балки, шпильки и т.п.).

Заключение

В приведенных исследованиях затрагивается вопрос уточнения параметров силового трансформатора. Верное задание граничных условий при формировании полевых моделей, а также уточнение дополнительных потерь позволяют повысить точность имитационного моделирования трансформаторов различной конфигурации за счет приближения исходных данных модели к реальному объекту [21, 22].

Результаты работы могут быть использованы при определении параметров силовых трансформаторов для построения имитационных моделей, лежащих в основе цифровых двойников. Имитационные модели могут быть использованы как на этапе проектирования (в составе САПР), так и на этапе эксплуатации объекта для оценки его состояния.

Библиографический список

1. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. N 474 [Электронный ресурс] // ГАРАНТ. – URL: https://base.garant.ru/74404210/#block_25 (дата обращения: 19.07.2023).
2. Цифровая трансформация энергосистем / Т.В. Купчиков, В.Е. Борматин, В.П. Герих, Г.В. Ермоленко, А.С. Рахимов, О.Ю. Фролова // Вести в электроэнергетике. – 2022. – № 6 (122). – С. 54–71.
3. Концепция «Цифровая трансформация 2030» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 19.07.2023).
4. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. – М.: Изд-во Федерал. агентства по техническому регулированию и метрологии, 2021 (дата утверждения: 16.09.2021).
5. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
6. Производственный потенциал [Электронный ресурс] // ПАО Россети, Центр. – URL: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/> (дата обращения: 19.07.2023).

7. Бутырин, П.А. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов / П.А. Бутырин, М.Е. Алпатов // *Электричество*. – 2021. – № 10. – С. 4–10. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-10-4-10

8. Дарьян, Л.А. Цифровые двойники электроэнергетического оборудования. Образы и экспертизы. Ч. 1 / Л.А. Дарьян, Л.Н. Конторович // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2021. – № 1 (64). – С. 124–129.

9. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2023661769 Рос. Федерация. Имитационная модель трехфазного трансформатора для расчетов переходных процессов в режиме короткого замыкания: № 2023619371: заявл. 15.05.2023: опубл. 01.06.2023 / Р.В. Сайфуллин.

10. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

11. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

12. Метод коррекции имитационной модели однофазного трансформатора с использованием осциллограмм тока холостого хода / А.И. Тихонов, А.В. Подобный, И.С. Снитько, А.В. Стулов, А.А. Каржевин // *Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та*. – 2022. – № 2. – С. 38–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.038-046

13. Снитько, И.С. Разработка методики расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов на базе имитационных моделей: спец. 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук / И.С. Снитько. – Иваново, 2022. – 154 с.

14. Зирка, С.Е. Моделирование трехфазного трансформатора как системы с сосредоточенно-распределенными параметрами / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз // *Техн. электродинамика*. – 2014. – № 3. – С. 28–32.

15. Topological transient models of three-phase, three-legged transformer / J. Zhao, S.E. Zirka, Y.I. Moroz, C.M. Arturi, R.A. Walling, N. Teis, O.L. Tarchutkin // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 102519–102529. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931311

16. Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный // *Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та*. – 2020. – Вып. 1. – С. 22–31.

17. Разработка модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитько, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, В.Е. Мизонов // Вестник Иванов. гос. энергет. ун-та. – 2021. – № 4. – С. 47–56. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.047-056

18. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитько, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 3. – С. 32–41.

19. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

20. Математическое моделирование электромагнитных процессов в фольговых обмотках трансформаторов и токоограничивающих реакторов / А.И. Тихонов, А.В. Иванов, И.А. Пайков, А.В. Стулов. – Иваново: Изд-во Иванов. гос. энергет. ун-та им. В.И. Ленина, 2015. – 80 с.

21. Имитационные модели трансформаторов для применения в составе САПР / А.И. Тихонов, А.Б. Красовский, А.В. Стулов, И.С. Снитько, А.А. Каржевин // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 61–68. DOI: 10.53891/00135860_2023_11_61

22. Каржевин, А.А. Разработка имитационной модели преобразовательного трансформатора / А.А. Каржевин, А.И. Тихонов, А.В. Стулов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф., посв. 75-лет. теплоэнергет. факультета; Иваново, 31 мая – 02 июня 2023 года. – Иваново: Изд-во Иванов. гос. энергетич. ун-та им. В.И. Ленина, 2023. – Т. 3. – С. 204–207.

References

1. O natsional'nykh tseliakh razvitiia Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda: Ukaz Prezidenta RF ot 21 iulija 2020 g. N 474 [On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030: Decree of the President of the Russian Federation dated July 21, 2020 No. 474]. GARANT, available at: https://base.garant.ru/74404210/#block_25 (accessed 19 July 2023).

2. Kupchikov T.V., Bormatin V.E., Gerikh V.P., Ermolenko G.V., Rakhimov A.S., Frolova O.Iu. Tsifrovaia transformatsiia energosistem [Digital transformation of energy systems]. *Vesti v elektroenergetike*, 2022, no. 6 (122), pp. 54-71.

3. Kontseptsiiia “Tsifrovaia transformatsiia 2030” [The concept of “Digital Transformation 2030], available at: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (accessed 19 July 2023).

4. GOST R 57700.37-2021. Komp'uternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii. Obshchie polozheniia: natsional'nyi standart RF [GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions: the national standard of the Russian Federation]. Moscow: Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniu i metrologii, 2021. (Data utverzhdeniia 16.09.2021).

5. GOST R 57412-2017. Komp'uternye modeli v protsessakh razrabotki, proizvodstva i ekspluatatsii izdelii [GOST R 57412-2017. Computer models in the processes of product development, production and operation]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

6. Proizvodstvennyi potentsial [Production potential]. PAO Rosseti, Tsent, available at: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/> (accessed 19 July 2023).

7. Butyrin P.A., Alpatov M.E. Tsifrovizatsiia i analitika v elektrotekhnike. Tsifrovye dvoyniki transformatorov [Digitalization and analytics in electrical engineering. Digital counterparts of transformers]. *Elektrichestvo*, 2021, no. 10, pp. 4-10. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-10-4-10

8. Dar'ian L.A., Kontorovich L.N. Tsifrovye dvoyniki elektroenergeticheskogo oborudovaniia. Obrazy i ekspertizy. Chast' 1 [Digital counterparts of electric power equipment. Images and expertise. Part 1]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 1 (64), pp. 124-129.

9. Saifullin R.V. Imitatsionnaia model' trekhfaznogo transformatora dlia raschetov perekhodnykh protsessov v rezhime korotkogo замыканиia [Simulation model of a three-phase transformer for short-circuit transient calculations]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM no. 2023619371 (2023).

10. GOST R 52719-2007. Transformatory silovye. Obshchie tekhnicheskie usloviia [GOST R 52719-2007. Power transformers. General technical conditions]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

11. Tikhomirov P.M. Raschet transformatorov [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 528 p.

12. Tikhonov A.I., Podobnyi A.V., Snit'ko I.S., Stulov A.V., Karzhevin A.A. Metod korrektsii imitatsionnoi modeli odnofaznogo transformatora s ispol'zovaniem ostsillogramm toka kholostogo khoda [A method for correcting a simulation model of a single-phase transformer using no-load current oscillograms]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2022, no. 2, pp. 38-46. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.038-046

13. Snit'ko I.S. Razrabotka metodiki rasshirenogo poverochnogo rascheta v SAPR silovykh transformatorov na baze imitatsionnykh modeli: spets. 05.13.12 "Sistemy avtomatizatsii proektirovaniia (po otrasliam)" [Development of a methodology for advanced verification calculation in CAD of power transformers based on simulation models: spec. 05.13.12 "Design automation systems (by industry)"]. Ph. D. thesis. Ivanovo, 2022, 154 p.

14. Zirka S.E., Moroz Iu.I. Modelirovanie trekhfaznogo transformatora kak sistemy s sosredotochenno-raspredeleennymi parametrami [Modeling of a three-phase transformer as a system with concentrated distributed parameters]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2014, no. 3, pp. 28-32.

15. Zhao J., Zirka S.E., Moroz Y.I., Arturi C.M., Walling R.A., Teis N., Tarchutkin O.L. Topological transient models of three-phase, three-legged transformer. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 102519-102529. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931311

16. Tikhonov A.I., Stulov A.V., Karzhevin A.A., Podobnyi A.V. Razrabotka nelineinoi modeli trekhfaznogo transformatora dlia issledovaniia vliianiia nesimmetrii magnitnoi sistemy na rabotu ustroistva v proizvod'nykh rezhimakh [Development of a nonlinear model of a three-phase transformer to study the effect of the asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, iss. 1, pp. 22-31.

17. Snit'ko I.S., Tikhonov A.I., Stulov A.V., Mizonov V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoi induktivnosti polei rasseianiia dlia realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of a model of transient modes taking into account the mutual inductance of scattering fields for the implementation of a digital transformer twin]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2021, no. 4, pp. 47-56. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.047-056

18. Tikhonov A.I., Stulov A.V., Snit'ko I.S., Podobnyi A.V. Razrabotka 2D-modelei magnitnogo polia dlia realizatsii tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov i porozhdaiushchego proektirovaniia silovykh transformatorov [Development of 2D models of the magnetic field for the implementation of digital twin technology and generative design of power transformers]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, iss. 3, pp. 32-41.

19. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. 3rd ed. Leningrad: Energiia, 1978, 832 p.

20. Tikhonov A.I., Ivanov A.V., Paikov I.A., Stulov A.V. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v fol'govykh obmotkakh transformatorov i tokoogranichivaiushchikh reaktorov [Mathematical modeling of electromagnetic processes in foil windings of transformers and current limiting reactors]. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina, 2015, 80 p.

21. Tikhonov A.I., Krasovskii A.B., Stulov A.V., Snit'ko I.S., Karzhevin A.A. Imitatsionnye modeli transformatorov dlia primeneniia v sostave SAPR [Simulation models of transformers for use in CAD]. *Elektrotehnika*, 2023, no. 11, pp. 61-68. DOI: 10.53891/00135860_2023_11_61

22. Karzhevin A.A. Tikhonov A.I., Stulov A.V. Razrabotka imitatsionnoi modeli preobrazovatel'nogo transformatora [Development of a simulation model of a converter transformer]. *Sostoianie i perspektivy razvitiia elektro- i teploenergeticheskoi (KhKhII Benardosovskie chteniia). Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 75-letiiu teploenergeticheskogo fakul'teta*; Ivanovo, 31 May, мая - 02 June 2023. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina, 2023, vol. 3, pp. 204-207.

Сведения об авторах

Снитъко Ирина Сергеевна (Москва, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры ФН-7 «Электротехника и промышленная электроника» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет) (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1, e-mail: irant-kin@yandex.ru).

Тихонов Андрей Ильич (Иваново, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина (153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34, e-mail: aitis-ru@mail.ru).

About the authors

Irina S. Snitko (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Industrial Electronics Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 5, p. 1, 2nd Baumanskaya str., e-mail: irant-kin@yandex.ru).

Andrey I. Tihonov (Ivanovo, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics Ivanovo State Power University (153003, Ivanovo, Rabfakovskaya str., 34, e-mail: aitis-ru@mail.ru).

Поступила: 15.03.2024. Одобрена: 23.04.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Снитько, И.С. Уточнение активных сопротивлений силового трансформатора по результатам расчета полевых моделей / И.С. Снитько, А.И. Тихонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 23–40. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.02

Please cite this article in English as:

Snitko I.S., Tihonov A.I. Specification of the active resistances of the power transformer based on the results of the calculation of field models. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 23-40. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.02