

УДК 621.3.013.1

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОКОВ ХОЛОСТОГО ХОДА СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПЛОСКИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ

- ДИВЧУК Т.Е.** старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: DIV2009@i.ua;
- ЯРЫМБАШ Д.С.** д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального университета, Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- ЯРЫМБАШ С.Т.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kstj06@gmail.com;
- КИЛИМНИК И.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dnukim76@gmail.com;
- КОЦУР М.И.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С.** аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Цель работы. Разработать новый эффективный подхода для определения параметров холостого хода посредством реализации комбинации схемной и пространственной математической модели нестационарных электромагнитных полей в трехфазных трансформаторах с учетом конструктивного строения активной части, нелинейности магнитных свойств электротехнических сталей, обеспечивающего высокую точность и вычислительную эффективность.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, теории силовых трансформаторов, математической физики, метода конечных элементов, методов регрессионного и гармонического анализа.

Полученные результаты. Проведены теоретические исследования электромагнитных процессов на основе численной реализации трехмерной математической модели силового трехфазного трансформатора в режиме холостого хода. Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходе к 2D моделям. Он позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6%. Определены закономерности распределения индукции и энергии магнитного поля для активной части трансформатора в режиме холостого хода, установлены их количественные соотношения для стержней различных фаз, определяющие соотношения токов и сопротивлений прямой и обратной последовательности трансформатора. Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки. Установлено, что система фазных токов холостого хода характеризуется несинусоидальностью и несимметричностью. В гармоническом составе этих токов преобладают 1-я, 5-я и 7-я гармоники. На основе метода симметричных составляющих определены параметры прямой и обратной последовательности фаз первой гармоники холостого хода и предложена корректирующая методика, уточняющая традиционный инженерный подход. Использование коррекции параметров для исследованных соотношений токов прямой и обратной последовательности, повышает точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками проектирования.

Научна новизна. Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходе к 2D моделям. Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки.

Практическая ценность. Предложенные в работе подходы и методики позволяют сократить затраты

вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6% и повысит точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками проектирования.

Ключевые слова: схемная модель; трехмерное моделирование; трехфазный трансформатор; холостой ход, электромагнитное поле; метод конечных элементов; энергия магнитного поля; гармонический анализ; несинусоидальные и несимметричные токи.

I. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития теории проектирования силовых трансформаторов ряд вопросов, связанных с особенностями их работы в переходных режимах при включении без нагрузки, с процессами электромагнитного преобразования энергии, их влияния на параметры холостого хода требует детальных исследований. Это обуславливается необходимостью поиска технических решений для повышения энергоэффективности и надежности силовых трансформаторов, который требует высокоточных расчетных моделей и методики проектирования. Также следует обеспечивать существенное сокращение затрат на разработку новых образцов, соответствующих высокому мировому уровню трансформаторного производства.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известные инженерные методы расчета параметров холостого хода и короткого замыкания базируются на целом ряде допущений [1]-[5], что может приводить к существенным погрешностям и не удовлетворяет современным требованиям к конструкторской подготовке производства новых типов силовых трансформаторов [6]-[8]. Это характерно для трехфазных трансформаторов большой мощности со специальным конструктивным исполнением и для массовых серий распределительных силовых трансформаторов 1–3 габаритов с плоскими стержневыми магнитными системами [1], [2], [9].

Развитие новых специализированных программных комплексов расширило возможности практического использования полевых моделей и конечно-элементных методов для расчета силовых трансформаторов с учетом особенностей конструкции и динамики протекающих электромагнитных процессов, обеспечивая высокую точность проектирования [10-19]. Моделированию электромагнитных процессов, на основе схемных и полевых подходов, в практической электротехнике и электромеханике посвящен целый ряд работ [20]-[26]. Однако значительные различия геометрических размеров магнитных систем, обмоток силовых трансформаторов их катушек, слоев, ходов и витков существенно затрудняют численную реализацию пространственных полевых моделей и обуславливают значительные затраты вычислительных и временных ресурсов, в том числе, при проектировании наиболее массовых габаритов [18]-[21]. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в трансформаторах ограничиваются их плоскопараллельными приближениями [21,22]. Это требует определения корректных условий перехода от 3D к 2D-моделям с учетом режима работы. Точность моделирования также зависит от рассмотрения нелинейности магнитных свойств электротехнической стали, потерь

от вихревых токов и гистерезиса [27], [28]. В работах [29], [30] рассмотрены подходы к учету потерь в баке трансформатора от полей рассеяния. Авторы предлагают использовать граничные условия импедансного типа [10]. Это позволяет исключить бак из вычисленной области. Такой подход может значительно снизить требования к вычислительным ресурсам. Однако точность результатов зависит от точности определения граничных условий. Использование допущений о симметрии параметров схемы замещения трехфазных трансформаторов для режима холостого хода не обеспечивает адекватных оценок при динамически протекающих процессах и приводит к достаточно высоким погрешностям расчетов [3]-[5].

Это обуславливает актуальность разработки новых подходов, расширяющих области приложения существующих методов моделирования пространственных электромагнитных полей с учетом особенностей режимов работы, конструкции трехфазной трехстержневой магнитной системы, нелинейности магнитных свойств электротехнической стали, обеспечивающих высокую точность и вычислительную эффективность.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка нового эффективного подхода для определения параметров холостого хода посредством реализации пространственной математической модели нестационарных электромагнитных полей в трехфазных трансформаторах с учетом конструктивного строения активной части, нелинейности магнитных свойств электротехнических сталей, обеспечивающего высокую точность и вычислительную эффективность.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проводились для динамического режима включения силового трансформатора без нагрузки для распределительного силового трансформатора типа ТМ 1600/35 мощностью 1600 кВА, напряжение обмотки ВН 20 кВ, расчетная область которого представлена на Рис. 1. Пространственная геометрическая модель активной части силового трансформатора включает 3D области фазных обмоток НН 3 ($j = 2$) и ВН 3 ($j = 3$), главной и продольной изоляции 3 ($j = 4$), магнитной системы 1 ($j = 1$) с подобластями стержней, ярем и углов с учетом принятой схемы шихтовки магнитной системы (Рис. 1).

При математическом описании электромагнитных процессов принимаются допущения об изотропности электрофизических и электромагнитных свойств материалов, отсутствие токов смещения и свободных зарядов [24]-[26]. В этом случае нестационарные элек-

ромагнитные процессы в активной части силового трансформатора в режиме холостого хода могут быть представлены сопряженной системой нелинейных уравнений в частных производных [26]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial \mathbf{A}_j / \partial \tau + \sigma_j(\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times [(\mu_0 \mu_j(B))^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j] = \mathbf{J}_{ej}; \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – электрический потенциал; $\sigma(\theta)$ – удельная электропроводность; B – индукция магнитного поля; μ – относительная магнитная проницаемость; θ – температура; ω – угловая частота; \mathbf{J}_e – плотность стороннего источника тока; индексы j – соответствует подобластям расчетной области (рис. 1).

В соответствии с [24], [25] система уравнений (1) дополняется условием калибровки Кулона $\text{div}(\mathbf{A}) = 0$.

На внешних границах расчетной области задаются однородные граничные условия [25]

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = 0|_{\forall j \in (1,4)}; A_j = \bar{k} \cdot A_y(x, z)|_{j=4} \end{cases} \quad (2)$$

и условия сопряжения в виде [25]:

$$\mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \quad (3)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля.

Трехфазный трансформатор подключается к сети с бесконечно большой мощностью и симметричной системой фазных напряжений [23].

При этом начальные условия

$$\begin{cases} u_A|_{0+} = 0; u_B|_{0+} = \sqrt{2}U_\phi \sin(2\pi/3); \\ u_C|_{0+} = \sqrt{2}U_\phi \sin(4\pi/3); \\ i_A|_{0-} = i_A|_{0+} = 0; i_B|_{0-} = i_B|_{0+} = 0; i_C|_{0-} = i_C|_{0+} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

соответствуют первому закону коммутации [29].

Реализация трехмерной модели (1) с условиями калибровки Кулона, граничными условиями, условиями сопряжения (2), (3) и начальными условиями (4) методом конечных элементов требует значительных временных и вычислительных ресурсов [23].

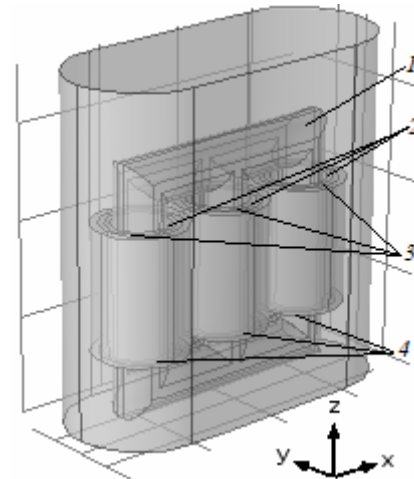
Поэтому, авторами рассматривалось допущение, что геометрическая симметрия расчетной области относительно плоскости xOz , предполагает симметрию магнитных процессов в режиме холостого хода. Это позволяет сократить расчетную область в 2 раза (Рис. 1, б). При этом на границе симметрии задаются граничные условия вида (3).

Введя допущение, что расположение обмотки по высоте стержня в режиме холостого хода практически не влияет на величину магнитного потока [1], в соответствии с [23], можно ввести еще одно плоскость симметрии магнитных процессов.

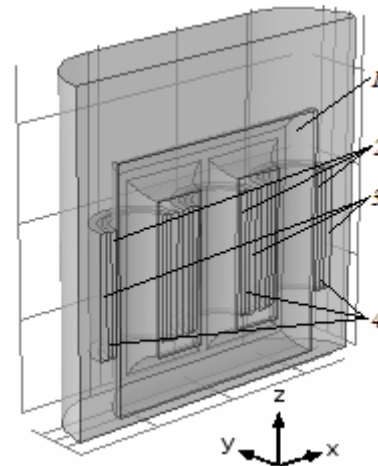
Эта плоскость параллельна плоскости xOy и разбивает расчетную область на две симметричные части

на высоте, равной половине длины стержня магнитной системы (Рис. 1, в). Это позволяет сократить расчетную область по сравнению с исходной расчетной областью (Рис. 1, а) в 4 раза. На границе симметрии задается граничное условие вида:

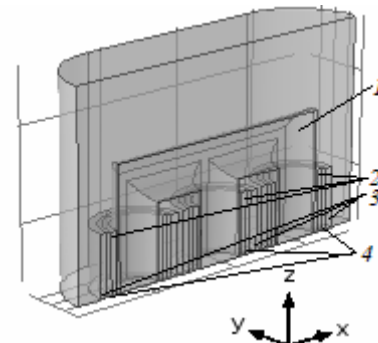
$$\begin{cases} H_j = 0|_{\forall j \in (1,4)}; A_j = \bar{k} \cdot A_y(x, z)|_{j=4}. \end{cases} \quad (5)$$



а)



б)



в)

Рисунок 1. Геометрическая модель расчетной области трансформатора: а) полная; б) при оси симметрии xOz ; в) при оси симметрии, параллельной оси xO

В соответствии с [23], [24], локализация магнитного поля силового трансформатора в режиме холостого хода происходит в магнитной системе. Сечение стержня и ярма магнитной системы может быть отражено кругом, с учётом соответствующих коэффициентов [1] и приведено к прямоугольной форме [20]. Это позволяет осуществить переход от трехмерной расчетной области к двумерной и рассматривать плоскостерную задачу в плоскости xOz [20]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_j &= \mathbf{k} \cdot A_{yj}; \mathbf{B}_j = \mathbf{i} \cdot B_{xj} + \mathbf{j} \cdot B_{zj}; \\ \mathbf{H}_j &= \mathbf{i} \cdot H_{xj} + \mathbf{j} \cdot H_{zj}. \end{aligned} \quad (6)$$

Трехмерная модель (1) и двумерная модель (6) с условиями калибровки Кулона, граничными условиями (2), (3), (5) и начальными условиями (4), реализуется методом конечных элементов в структуре средств Comsol Multiphysics. Соотношения (1) – (6) дополняются схемой моделью на базе известной схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода [31,32] для каждой из его фаз с учетом заданного соединения обмоток (Y или D).

Большинство специализированных программ для трехмерного моделирования имеют особенности задания магнитных свойства материалов. Тензор магнитных проницаемостей материалов может быть задан только для постоянных значений его компонент [3], [33]. Авторы предлагают объектно-ориентированный подход для задания магнитных свойств материалов. Выделяются области магнитной системы с преобладающими направлениями магнитного потока: для стержней и ярма – по направлению прокатки, прямой стык – по направлению 90 градусов к направлению прокатки, углы и косой стык – 45 градусов к направлению прокатки [22]. Такое разделение магнитной системы трансформатора позволяет достоверно учесть анизотропию свойств холоднокатаных электротехнических сталей [33]-[36].

Оценка энергии магнитного поля и ее средних значений для каждой j -й зоны расчетной области выполняется с использованием соотношений [22]:

$$W_i|_{\tau} = \frac{1}{2} \iiint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz|_{\tau}; W_{\Sigma}|_{\tau} = \sum W_i|_{\tau}. \quad (8)$$

Таблица 1. Погрешности реализации (1) методом конечных элементов, затраты вычислительных и временных ресурсов

Расчетная область	W		Расчетное время, о.е	Память ОЗУ, о.е.
	Относительная невязка, %	Средневзвешенная невязка, %		
3D (Рис. 1, а)	-	- / -	1	1
½ 3D (Рис. 1, б)	2,986·10 ⁻⁴ ...14,337	0,136	0,404	0,834
¼ 3D (Рис. 1, в)	1,226·10 ⁻³ ...22,737	0,155	0,147	0,671
2D	0,019...150,725	3,633	0,004	0,369

Точность определения параметров холостого хода по данным математического моделирования практически в два раза выше по сравнению с данными расчетов по методике [1].

Точность реализации трехмерной модели (1) методом конечных элементов определялась невязкой относительной величины энергии магнитного поля для различных расчетных областей активной части силового трансформатора (табл. 1) и средневзвешенными невязками для величин энергии магнитного поля [27]:

$$\begin{aligned} \tilde{W}_i|_{\tau} &= \left| \frac{W_i|_{\tau} - W_{\text{баз}}|_{\tau}}{\max(W_{\text{баз}})} \right| \cdot 100\%, \\ \tilde{W}_{\text{ср}i}|_{\tau} &= \left[\frac{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} W_i|_{\tau} - W_{\text{баз}}|_{\tau}}{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} W_{\text{баз}}|_{\tau}} \right] \cdot 100\%, \end{aligned}$$

где $W_{\text{баз}}$ – величина энергии магнитного поля при реализации (1) для расчётной области (Рис. 1, а), τ – момент времени; $i = 1,2,3$ – для расчётных областей (Рис. 1, б, в) и двумерной расчетной области.

При этом фиксировались затраты времени и вычислительных ресурсов (оперативной памяти) на численную реализацию модели (1) с использованием различных аппроксимирующих функций, приведенные к базовым значениям, полученным при использовании полиномов Лагранжа первой степени (табл. 1.)

Как показывает анализ полученных результатов, погрешность относительной невязки при определении величины энергии магнитного поля в расчетной области по результатам моделирования достигает 14,337...150,725 %. Максимальные значения погрешностей соответствуют начальному переходному процессу и не оказывают существенного влияния на определение параметров на установившемся участке. Таким образом, сокращение расчетной области не позволит с достаточной точностью определить токи включения холостого хода силового трансформатора [23]. Средневзвешенные невязки не превышают 0,136% и 0,155% – для расчетных областей (Рис. 1, б, в) и 3,633% – для 2D расчётной области (Табл. 1). Для установившегося участка значения средневзвешенных невязок существенно ниже, что обосновывает сокращение 3D расчетной области и применение 2D моделей для определения параметров холостого хода трансформатора. При этом, затраты вычислительных ресурсов сокращаются в 1,2...2,6 раза, а временных ресурсов – в 2,5...254 раза (Табл. 1).

Как показывает анализ полученных результатов, погрешность относительной невязки при определении величины энергии магнитного поля в расчетной области по результатам моделирования достигает

14,337...150,725 %. Максимальные значения погрешностей соответствуют начальному переходному процессу и не оказывают существенного влияния на определение параметров на установившемся участке. Таким образом, сокращение расчетной области не позволит с достаточной точностью определить токи включения холостого хода силового трансформатора [23]. Средневзвешенные невязки не превышают 0,136% и 0,155% – для расчетных областей (Рис. 1, б, в) и 3,633% – для 2D расчётной области (Табл. 1). Для установившегося участка значения средневзвешенных невязок существенно ниже, что обосновывает сокращение 3D расчетной области и применение 2D моделей для определения параметров холостого хода трансформатора. При этом, затраты вычислительных ресурсов сокращаются в 1,2...2,6 раза, а временных ресурсов – в 2,5...254 раза (Табл. 1).

Точность определения параметров холостого хода по данным математического моделирования практически в два раза выше по сравнению с данными расчетов по методике [1].

Для повышения точности гармонического анализа данных моделирования применяется успешно апробированный в работах метод кубической сплайн-интерполяцией дискретных массивов энергии магнитного поля и фазных токов [22]. Функции кубической сплайн-интерполяции фазных токов и энергии магнитного поля интерполировались рядами Фурье, что позволяет компенсировать влияние изменений временного такта при моделировании на точность обработки данных.

Для данных численного моделирования визуализируется распределение мгновенных значений индукции магнитного поля в продольном сечении магнитной системы силового трансформатора плоскостью, проходящей через оси ее стержней в момент времени $\tau = 0.4$ с (Рис. 2, а). Его характерной особенностью является локализация магнитного потока в одном из крайних стержней и прилегающих к нему ярмах. Этот фактор усиливает влияние нелинейности магнитных характеристик электротехнической стали и приводит к росту токов в обмотках фаз А и С, что отображается временными зависимостями несинусоидальной формы для нормированных фазных токов и энергии магнитного поля в активной части трансформатора (Рис. 2, б). Нормирование значений фазных токов и энергии магнитного поля для одного периода установившегося режима холостого хода выполнялось относительно максимумов соответствующих амплитуд для одного временного периода.

Анализ гармоник фазных токов и энергии магнитного поля в активной части силового трансформатора показал преобладающее влияние 1-й и 5-й гармоник для фазных токов, и нулевой 2-й и 6-й гармоник – для энергии магнитного поля.

Коэффициенты несинусоидальности токов составили 4,7 – 4,8% для фаз А, С, 3,8% и – для фазы В. Средние за временной период значения токовых погрешностей для первых гармонических составляющих

фазных токов холостого хода составляют 2,987, 3,803, 2,923%, а средняя относительная погрешность для нулевой и второй гармоник энергии магнитного поля в активной части трансформатора не превышает 1,55%. Это позволяет применить метод симметричных составляющих, ограничившись первыми гармониками фазных токов, 0-й и 2-й гармониками – для энергии магнитного поля:

$$\begin{cases} I_{z(1)} = I_{A(1)} + I_{B(1)} + I_{C(1)}; \\ I_{D(1)} = I_{A(1)} + e^{j2\pi/3} \times I_{B(1)} + e^{j4\pi/3} \times I_{C(1)}; \\ I_{UnD(1)} = I_{A(1)} + e^{j4\pi/3} \times I_{B(1)} + e^{j2\pi/3} \times I_{C(1)}, \end{cases} \quad (9)$$

где $I_{z(1)}$, $I_{D(1)}$, $I_{UnD(1)}$ – амплитуды нулевой, прямой и обратной последовательности первой гармоники тока холостого хода.

Амплитуда обратной последовательности составляет 18-21% от амплитуды прямой последовательности первой гармоники тока холостого хода. Влиянием нулевой последовательности, не превышающей нескольких процентов, можно пренебречь. Это позволяет обосновать достаточно простую корректировку расчетных значений параметров холостого хода, которые определяются с использованием традиционных инженерных подходов и декомпозиции магнитной системы на ее стержни, ярма, углы и стыки [15,16,37].

На первом этапе корректируются амплитуды фазных токов холостого хода

$$\begin{cases} I_{A(1)} = I_{D(1)} + I_{UnD(1)}; \\ I_{B(1)} = I_{D(1)} \times e^{j2\pi/3} + I_{UnD(1)} \times e^{-j2\pi/3}; \\ I_{C(1)} = I_{D(1)} \times e^{-j2\pi/3} + I_{UnD(1)} \times e^{j2\pi/3}. \end{cases} \quad (10)$$

На втором этапе корректируется действующее значение тока холостого хода

$$\begin{aligned} I_{idle} &= \left(|I_{A(1)}| + |I_{B(1)}| + |I_{C(1)}| \right) / 3\sqrt{2}; \\ i_{idle} &= (I_{idle} / I_{Ph}) \times 100\%, \end{aligned} \quad (11)$$

где I_{Ph} – значение номинального фазного тока трансформатора.

На третьем этапе корректируются расчетные значения потерь холостого хода

$$P_{idle} = (i_{idle} / i_{idle(c)})^{k_p} \times P_{idle(c)}. \quad (12)$$

где $P_{idle(c)}$ – рассчитанные по методике [1] потери холостого хода силового трехфазного трансформатора, k_p – коэффициент корректировки потерь холостого хода, равный 1,12 – 1,18 для трансформаторов I – III габаритов (большее значение соответствует III габариту).

Если задача 3D моделирования электромагнитных процессов в силовых трансформаторах I – III габаритов не входит в систему ограничений, которые

устанавливают взаимосвязи между векторами конструктивных параметров магнитной системы, обмоток, нелинейных свойств ферромагнитных материалов и параметрами холостого хода, то применение данного корректирующего подхода является наиболее предпочтительным.

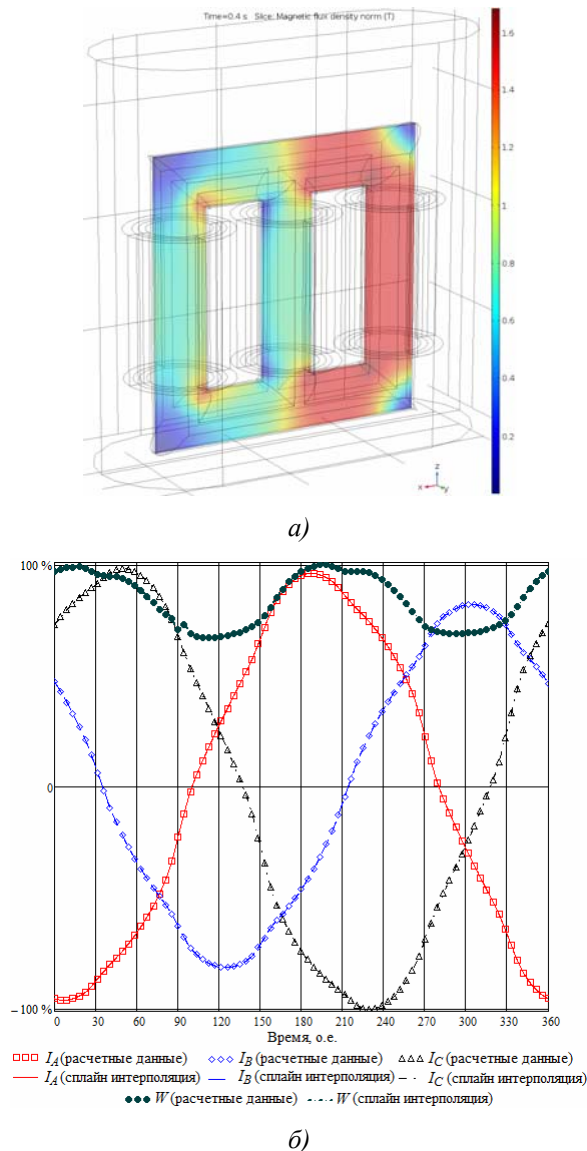


Рисунок 2. Результаты расчета: а) распределение индукции магнитного поля в сечении xOz ; б) фазные токи и энергия магнитного поля в активной части силового трансформатора ТМ 1600/35

В этом случае можно принять, что амплитуда обратной последовательности тока холостого хода составляет 18–20% от значения начального приближения тока холостого хода, рассчитанного по инженерной методике [1], уточнить значение тока холостого хода по соотношениям (8), (9), а потери холостого хода – с использованием выражения (10).

Сравнение данных испытаний более 19 трехфазных силовых трансформаторов I – III габаритов с расчетными параметрами холостого хода, определенными как по методике [1], так и с использованием кор-

ректирующего подхода (8)–(10), показали снижение погрешности откорректированных параметров на 12–14% для тока и 9–11% для потерь холостого хода.

V. ВЫВОДЫ

Реализован новый подход определения параметров холостого хода трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами на базе методов схемного и 3D моделирования, гармонического анализа и симметричных составляющих. Он характеризуется высокой эффективностью численной реализации и точностью для переходных процессов включения трехфазного трансформатора без нагрузки.

Предложен подход для повышения эффективности полевого моделирования режима холостого хода методом конечных элементов, который заключается в сокращении размеров расчетной области и переходе к 2D моделям. Он позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов более, чем в 2,8 раз, временных ресурсов более, чем в 250 раз, при средневзвешенной невязке не более 3,6%. Определены закономерности распределения индукции и энергии магнитного поля для активной части трансформатора в режиме холостого хода, установлены их количественные соотношения для стержней различных фаз, определяющие соотношения токов и сопротивлений прямой и обратной последовательности трансформатора.

Установлено, что система фазных токов холостого хода характеризуется несинусоидальностью и несимметричностью. В гармоническом составе этих токов преобладают 1-я, 5-я и 7-я гармоники, но при этом доминирует первая гармоническая составляющая. На основе метода симметричных составляющих определены параметры прямой и обратной последовательности фаз первой гармоники холостого хода и предложена корректирующая методика, уточняющая традиционный инженерный подход. Использование коррекции параметров для исследованных соотношений токов прямой и обратной последовательности, повышает точность расчета токов холостого хода на 12–14% и потерь холостого хода на 9–11% по сравнению с общеизвестными инженерными методиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [2]. Kulkarni S.V. Transformer Engineering: Design and Practice [Text] / S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 478 p.
- [3]. Придубков П. Я. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора [Текст] / П. Я. Придубков, І. В. Хоменко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит – Харьков. – 2010. – №2. – С. 55–61.
- [4]. Рогинская, Л. Э. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими

- и пространственными магнитопроводами [Текст] / Л. Э. Рогинская, Д. В. Гусаков // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 76–83.
- [5]. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5 – 12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.
- [6]. Новаш И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки Matlab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода [Текст] / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ – 2015. – №1. – С. 12–24.
- [7]. de Leon F. Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients [Text] / F. de Leon, A. Semlyen // IEEE Transactions on Power Delivery – 1994. – Vol. 9. – No. 1. – P. 231–239. DOI: 10.1109/61.277694.
- [8]. Majumder R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model [Text] / R. Majumder, S. Ghosh, R. Mukherjee // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology – 2016. – Vol. 5. – No 3, P. 3300–3306. DOI:10.15680/IJIRSET.2016.0503107.
- [9]. Кислицин А.Л. Трансформаторы [Текст] / А.Л. Кислицин. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 76 с.
- [10]. Остренко М.В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа [Текст] / М.В. Остренко, С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – №2. – С. 33–42. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-4.
- [11]. Тиховод С.М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – №2 – С. 5–14. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-1.
- [12]. Тиховод С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – № 1. – С. 46–49. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-8.
- [13]. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика – 2010. – № 2. – С. 36–43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6.
- [14]. Ярымбаш Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика – 2011. – № 1. – С. 64–69. DOI: 10.15588/1607-6761-2011-1-10.
- [15]. Ярымбаш Д. С. Особенности визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. С. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – № 1. – С. 12–17. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2
- [16]. Ярымбаш Д. С. Особенности розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. С. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – № 2. – С. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1.
- [17]. Попов Г.В. Математическая модель динамических режимов работы трансформатора на основе расчетов магнитного поля методом конечных элементов [Текст] / Г.В. Попов, А.И. Тихонов, Д.В. Климов // Вестник ИГЭУ – 2007. – № 3. – С. 11–15.
- [18]. Ketabi A. Single-phase transformer modeling for inrush currents simulation using differential evolution [Text] / A. Ketabi, M. Naseh // European Transactions on Electrical Power – 2012. – Vol. 22, Iss. 3, P. 402–411. DOI: 10.1002/etep.614.
- [19]. Rashtchi V. Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm [Text] / V. Rashtchi, E. Rahimpour, E. M. Rezapour // IET Electric Power Applications – 2011. – Vol 5, No. 2. – P. 238–246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.
- [20]. Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов / И.А. Пайков, А.И. Тихонов // Вестник ИГЭУ – 2015. – №3. – С. 38–43.
- [21]. Jazebi S. Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients [Text] / S. Jazebi, F. de León, A. Farazmand, D. Deswal // IEEE Transactions on Power Delivery – 2013. – Vol. 28, No. 4. – P. 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.
- [22]. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2017. – № 1. – С. 24–30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4.
- [23]. Подольцев А.Д. Численный расчет электрических токов, магнитного поля и электродинамических сил в силовом трансформаторе в аварийных режимах с использованием MATLAB/SIMULINK и COMSOL [Текст] / А.Д. Подольцев, Л.Н. Конторович // Техническая электродинамика – 2011. – № 6. – С. 3–10.

- [24]. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитизации переменного и постоянного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш // Вестник НГУ – 2015. – Вып. 3. – С. 95–102.
- [25]. Yarymbash D. S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D. S. Yarymbash, A. M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering – 2015. – Vol. 86, Iss. 2. – P. 86–92. DOI: 10.3103/S1068371215020121
- [26]. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – № 2. – С. 43–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5.
- [27]. Славутский А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов [Текст] / А.Л. Славутский // Вестник Чувашского университета – 2015. – №1. – С. 122–130.
- [28]. Cundeva S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis [Text] / S. Cundeva // Serbian Journal of Electrical engineering – 2008. – Vol. 5, No. 1. – P. 21–30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C
- [29]. Wagner B. Error Evaluation of Surface Impedance Boundary Conditions With Magnetic Vector Potential Formulation on a Cylindrical Test Problem [Text] / B. Wagner, W. Renhart, Ch. Magele // IEEE Trans. on Magn – 2008. – Vol. 44, No 6. – P. 734–737. DOI: 10.1109/TMAG.2007.915979
- [30]. Ida N. High Order Surface Impedance Boundary Conditions with the A- Formulation [Text] / N. Ida, Y. Lemenach, T. Henneron // FACTA UNIVERSITATIS – 2011. – Vol. 24, No 2. – P. 147–155, 2011.
- [31]. Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.
- [32]. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
- [33]. Холоднокатаные электротехнические стали [Текст]: справочник / Б.В. Молотилов [и др.]; ред. Б.В. Молотилов; рец. Б.Г. Лившиц. – Москва: Металлургия, 1989. – 167 с.
- [34]. Tang Q. Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints [Text] / Q. Tang, Sh. Guo, Zh. Wang // Journal of Applied Physics – 2015. – Vol. 117, Iss. 17, – P. 17D522-1–17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.
- [35]. Strac L. Determination of electromagnetic properties of steel for prediction of stray losses in power transformers / L. Strac, D. Zarko // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences – 2015. – V. 23. – P. 1357–1371. DOI: 10.3906/elk-1301-31.
- [36]. Paoli G. Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems [Text] / G. Paoli, O. Biro, G. Buchgraber // IEEE Transactions on Magnetics – 1998. – Vol. 34, No.5. – P. 2625–2628. DOI: 10.1109/20.717607.
- [37]. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – № 2. – С. 65–70. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-9.

Статья поступила в редакцию 12.12.2017

ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ СИЛОВИХ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПЛОСКИМ СТРИЖНЕВИМИ МАГНІТНИМИ СИСТЕМАМИ

ДИВЧУК Т.Є.	старший викладач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, <i>e-mail: DIV2009@i.ua;</i>
ЯРИМБАШ Д.С.	д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, <i>e-mail: yarymbash@gmail.com;</i>
ЯРИМБАШ С.Т.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Україна, <i>e-mail: kstj06@gmail.com;</i>
КИЛИМНИК І.М.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Україна, <i>e-mail: dnukim76@gmail.com;</i>
КОЦУР М.І.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Україна
БЕЗВЕРХНЯ Ю.С.	аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Мета роботи. Розробити новий ефективний підходу для визначення параметрів неробочого ходу за допомогою реалізації комбінації схемної і просторової математичної моделі нестационарних електромагнітних

полів в трифазних трансформаторах з урахуванням конструктивної будови активної частини, нелінійності магнітних властивостей електротехнічних сталей, що забезпечує високу точність і обчислювальну ефективність.

Методи дослідження. Дослідження проводились з використанням методів теорії електромагнітного поля, теорії електричних кіл, теорії силових трансформаторів, математичної фізики, методу скінченних елементів, методів регресійного та гармонійного аналізу.

Отримані результати. Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів на основі чисельної реалізації трьохвимірної математичної моделі силового трифазного трансформатора в режимі неробочого ходу. Запропоновано підхід для підвищення ефективності польового моделювання режиму неробочого ходу, який полягає в скороченні розмірів розрахункової області і переходу до 2D моделей. Він дозволяє скоротити витрати обчислювальних ресурсів більше, ніж в 2,8 раз, часових ресурсів більше, ніж в 250 разів, при середньозваженій нев'язці не більше 3,6%. Визначено закономірності розподілу індукції і енергії магнітного поля для активної частини трансформатора в режимі неробочого ходу, встановлені їх кількісні співвідношення для стружнів різних фаз, що визначають співвідношення струмів і опорів прямої і зворотної послідовності трансформатора. Реалізовано новий підхід визначення параметрів неробочого ходу трифазних трансформаторів з плоскими стружневими магнітними системами на базі методів схемного і 3D моделювання, гармонійного аналізу і симетричних складових. Він характеризується високою ефективністю чисельної реалізації і точністю для перехідних процесів включення трифазного трансформатора без навантаження. Встановлено, що система фазних струмів неробочого ходу характеризується несинусоїдністю та несиметричністю. У гармонійному складі цих струмів переважають 1-я, 5-я і 7-я гармоніки, але при цьому домінує перша гармонійна складова. На основі методу симетричних складових визначені параметри прямої і зворотної послідовності фаз першої гармоніки неробочого ходу і запропонована коригуюча методика, уточнююча традиційний інженерний підхід. Використання корекції параметрів для досліджених співвідношень струмів прямої і зворотної послідовності, підвищує точність розрахунку струмів неробочого ходу на 12-14% і втрат неробочого ходу на 9-11% в порівнянні з загальновідомими інженерними методиками проектування.

Наукова новизна. Запропоновано підхід для підвищення ефективності польового моделювання режиму неробочого ходу, який полягає в скороченні розмірів розрахункової області і переходу до 2D моделей. Реалізовано новий підхід визначення параметрів неробочого ходу трифазних трансформаторів з плоскими стружневими магнітними системами на базі методів схемного і 3D моделювання, гармонійного аналізу і симетричних складових. Він характеризується високою ефективністю чисельної реалізації і точністю для перехідних процесів включення трифазного трансформатора без навантаження.

Практична цінність. Запропоновані в роботі підходи та методики дозволяють скоротити витрати обчислювальних ресурсів більше, ніж в 2,8 раз, часових ресурсів більше, ніж в 250 разів, при середньозваженій нев'язці не більше 3,6% і підвищити точність розрахунку струмів неробочого ходу на 12-14% і втрат неробочого ходу на 9-11% в порівнянні з загально-відомими інженерними методиками проектування.

Ключові слова: схемна модель; тривимірне моделювання; трифазний трансформатор; неробочий хід, електромагнітне поле; метод скінченних елементів; енергія магнітного поля; гармонійний аналіз; несинусоїдальні і несиметричні струми.

APPROACH TO DETERMINATION OF NO LOAD CURRENT OF THREE-PHASE POWER TRANSFORMERS WITH PLANE RODS MAGNETIC SYSTEMS

DIVCHUK T.E.	Senior Lecturer, Department of Electrical Machines, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: DIV2009@i.ua;
YARYMBASH D.S.	Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electrical Machines, Zaporozhye National University, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;
YARYMBASH S.T.	PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: kstj06@gmail.com;
KYLYMNYK I.M.	PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of High Mathematics, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: dnukim76@gmail.com;
KOTSUR M.I.	PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatus, Zaporozhye National Technical University, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;
BEZVERKHNIYA Y.	Postgraduate student, Department of Electrical and Electronic Apparatus, Zaporozhye National Technical University, Ukraine.

Purpose. Development a new effective approach for determining the open-circuited transformer parameters by implementing a combination of a schematic and spatial mathematical model of nonstationary electromagnetic fields in three-phase transformers, taking into account the constructive structure of the active part, the nonlinearity of the

magnetic properties of electrical steels providing high accuracy and computational efficiency.

Methods. The researches were carried out using the methods of the electromagnetic field theory, the theory of electrical circuits, the theory of power transformers, mathematical physics, the finite element method, regression analysis methods.

Results. Theoretical researches of electromagnetic processes based on numerical realization of a three-dimensional mathematical model of a power three-phase transformer in open-circuited operation are carried out. An approach is proposed for improving the field simulation efficiency of the open-circuited operation, which consists in reducing the dimension of the computational domain and the transition to 2D models. It allow reducing the computing resources cost more than 2.8 times, time resources more than 250 times at a weighted average discrepancy of not more than 3.6%. The regularities of the distribution of flux density and the energy of the magnetic field for the active part of the transformer in open-circuited operation are determined. Their quantitative ratio value for the rods of different phases, which determining the ratio of the currents and resistances of the forward and reverse sequences of the transformer are calculated. A new approach to determine the open-circuited parameters of three-phase transformers with flat rod magnetic systems, based on the methods of circuit and 3D modeling, harmonic analysis and symmetrical components is realized. It characterized by high efficiency of numerical realization and accuracy for transient processes in switching moment of the three-phase transformer without loads. System of phase idle currents, characterized by non-sinusoidality and asymmetry, is proved. The harmonic composition of these currents is dominated by the 1st, 5th and 7th harmonics, but the first harmonic component predominates. The parameters of the forward and reverse sequence of the phases of the first harmonic for open-circuited operation, based on symmetrical components method were determined. A corrective technique, which clarifies the traditional engineering approach, is proposed. The use of parameter correction for the researched ratios of the currents of the forward and reverse sequences will be increase the accuracy of calculation of the idle current by 12-14% and the idle losses by 9-11% in comparison with the generally known engineering design techniques.

Originality. An approach is proposed for improving the efficiency of field simulation of the open-circuited operation, which consists in reducing the dimension of the computational domain and the transition to 2D models. A new approach of determination of the open-circuited parameters of three-phase transformers with flat rod magnetic systems based on the methods of circuit and 3D modeling, harmonic analysis and symmetrical components is realized. It characterized by high efficiency of numerical realization and accuracy for transient processes in switching moment of the three-phase transformer without loads.

Practical value. The approaches and techniques allows to reduce the cost of computing resources by more than 2.8 times, time resources more than 250 times, with a weighted average discrepancy of not more than 3.6%, and increasing the accuracy of calculation of idle currents by 12-14% and losses of idling by 9-11% in comparison with the well-known engineering methods of designing.

Keywords: schematic model; three-dimensional simulation; three-phase transformer; open-circuited operation; finite element method; magnetic field energy; harmonic analysis; non-sinusoidal and asymmetrical currents.

REFERENCES

- [1]. Tikhomirov, P. M. (1986). Raschet transformatorov. Moscow: Energoatomizdat, 528. (in Russian).
- [2]. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. (2004). Transformer Engineering, Design and Practice, New York: Marcel Dekker, 478. (in English).
- [3]. Pridubkov, P. Y., Khomenko, I. V. (2010). About the charts of substitution of ideal transformer. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2, 55–61 (in Russian).
- [4]. Roginskaya, L.E., Gusakov, D.V. (2014). Simulation and experimental study of three-phase transformer with twisted tape flat and spatial magnetic cores. *Bulletin of the South Ural State University: Power Engineering*, 14, 4, 76–83. (in Russian).
- [5]. Milyih, V. I., Polyakova N. V. (2013) An analysis of harmonic composition the AC magnetic field associated with a rotating rotor turbine generator, at idle speed and short circuit modes, *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2013-2-1.
- [6]. Novash, I.V., Rumiantsev, Yu.V. (2015). Three-phase transformer parameters calculation considering the core saturation for the matlab-simulink transformer model. *Energetika*, 1, 12–24. (in Russian).
- [7]. Leon, F., Semlyen, A. (1994). Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 1, 231-239. DOI: 10.1109/61.277694.
- [8]. Majumder, R., Ghosh, S., Mukherjee, R. (2016). Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 3, 3300–3306. DOI: 10.15680/IJRSET.2016.0503107.
- [9]. Kislitsyn, A.L. (2001). Transformers. Ulyanovsk: UISTU, 76. (in Russian).
- [10]. Ostrenko, M., Tykhovod, S. (2016). Calculation of losses in elements of construction of power transformers and reactors by finite element method with surface impedance boundary conditions. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 33-42. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-4. (in Russian).
- [11]. Tikhovod, S. (2015). Calculation of transients in transformer on the basis of magneto electrical equivalent schemes with the use of tchebyshev's polynomials. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5-14. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-1. (in Russian).
- [12]. Tykhovod, S. (2015). Improvement of iterative

- methods of the nonlinear systems solution of state equations of magnetoelectric equivalent schemes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 46-49. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-1-8.
- [13]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2010). Specific determination of equivalent circuit parameters in the furnace loop of the AC graphitizing furnace. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 36-43. DOI: 10.15588/1607-6761-2010-2-6.
- [14]. Yarymbash, S., Kylymnyk, I., & Yarymbash, D. (2011). Features of electrothermal conditions of main bus packets of AC graphitizing furnace sections. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 64-69. DOI: 10.15588/1607-6761-2011-1-10.
- [15]. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., & Kylymnyk, I. (2016). Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12-17. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-1-2 (in Russian).
- [16]. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., & Kylymnyk, I. (2016). The features of magnetic flux distribution of the idling mode of the power transformers. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5-12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1. (in Russian).
- [17]. Popov, G.V., Tikhonov, A.I., Klimov, D.V. (2007). The mathematical model of dynamic transformer working conditions on the basis of magnetic field calculations using finite element method. *Vestnik IGEU*, 3, 11-15. (in Russian).
- [18]. Ketabi, A., Naseh, M. (2012). Single-phase transformer modeling for inrush currents simulation using differential evolution. *European Transaction on Electrical Power*, 22, 3, 402-411. DOI: 10.1002/etep.614.
- [19]. Rashtchi, V., Rahimpour, E., Rezapour, E. M. (2011). Parameter identification of transformer detailed model based on chaos optimisation algorithm. *IET Electric Power Applications*, 5, 2, 238-246. DOI: 10.1049/iet-epa.2010.0147.
- [20]. Paikov, I.A., Tikhonov, A.I. (2015). Analysis of power transformer electromagnetic calculation models. *Vestnik IGEU*, 3, 38-43. (in Russian).
- [21]. Jazebi, S., de León, F., Farazmand, A., Deswal, D. (2013). Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, 4, 2509-2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857.
- [22]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24-30. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-1-4
- [23]. Podol'tsev, A.D., Kontorovich, L.N. (2011). Numerical Simulation of Electric Currents, Magnetic Field and Electrodynamics Forces in Power Transformer at Emergency Operation Using MATLAB/SIMULINK and COMSOL. *Technical Electrodynamics*, 6, 3-10. (in Russian).
- [24]. Yarymbash, D.S. (2015). The research of electro-magnetic and thermoelectric processes in the AC and DC graphitization furnaces. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, pp. 95-102 (in Russian).
- [25]. Yarymbash, D.S., Oleinikov, A.M. (2015). On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*, 86, 2, 86-92. DOI: 10.3103/S1068371215020121
- [26]. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-5
- [27]. Slavutskiy, A. (2015). Accounting the residual magnetization in the transformer for the modeling of transients. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 1, 122-130. (in Russian).
- [28]. Cundeva, S. (2008). A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Serbian Journal of Electrical engineering*, 5, 1, 21-30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C
- [29]. Wagner, B., Renhart, W., Magele, Ch. (2008). Error Evaluation of Surface Impedance Boundary Conditions With Magnetic Vector Potential Formulation on a Cylindrical Test Problem. *IEEE Trans. on Magn*, 44, 6, 734-737. DOI: 10.1109/TMAG.2007.915979
- [30]. Ida, N., Lemenach, Y., Henneron, T. (2011). High Order Surface Impedance Boundary Conditions with the A- Formulation. *FACTA UNIVERSITATIS*, 24, 2, 147-155.
- [31]. Leytes, L.V., Pintsov, A. M. (1974). Skhemy zameshcheniya mnogooobmotochnykh transformatorov, Moscow: Energiya, 192. (in Russian)
- [32]. Leytes, L.V. (1981). Elektromagnitnyye raschoty transformatorov i reaktorov, Moscow: Energiya, 392 (in Russian)
- [33]. Molotilov, B.V., Mironov, L.V., Petrenko, A.G., and et al. (1989). Cold-rolled electrical steel: Reference, ed., Moscow: Metallurgy, 167 (in Russian).
- [34]. Tang Qi, Guo S., Wang Z. (2015). Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints. *Journal of Applied Physics*, 117, 17, 17D522-1-17D522-4. DOI: 10.1063/1.4919119.
- [35]. Strac, L., Zarko, D. (2015). Determination of electromagnetic properties of steel for prediction of stray losses in power transformers. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 1357-1371. DOI: 10.3906/elk-1301-31
- [36]. Paoli, G., Biro, O., Buchgraber, G. (1998). Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems. *IEEE Trans. Magn.*, 34,5, 2625-2628. DOI: 10.1109/20.717607
- [37]. Yarymbash, D., Kilimnik, I., & Yarymbash, S. (2015). The dynamic adaptation of circuit models of short-circuit. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 65-70. DOI: 10.15588/1607-6761-2015-2-9.