

Hysteresis and Eddy Currents Effects Simulation in Idling Mode of the Transformer

Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Divchuk T.Ye.

Zaporizhzhia National Technical University
Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. The design parameters errors of the power transformer in idle mode can reach 15-20% or more, because engineering techniques disregard the all factors. To reduce the error of engineering techniques modifying the circuit-analytical model. However, their field of application is limited. Therefore, the aim of the work is to develop interconnected circuit and field models that ensure high accuracy of idling parameters by allow for the parameters of the external network, transformer design features and nonlinear magnetic properties of electrical steel, asymmetry and non-sinusoidal idling currents. To achieve this aim, an improved approach is proposed. The scientific novelty of this approach provides conjugation of the external network objects, represented by the elements of the circuit model, with the testing transformer. For idle mode, it is represented as a spatial magnetic field model. The reduction of the computational time was performed by doubling cancellation of the volume of 3D three-phase transformer domain and the conformal transition to the 2D geometric domain. Determination of the effective magnetic characteristics of electrical steel according to single-phase idling experiment data, allows taking into account the combined effect of hysteresis and eddy currents, design and technological factors on the specific losses and magnetization power. This ensures high accuracy of the description of the interrelation between magnetic flux density and magnetic field strength, reducing of current error and relative errors in the calculation of idling losses up to 1.41% and 1.2% for the 3D model and up to 5.18% and 3.2% for the 2D model.

Keywords: circuit field model, three phase transformer, idling mode, magnetic field, finite element method, harmonic analysis, non-sinusoidal and asymmetrical currents.

DOI: 10.5281/zenodo.2650413

Simularea regimului de mers în gol al transformatorului, având în vedere efectele histerezisului și curenții turbionari

Yarymbash D. S., Kotsur M.I., Yarymbash S. T., Divchuk T. E.

Universitatea Tehnică Națională din Zaporizhya
Zaporizhzhia, Ucraina

Rezumat. În regim de mers în gol discrepanțele dintre parametrii de proiectare și datele de încercare ale unui transformator pot ajunge la 15-20% sau mai mult, deoarece tehnicile de inginerie nu iau în considerare pe deplin pe toți factorii de influență. Pentru a reduce erorile tehnicilor calcul ingineresc se modifică modelele analitice cunoscute de calcul, dar domeniul de aplicare al acestor metode se limitează doar la nomenclatura transformatoarelor existente la moment. Luarea în considerare a influenței factorilor de proiectare asupra parametrilor regimului de mers în gol pentru noi tipuri de transformatoare se poate asigura prin modelarea câmpurilor electromagnetice, care necesită resurse de calcul mari și consum de timp semnificativ. Scopul lucrării constă în dezvoltarea modelelor îmbunătățite de calcul, racordate cu modelele câmpului magnetic spațial care iau în considerare realizarea constructivă structurală a părții active, histerezisul proprietăților magnetice neliniare ale oțelului electric, asimetria și curenții de fază nesinusoidală și asigură o precizie ridicată pentru determinarea parametrilor de mers în gol al transformatorului. Pentru a studieregimul de mers în gol, modelele aplicate au fost racordate cu modele 3D și 2D ale câmpului magnetic, realizarea numerică ale cărora s-a executat pentru un transformator trifazat cu puterea 10 kVA și tensiunea de 380 V / 220 V. Urmare a diminuării de două ori a volumului domeniului 3D a transformatorului trifazat și a tranziției conformale la domeniul cu geometrică 2D s-a asigurat o reducere semnificativă a timpului de calcul prin metoda elementului finit. **Cuvinte-cheie:** model de circuit, model matematic, câmp magnetic, transformator trifazat, mers în gol, metoda elementelor finite, curenți nesinusoidali și asimetrici.

Cuvinte-cheie: model de circuit, model matematic, câmp magnetic, transformator trifazat, mers în gol, metoda elementelor finite, curenți nesinusoidali și asimetrici.

Моделирование режима холостого хода трансформатора с учетом эффектов гистерезиса и вихревых токов

Ярымбаш Д.С., Коцур М.И., Ярымбаш С.Т., Дивчук Т.Е.

Запорожский национальный технический университет

Запорожье, Украина

Аннотация. Погрешность проектных параметров режима холостого хода трансформатора может достигать 15-20%, так как инженерные методики не учитывают комплекс факторов в полном объеме. Для снижения погрешности инженерных методик модифицируют схемно-аналитические модели, но область их применения ограничена существующими сериями трансформаторного оборудования. Учет влияния конструктивных факторов на параметры трансформаторов обеспечивается моделированием электромагнитных полей, но при этом не учитывается влияние внешней сети. Поэтому целью работы является разработка взаимосвязанных схемных и полевых моделей, которые обеспечивают высокую точность определения параметров холостого хода за счет учета параметров внешней сети, особенностей конструкции трансформатора и нелинейных магнитных свойств электротехнической стали, несимметрии и несинусоидальности токов холостого хода. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованный подход, научная новизна которого заключается в сопряжении объектов внешней сети, представленных элементами схемной модели, с исследуемым трансформатором, который для режима холостого хода представлен пространственной моделью магнитного поля. Посредством двукратного сокращения объема 3D области трехфазного трансформатора и конформного перехода к 2D геометрической области обеспечивается существенное сокращение времени вычислений методом конечных элементов. Определение эффективных магнитных характеристик электротехнической стали по данным однофазных опытов холостого хода позволяет учитывать совместное влияние гистерезиса и вихревых токов, конструктивных и технологических факторов на удельные потери и мощность намагничивания, обеспечивая высокую точность описания взаимосвязей между индукцией и напряженностью магнитного поля, снижение токовой погрешности и относительных погрешностей расчета потерь холостого хода до 1,41% и 1,2% для 3D модели и до 5,18% и 3,2% для 2D модели трехфазного трансформатора.

Ключевые слова: схемная модель, математическая модель, магнитное поле, трехфазный трансформатор, холостой ход, метод конечных элементов, несинусоидальные и несимметричные токи.

ВВЕДЕНИЕ

Для бесперебойной работы распределительных электрических сетей установленная мощность силовых трансформаторов должна в несколько раз превышать установленные мощности у потребителей. Поэтому на эффективность и технико-экономические показатели при эксплуатации распределительных сетей в значительной степени влияют потери энергии, которые возникают с момента подключения трансформаторов к сети.

В паспортных данных трансформаторов суммарные потери энергии делятся на две составляющие: на потери в режиме холостого хода (ХХ) и потери в режиме короткого замыкания (КЗ). Также на этапе проектирования силовых трансформатора должны быть определены паспортные параметры режимов ХХ и КЗ, которые в большей степени связаны с реактивной мощностью, а именно: ток ХХ и напряжение КЗ.

В отличие от паспортных данных КЗ параметры ХХ не зависят от номинальной нагрузки. В режиме ХХ активная и реактивная составляющие мощности

возникают одновременно с подключением трансформатора к электрической сети. Поэтому стоимость потребления электрической энергии из-за компенсации потерь в трансформаторе и перетоков реактивной мощности является весомой составляющей в общих расходах на эксплуатацию трансформаторного оборудования.

В ряде случаев расхождения между проектными параметрами и данными испытаний трансформатора в режиме ХХ могут достигать 15–20% и более [1]. Для уменьшения указанных погрешностей, как правило, модифицируют существующие расчетные методики, применяя многомерные векторы с эмпирическими корректирующими компонентами [2]. Однако область приложения таких модифицированных методик ограничена существующими сериями трансформаторного оборудования. Поэтому действующая теория и практика проектирования не могут обеспечить в полном объеме неотложные задачи по повышению точности расчета проектных параметров для новых типов силовых трансформаторов. Таким образом,

повышение точности проектирования силовых трансформаторов на основе современных методов, организационных подходов и программных средств, следует рассматривать как комплекс актуальных задач в научном и прикладном плане.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для определения параметров и характеристик силовых трансформаторов, как правило, используются схемные модели, основанные на теории электрических и магнитных цепей [3, 4]. Сравнительная простота алгоритмов компьютерной реализации обусловила широкое применение схемных моделей в конструкторских расчетах [5, 6].

Современные инженерные методики расчета параметров XX основаны на методе «участков», когда сложную конструкцию магнитной системы разделяют на участки с равномерным распределением магнитной индукции по их длине. В зависимости от активной площади поперечного сечения осуществляют расчет значений индукции магнитного поля при условии неизменности магнитного потока для всех участков [7]. Такой подход к определению потерь XX в трехфазных трансформаторах с плоскими магнитными системами стержневого типа позволяет ограничиться участками шихтованных стержней, ярем и углов магнитной системы. Для номинального напряжения и числа витков первичных фазных обмоток определяют значения ЭДС витка, магнитного потока, а затем – магнитных индукций для всех участков магнитной системы [7]. По данным магнитной индукции и характеристикам выбранной проектантом марки электротехнической стали для каждого участка магнитной системы находят удельные потери и удельную мощность намагничивания и их произведения на активные массы стержней, ярем, углов и активные площади стыков (для мощности намагничивания). Для повышения точности проектных данных XX общие потери и мощность намагничивания XX, которые определяются суммой указанных произведений для каждого участка магнитной системы, умножают на соответствующие компоненты вектора корректирующих

коэффициентов. Однако целый ряд предположений и допущений, которые положены в основу схемных моделей, приводят к упрощенному отображению реальных электромагнитных процессов преобразования энергии переменного тока при ее трансформации [8]. Как следствие, пренебрежение анизотропией магнитных свойств, нелинейностью гистерезисных кривых намагничивания для соответствующих марок холоднокатаных электротехнических сталей [9], особенностями многокомпонентной пространственной конструкции активной части трансформаторов, фазными смещениями токов и падений напряжения, неравномерностью мгновенного распределения магнитных потоков, и составляющих векторов магнитной индукции, несинусоидальностью временных изменений фазных токов XX [10], может привести к существенным погрешностям расчета [11–13].

Более полный учет влияния конструктивных факторов на параметры XX силовых трансформаторов можно обеспечить посредством моделирования магнитного поля трансформатора [14, 15]. Трехмерное моделирование магнитного поля обеспечивает существенное улучшение точности определения параметров силовых трансформаторов. Однако его компьютерная реализация на основе методов конечных элементов в многокомпонентных областях активной части с нелинейными электрофизическими свойствами осложнена большими затратами времени и требованиями к вычислительным ресурсам [16]. В работе [17] предложена трехмерная модель электромагнитных процессов для определения электрических и электроэнергетических параметров электротехнических систем трансформации переменного тока. Однако ее применение ограничено системами с линейными магнитными свойствами материалов. В работах [18, 19] для эффективной численной реализации конечно элементных моделей магнитного поля предлагается применять дифференциацию размеров конечных элементов и аппроксимацию полиномами Лагранжа первого порядка. Использование такого подхода для проектирования силовых трансформаторов осложняется значительной нелинейностью магнитных свойств и разницей геометрических размеров

отдельных элементов [20]. Некоторые авторы упрощают геометрическую модель и применяют модели плоскопараллельного магнитного поля [22], другие – пренебрегают нелинейностью электрофизических свойств [21]. Указанные упрощения и предположения снижают точность результатов моделирования и, в отдельных случаях, могут исказить реальную картину электромагнитных процессов. В работе [21] допускается инвариантность процессов численной реализации нестационарных схемных моделей XX и пространственных моделей стационарного магнитного поля трансформатора. Однако в работе [21] не осуществляется верификация и валидация данных для несимметричных фазных токов. Это не позволяет достоверно оценить влияние гистерезиса магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей на точность расчетов режима XX и его параметров.

Расчетная модель магнитного поля для силового трансформатора в режиме опытного XX должна детально отражать многокомпонентное строение активной части и учитывать нелинейности электрических и магнитных свойств активных материалов. Эффективность численной реализации математической модели магнитного поля должна соответствовать требованиям оптимизации конструктивных параметров. Это обуславливает актуальность разработки усовершенствованных схемных моделей, взаимосвязанных с пространственными моделями магнитного поля, которые учитывают конструктивное устройство активной части трансформатора, гистерезис нелинейных магнитных свойств электротехнической стали магнитной системы, несимметрию несинусоидальных временных изменений фазных токов, чтобы обеспечить высокую вычислительную эффективность и точность определения паспортных параметров XX силового трансформатора.

Поэтому целью работы является разработка взаимосвязанных схемных и полевых моделей, которые обеспечивают высокую точность определения параметров холостого хода за счет учета параметров внешней сети, конструктивных особенностей

трансформатора и нелинейных магнитных свойств электротехнической стали, несимметрии и несинусоидальности токов холостого хода.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования режима XX на примере трехфазного силового трансформатора с воздушным естественным охлаждением мощностью 10 кВА и напряжениями 380В/220 В рассматриваются схемные модели, сопряженные с моделями магнитного поля в 3D и 2D геометрических областях (рис. 1).

В 3D и 2D схемно-геометрических моделях с электрической схемой испытаний в режиме XX сопрягаются 3D и 2D геометрические области активной части трехфазного силового трансформатора (рис. 1). Фазные обмотки опытного трехфазного трансформатора «W_A», «W_B», «W_C» соединяются в "Y" и подключаются через переходные сопротивления «Z_A», «Z_B», «Z_C» к испытательному трансформатору со схемой обмоток "Y/D".

Выходные линейные напряжения опытного трехфазного трансформатора на стороне "D" вторичных обмоток считаются симметричными и синусоидальными [23]:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{AB(max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{AB}), \\ U_{BC} = U_{BC(max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{BC}), \\ U_{CA} = U_{CA(max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{CA}), \end{cases} \quad (1)$$

а переходные сопротивления принимаются одинаковыми и значительно меньшими, чем сопротивления XX опытного трансформатора «Z_{Id}»:

$$|Z_A| = |Z_B| = |Z_C| \ll |Z_{Id}|$$

В 3D и 2D геометрические модели активной части (рис. 1а, б) входит область с фазными обмотками «W_A», «W_B», «W_C», шихтованная магнитная система с подобластями стержней ступенчатой формы – «L_A», «L_B», «L_C», прямоугольных ярм «Yoke», T-образных «K_T» и Г-образных «K_G» углов с прямыми стыками.

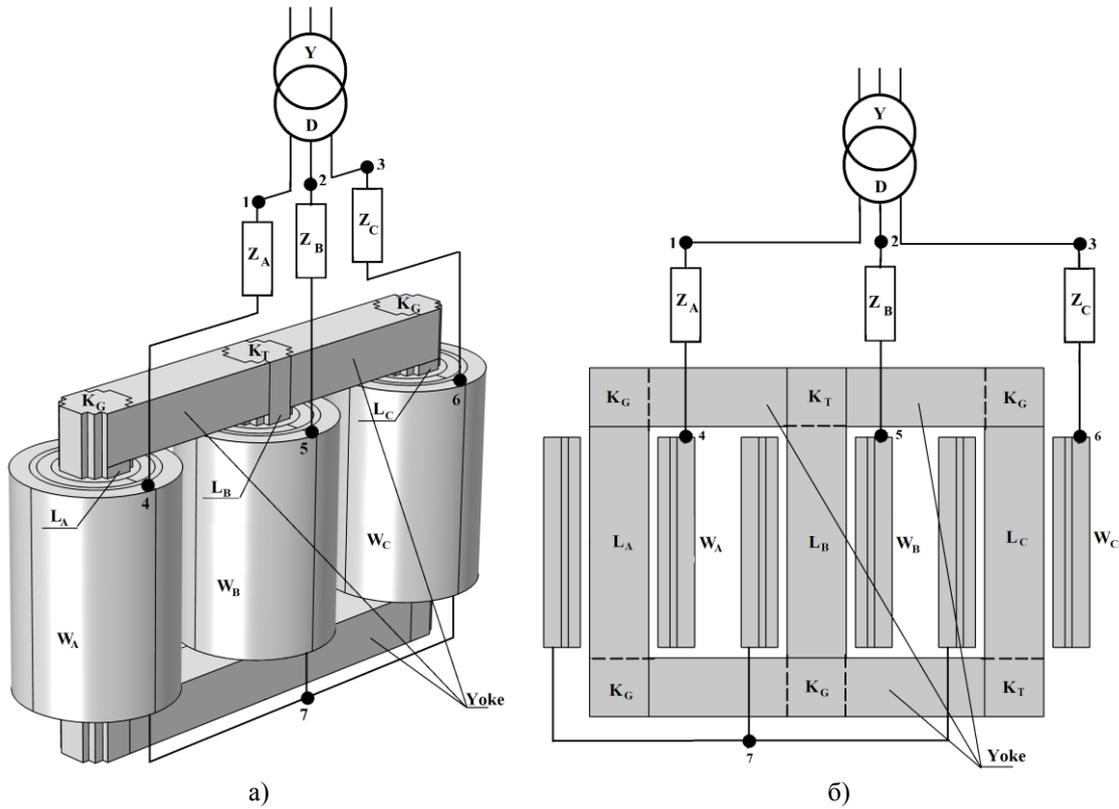


Рис. 1. 3D (а) и 2D (б) схемно-геометрические модели трехфазного силового трансформатора в опытном режиме XX¹.

Предположение об отсутствии токов смещения и свободных зарядов позволяет отобразить математическую модель магнитного поля силового трансформатора системой нелинейных уравнений вида [20]:

$$\begin{cases} \sigma(\theta)(\partial\mathbf{A}/\partial\tau + \mathit{grad}(\mathbf{U})) + \\ + \mathit{rot}[(\mu_0\mu(\mathbf{H}))^{-1}\mathit{rot}(\mathbf{A})] = \mathbf{J}_e|_j; \\ \mathbf{B}(\mathbf{H}) = \mu_0\mu(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H}; j \in \{W_A, W_B, W_C, \\ L_A, L_B, L_C, K_{G1}, K_{G2}, K_{T1}, \dots, K_{T4}\}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ – гистерезисная характеристика намагничивания; \mathbf{B} , \mathbf{H} – индукция и напряженность магнитного поля; μ , μ_0 – относительная магнитная проницаемость и магнитная проницаемость вакуума; \mathbf{U} , \mathbf{A} – электрический и векторный магнитный потенциалы; \mathbf{J}_e – плотность стороннего тока; θ – температура; σ – удельная электропроводность.

Для выбранного трансформатора в интервале изменения испытательных напряжений однофазных опытов XX ($0,7U_{ном} \leq U_{нх} \leq 1,1U_{ном}$) программой обработки данных

многоканального цифрового осциллографа формируются векторы мгновенных значений времени $\{\tau_k\}$ фазных токов $\{i_{A,k}\}$, $\{i_{B,k}\}$, $\{i_{C,k}\}$ и напряжений $\{u_{A,k}\}$, $\{u_{B,k}\}$, $\{u_{C,k}\}$. После этого рассчитываются массивы данных для эффективных характеристик намагничивания электротехнической стали $\{H_k, B_k\}$. Указанные характеристики нормируются по данным опыта XX для номинального напряжения (рис. 2).

По сравнению с гистерезисными характеристиками увеличение площади, ограниченной экспериментальными характеристиками намагничивания стали магнитной системы трансформатора (рис. 2), что обуславливается удельными потерями от вихревых токов и дополнительными удельными потерями от технологических факторов: раскроя пакетов магнитной системы, шихтовки и прессования магнитной системы и т.п. [7].

Для описания экспериментальных характеристик намагничивания (рис. 2) применяется JA-модель [24], которая позволяет учесть обратимую и необратимую составляющие намагничивания. Для определения пяти компонентного вектора

¹ Appendix 1

эмпирических коэффициентов JA-модели по методика, предложенная в работе [25].
 данным однофазных опытов XX используется

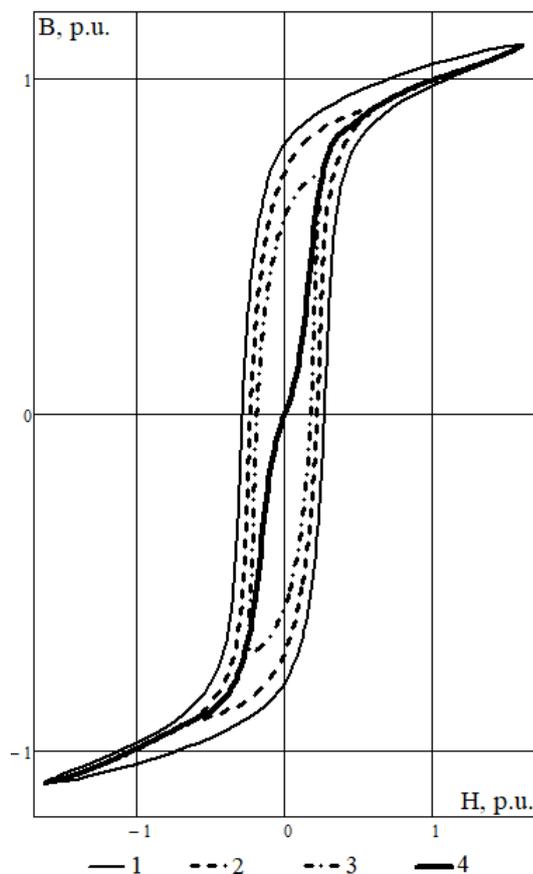


Рис. 2. Нормированные характеристики стали шихтованной магнитной системы (1 – 110% $U_{\text{фном}}$; 2 – 90% $U_{\text{фном}}$; 3 – 80% $U_{\text{фном}}$; 4 – основная характеристика).²

На внутренних границах подобластей (рис. 1) задаются условия сопряжения тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля [23]. Принимаются однородные граничные условия на внешней границе расчетной области, которая имеет сферическую форму для 3D-геометрической модели (рис. 1а) и форму круга для 2D-геометрической модели (рис. 1б). Для обеспечения точности моделирования диаметры внешних границ должны быть в три раза больше диагональных размеров магнитной системы [17].

3D и 2D математические модели магнитного поля (2) с условиями сопряжения, однородными условиями на внешних границах и условиями калибровки Кулона реализуются методом установления для однородных начальных условий [23]. В общем случае начальные условия Коши должны соответствовать первому закону

коммутации для момента подключения к испытательному трансформатору "Y/D" схемы XX, коммутируемой средствами Comsol Multiphysics [23], (Рис.1).

Авторами [23] обосновано, что геометрическая симметрия расчетной области относительно плоскости xOz, обуславливает симметрию магнитных процессов в режиме XX. Поэтому для числовой реализации 3D модели магнитного поля (1) рассматривается только половина расчетной сферической области, которая отделяется плоскостью, параллельной плоскости xOz, проходящей через оси стержней магнитной системы. На границе этой плоскости задаются граничные условия симметрии [23]. Благодаря сокращению объема 3D геометрической области в 2 раза обеспечивается пропорциональное уменьшение временных и вычислительных ресурсов, необходимых для реализации метода конечных элементов.

² Appendix 1

Хотя поперечные сечения участков стержней и ярем имеют различную конфигурацию, по действующим инженерным методикам [1,2,7] их площади определяют, как площадь круга одинакового диаметра. Для расчета активных площадей применяют соответствующие каждому участку коэффициенты круга, заполнения и усиления. Произведение указанных коэффициентов всегда должно быть меньше единицы.

По данным [23] в режиме ХХ магнитное поле локализуется в магнитной системе трехфазного силового трансформатора. Для уменьшения погрешностей токов ХХ и невязок между данными 2D и 3D моделирования реализуется конформное отображение круговых областей в поперечных сечениях стержней и ярем на

полосы [23]. Однако отличия в распределении магнитных потоков по шихтованным пакетам магнитной системы будут обуславливать дополнительные токовые погрешности в 2D моделях, значения которых требуют оценки.

Токовые погрешности ХХ необходимо определять путем верификации данных 2D и 3D моделирования и их валидации с экспериментом. Для обобщения и визуализации данных схемного моделирования и взаимосвязанного моделирования магнитного поля для опытов ХХ приводятся временные изменения нормированных фазных токов, определяемых отношениями их мгновенных значений к амплитуде тока ХХ опытного трансформатора (рис. 3).

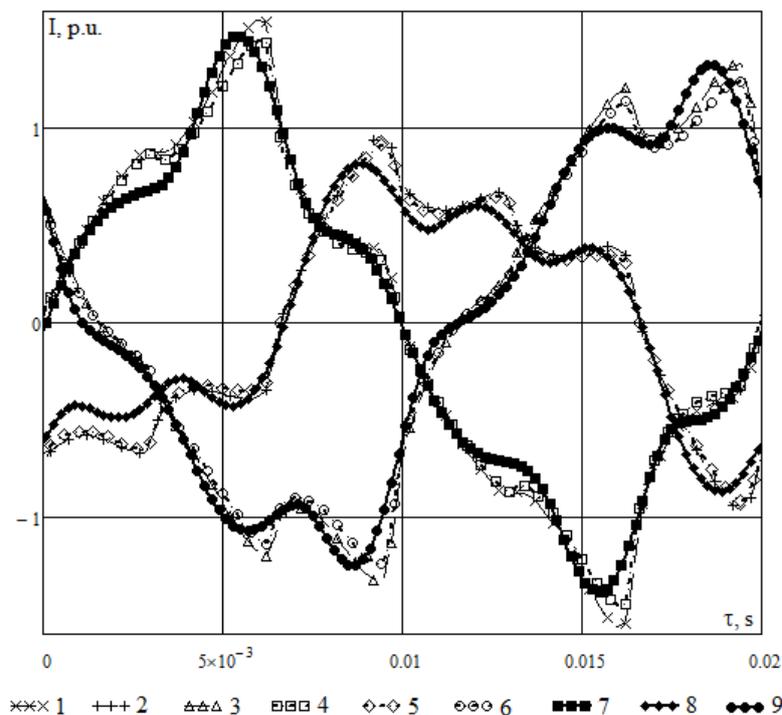


Рис.3. Временные зависимости токов ХХ в фазах трансформатора, верификация и валидация схемных моделей, сопряженных с 3D и 2D моделями магнитного поля (1 – ток ХХ в фазе А (2D моделирование); 2 – ток ХХ в фазе В (2D моделирование); 3 – ток ХХ в фазе С (2D моделирование); 4 – ток ХХ в фазе А (3D моделирование); 5 – ток ХХ в фазе В (3D моделирование); 6 – ток ХХ в фазе С (3D моделирование); 7 – ток ХХ в фазе А (эксперимент); 8 – ток ХХ в фазе В (эксперимент); 9 – ток ХХ в фазе С (эксперимент))³.

По результатам моделирования и экспериментальным исследованиям впервые установлено, что временные изменения фазных токов ХХ характеризуются несимметричными фазовыми сдвигами, которые достигают 8–12 электрических

градусов (рис. 3), и несинусоидальностью со значительным влиянием нечетных высших гармонических составляющих, амплитуды которых уменьшаются от 21–24% для третьей и пятой гармоник до 4% и 0,7% для седьмой и девятой гармоник включительно.

³ Appendix 1

Результаты 3D и 2D моделирования, а также экспериментальные данные для фазных токов являются качественно подобными друг к другу как по фазовым сдвигам, так и по характеру изменений во времени (рис. 3). Токовые невязки 2D модели равны 6,12%, 4,49%, 6,08% для действующих значений токов в фазах А, В, С и 5,69% для действующего значения тока XX по сравнению с результатами 3D моделирования. По сравнению с экспериментом токовые погрешности для действующих значений тока XX составляют 1,41% для 3D модели и 5,18% для 2D модели. Токовая погрешность для расчетов по известной инженерной методике [1] существенно выше и приближается к 8,5%.

Для опытного трансформатора действующие значения фазных токов в фазах А, В и С составляют 113,2%, 72,4%, 112,9% от действующего значения тока XX трансформатора. Это приводит к увеличению действующего значения первой гармонической составляющей тока XX обратной последовательности фаз до 27,91% и уменьшению до 5,08% для прямой последовательности фаз.

При сравнении с опытными данными относительные погрешности расчета потерь XX составляют: 1,2% – для 3D модели, 3,2% – для 2D модели и 9,2% – для инженерной методики [7].

Верификация и валидация данных моделирования подтвердила высокую точность усовершенствованного подхода, основанного на синтезе схемных моделей XX с конечно-элементными моделями магнитных полей, подтвердила существенное повышение точности расчетов паспортных параметров режима XX силового трехфазного трансформатора по сравнению с инженерной методикой [7].

Низкая точность инженерных методик расчета параметров XX обусловлена, прежде всего, допущениями по электрической симметрии и синусоидальным изменениям фазных токов XX. Поэтому даже модификации этих методик, использующие вектора корректирующих эмпирических коэффициентов, должны иметь локальные области применения, например, для модернизации отдельных типов серийных трансформаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен усовершенствованный подход для схемного моделирования режима XX трехфазных силовых трансформаторов, который позволяет реализовать синтез схемных моделей опыта XX с 3D и 2D моделями магнитных полей в трехфазных силовых трансформаторах для мгновенных значений напряжений и токов XX, а также позволяет учесть несинусоидальный характер их временных изменений, особенности конструктивного исполнения активных частей, влияние гистерезисных явлений и вихревых токов на нелинейные свойства магнитных материалов. Научная новизна усовершенствованного подхода к моделированию электромагнитных процессов заключается в сопряжении в единую модель объектов внешней сети, которые представлены схемной моделью, с исследуемым в режиме холостого хода трансформатором, для которого процессы преобразования электрической энергии переменного тока представлены пространственной моделью магнитного поля.

Новый подход к определению магнитных характеристик стали магнитной системы по данным однофазных опытов XX силового трансформатора позволяет учесть совместное влияние свойств гистерезиса и вихревых токов на удельные потери и мощность намагничивания. Он характеризуется высокой точностью описания взаимосвязей между индукцией и напряженностью магнитного поля.

Все это обеспечивает высокую точность расчетов паспортных параметров XX. По сравнению с данными опыта XX токовая погрешность и относительная погрешность для потерь XX составляют 1,41% и 1,2% для 3D модели; 5,18% и 3,2% для 2D модели трехфазного силового трансформатора.

Установлено, что в режиме XX токи в фазах трансформатора характеризуются несимметричностью и несинусоидальностью. В результате их действующие значения в фазах А, С возрастают на 12,9–13,2%, а в фазе В уменьшаются на 28,6% относительно тока XX трансформатора.

С учетом особенностей симметрии 3D области с активной частью трансформатора предложено применить граничные условия симметрии магнитного поля на поверхности плоскости с осями стержней магнитной системы, что позволяет без потери точности расчетов сократить в 2 раза объем области

моделирования, число конечных элементов, вычислительные ресурсы и время расчетов.

Применение метода конформных преобразований для перехода от 3D к 2D моделям позволяет для числовой реализации в режиме XX трехфазного силового трансформатора более чем на порядок сократить объем вычислительных ресурсов и затраты времени при условии ограничения токовых погрешностей на уровне 5–6%.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** 3D (a) and 2D (b) circuit-geometric models of the three-phase power transformer in experimental idling mode.

²**Fig. 2.** Setting characteristics of steel for laminated core (1 – 110% U_{fnom} ; 2 – 90% U_{fnom} ; 3 – 80% U_{fnom} ; 4 – basic characteristic)

³**Fig. 3.** The time-dependence idle currents in transformer phases, and their verification and validation for 3D and 2 D circuit-field models (1 – no-load current phase A (2D simulation); 2 – no-load current phase B (2D simulation); 3 – no-load current phase C (2D simulation); 4 – no-load current phase A (3D simulation); no-load current phase B (3D simulation); 6 – no-load current phase C (3D simulation); 7 – no-load current phase A (experiment); 8 – no-load current phase B (experiment); 9 – no-load current phase C (experiment))

Литература (References)

[1] Kulkarni, S. V. Transformer Engineering: Design and Practice. New York, 2004, 478 p.

[2] Biki, M. A. Proektirovanie silovykh transformatorov. Raschet jsnivnykh parametrov. [Design of power transformers. Calculation of the main parameters]. Moscow, 2013. – 612 p.

[3] Novash, V.I., Romyancev Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki matlab-simulink s uchetom nasycheniya magnitprivoda [Calculation of parameters of the model of a three-phase transformer from the matlab-simulink library taking into account the saturation of the magnetic core]. *Energetika. Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edinenij SNG*, 2015, no. 1, pp. 12–24. (in Russian).

[4] Schiop, A., Popescu, V. Pspice simulation of power electronics circuit and induction motor drives. *Revue Roumaine des Sciences Techniques–Serie Electrotechnique et Energetique*. 2007, vol. 52, No. 1, pp. 33–42. (in English).

[5] Lup'e, A. I. Process vklyucheniya silovogo transformatora na holostoj hod i korotkoe замыкание [The process of switching power transformer on idle and short circuit]. *Elektrotehnika*, 2008, no. 2, pp. 2–18. (in Russian).

[6] Lejtes, L. V. Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, 1981, 365 p. (in Russian).

[7] Tihomirov, P. M. Raschet transformatorov [Transformer Calculation]. Moscow, 1986, 528 p. (in Russian).

[8] Jamali, M., Mirzaie, M., Asghar-Gholamian S. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2011, Vol. 109, No. 3, pp. 17–20. [doi: 10.5755/j01.eee.109.3.162](https://doi.org/10.5755/j01.eee.109.3.162)

[9] Singh, A. K., Patel, S. Mitigation of Inrush Current For Single Phase Transformer by Control Switching Method. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*, 2015, Vol. 4, pp. 146–150. (in English).

[10] Taghikhani, M. A., Sheikholeslami, A. Taghikhani, Z. Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform. *IJEEE*, 2015, Vol. 11, No. 2, pp. 174–183. (in English). Available at: <http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf>.

[11] Chiesa, N. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis [Text] / N. Chiesa, B. A. Mork, H. K. Hoidalen // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2010. – V. 25. – N. 4. – P. 2599–2608. [DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2045518](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2045518)

[12] Khederzadeh, M. Mitigation of the impact of transformer inrush current on voltage sag by TCSC [Text] / M. Khederzadeh // *Electric Power Systems Research*. – 2010. – V. 80. – N. 9. – P. 1049–1055. [DOI: 10.1016/j.epsr.2010.01.011](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.011)

[13] Tihovod, S. M. Modelirovanie perekhodnykh processov v transformatorah na osnove magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniya [Transient modeling of transformers based on magnetolectric equivalent circuits] *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2014, no. 2, pp. 59–68. (in Russian). [doi: 10.15588/1607-6761-2014-2-8](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2014-2-8)

[14] Lazarev, N. S., Shul'ga, R. N., Shul'ga, A. R. Toki vklyucheniya silovykh [Currents enable power Electrical Engineering]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 11, pp. 11–17. (in English).

[15] Majumder, R., Ghosh S., Mukherjee, R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, Vol. 5, No. 3, pp. 3300–3306. (in English). [DOI: 10.15680/IJRSET.2016.0503107](https://doi.org/10.15680/IJRSET.2016.0503107)

[16] Yarymbash, D. S., Yarymbash, S. T., Kotsur, M. I., Litvinov, D. O. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 1, pp. 65–

74. (in English). doi: [10.15588/1607-3274-2018-1-8](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8)
- [17] Yarymbash, D. Influence of the electrodes blanks location on the electric heating power distribution in the acheson furnaces core. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, no. 1, pp.5-11. (in English). doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-1>
- [18] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2016, no. 2, pp. 43-50. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [19] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2017, no. 1, pp. 24-30. (in English). doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4>
- [20] Ostrenko, M. V., Tihovod, S. M. Raschet poter' v elementakh konstrukcii silovykh transformatorov i reaktorov metodom konechnykh ehlementov s granichnymi usloviyami impedansnogo tipa [Calculation of losses in structural elements of power transformers and reactors by the finite element method with impedance boundary conditions]. *Elektrotehnika i ehlektroenergetika*, 2016, no. 2, pp. 33–42. (in Russian). doi: 10.15588/1607-6761-2016-2-4
- [21]. Pajkov, I. A., Tikhonov, A. I. Analiz modelej dlya ehlektromagnitnogo rascheta silovykh transformatorov [Analysis of models for electromagnetic calculation of power transformers]. *Vestnik IGEHU*, 2015, no. 3, pp. 38–43. (in Russian).
- [22] Podol'cev, A. D., Kontorovich, L. N. Chislennyj raschet ehlektricheskikh tokov, magnitnogo polya i ehlektrodinamicheskikh sil v silovom transformatore v avarijnykh rezhimakh s ispol'zovaniem MATLAB/SIMULINK i COMSOL [Numerical calculation of electric currents, magnetic field and electrodynamic forces in a power transformer in emergency mode using MATLAB / SIMULINK and COMSOL]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2011, no. 6, pp. 3–10 (in Russian).
- [23] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2018, no. 2, pp. 56-66. (in English). doi: [10.15588/1607-6761-2017-2-6](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6)
- [24] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Divchuk, T. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers. *14th International Conference: Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, February 20-24, Lviv–Slavske, Ukraine, 2018, pp. 308–313. (in English). doi: [10.1109/TCSET.2018.8336209](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336209)
- [25] Cundeva, S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Serbian Journal of Electrical engineering*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 21–30. (in English). doi: [10.2298/SJEE0801021C](https://doi.org/10.2298/SJEE0801021C)
- [26]. Bastos, J. P. A, Sadowski, N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Boca Raton: CRC Press, 2003, 510 p. ISBN 9780203911174. doi: [10.1201/9780203911174](https://doi.org/10.1201/9780203911174)

Сведения об авторах.



Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.

E-mail: yarymbash@gmail.com



Коцур Михаил Игоревич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина.

E-mail: kotsur8@gmail.com



Ярымбаш Сергей Тимофеевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.

E-mail: kstj06@gmail.com



Дивчук Татьяна Евгеньевна, старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Украина.

E-mail: DIV2009@i.ua