

## Electromagnetic Processes Simulation of Power Transformers in Operation and in No-load Modes

Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Kylymnyk I.M.  
Zaporizhzhia National Technical University  
Zaporizhzhia, Ukraine

**Abstract.** In the designing preproduction of power transformers for calculating design data, a circuit models are widely used, which doesn't fully reflect the structural features of the transformer and spatial energy conversion. This leads to a significant increase of the error of design calculations and calculations of the magnetization parameters in load operation of transformers. This is especially the case in networks with alternative generation of electrical energy. Therefore, the aim of the work is to estimate the influence of design features and non-linear characteristics of electrical steel on the magnetization parameters in loading variations mode of the transformer. To achieve this aim, an improved model of electromagnetic processes in loaded power transformers is proposed. Its scientific novelty makes sense in the conjugation circuit models of external network and user's network with a spatial model of the magnetic field in the transformer. When the transformer working in operation mode, the magnetizing currents and idle currents are characterized by asymmetry and non-sinusoidality. Reducing the load of the transformer from operation to idle modes, these effects are enhanced. Therefore, the effective values of the magnetization currents increase in different intervals: (1.066%; 1.161%) for phase A; (1.275%; 1.303%) for phase B; and (1.187%, 1.308%) for phase C. At using of the data of the coupled circuit models and the magnetic field model for the ratios and coefficients of parabolic and polynomial regression provides high accuracy in calculating of the magnetization parameters under various transformer load conditions.

**Keywords:** three-phase transformer, rated mode, circuit models, magnetic field model, finite element method, magnetic field energy, magnetization currents, harmonic components, regression equations.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3713396

**UDC:** 621.314.21

### Modelarea proceselor electromagnetice în timpul funcționării transformatoarelor de putere sub sarcină și în regim de mers în gol

Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Kilimnik I.M.  
Universitatea Națională " Polytechnica Zaporizhye "  
Zaporozhye, Ucraina

**Rezumat.** La faza de pregătire și organizare a fabricării transformatoarelor de putere frecvent se utilizează modele chematice de calcul care nu reflectă în totalitate caracteristicile structurale ale transformatorului și caracteril de converie spațială a energiei elctrice. La funcționarea transformatorului în sarcină, curenții de magnetizare, precum și curenții la mers în gol au semne de asimetrie și nesinusoidalitate. Aceasta duce la o creștere semnificativă a erorii calculelor la faza de proiectare și a rezultatelor calculării parametrilor de magnetizare în timpul funcționării transformatoarelor sub sarcină, în special în rețelele cu generare alternativă de energie electrică. Urmare a acestora, obiectivul lucrării constă în estimarea influenței particularităților constrictive și a caracteristicilor neliniare ale oțelului electrotehnic asupra parametrilor de magnetizare la devierea sarcinii transformatorului. Pentru a atinge acest obiectiv s-a propus un model îmbunătățit de analiză a proceselor electromagnetice în transformatoarele de putere în regim de sarcină. Noutatea științifică constă în racordarea modelelor de circuit ale unei rețele externe și a unei rețele de consum cu modelul spațial al câmpului magnetic care există în transformatorul de forță. Micșorarea sarcinii transformatorului de la valoarea nominală pînă la regimul de mers în gol are ca urmare amplificarea efectelor enumerate, de exemplu, creșterea valrilor curentului de ers în gol: în faz A de la 1.066% la 1.161%; în faza B de la 1.275% la 1.303%) și în faza C de la 1.187) % la 1.308%. Utilizarea tipului propus de modele ale schemelor electrice cuplate și a câmpului magnetic al transformatorului pentru relațiile și coeficienții funcției regresiei polinomiale conduce la majorarea precizie de calcul aș parametrilorcircuitului de magnetizare pentru la funcționarea trnsformatorului cu diferite valori ale sarcinii.

**Cuvinte-cheie:** transformator trifazat, regim nominal, modele de circuite, model de câmp magnetic, metoda elementului finit, energia câmpului magnetic, curenți de magnetizare, componente armonice, ecuații de regresie.

## Моделирование электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода

Ярымбаш Д.С., Коцур М.И., Ярымбаш С.Т., Килимник И.М.

Национальный университет «Запорожская политехника»

Запорожье, Украина

**Аннотация.** При конструкторской подготовке производства силовых трансформаторов для расчета проектных данных широко применяются схемные модели, которые не отображают в полном объеме особенности конструктивного строения трансформатора и пространственного преобразования энергии. Это приводит к существенному росту погрешности проектных расчетов и расчетов параметров намагничивания при работе трансформаторов под нагрузкой, особенно, в сетях с альтернативной генерацией электрической энергии. Поэтому целью работы является оценка влияния особенностей конструкции и нелинейных характеристик электротехнической стали на параметры намагничивания при изменениях нагрузки трансформатора. Для достижения поставленной цели предлагается усовершенствованная модель электромагнитных процессов в нагруженных силовых трансформаторах. Ее научная новизна заключается в сопряжении схемных моделей внешней сети и сети потребителя с пространственной моделью магнитного поля в трансформаторе. При работе трансформатора под нагрузкой токи намагничивания также, как и токи холостого хода, характеризуются асимметричностью и несинусоидальностью. Снижение нагрузки трансформатора от номинального режима до режима холостого хода усиливает эти эффекты, поэтому действующие значения токов намагничивания увеличиваются в разных интервалах: (1,066 %; 1,161 %) – для фазы А, (1,275 %; 1,303 %) – для фазы В и (1,187 %; 1,308 %) – для фазы С. Использование данных сопряженных схемных моделей и модели магнитного поля для соотношений и коэффициентов параболической и полиномиальной регрессии обеспечивает высокую точность расчетов параметров намагничивания при различных режимах нагрузки трансформатора: погрешность расчетов энергии магнитного поля не превышает 0,321 %, токов намагничивания – 0,217 %. Рассмотренные модели могут применяться для проектирования силовых трансформаторов с близкими паспортными данными холостого хода и короткого замыкания, а также для расчета данных и характеристик для мониторинга трансформаторов в эксплуатации.

**Ключевые слова:** трехфазный трансформатор, номинальный режим, схемные модели, модель магнитного поля, метод конечных элементов, энергия магнитного поля, токи намагничивания, гармонические составляющие, уравнения регрессии.

### ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы являются важным и ответственным оборудованием, обеспечивающим передачу электрической энергии от места генерации к потребителям, а также ее распределение между сетями потребителей. При многократной трансформации электрической энергии переменного тока параметры и характеристики силовых трансформаторов оказывают существенное влияние на работу энергосистем, особенно, при перетоках реактивной мощности в системах энергоснабжения и в сетях энергопотребителей [1–3].

В процессе эксплуатации силовые трансформаторы могут работать в режимах, которые отличаются от номинального, например, на разных ступенях устройств регулирования напряжения, с различными токовыми нагрузками. На современном этапе развития электроэнергетики увеличивается доля альтернативной генерации электрической энергии, которая зависит от погодных и других факторов. В определенные периоды времени отсутствие

или снижение мощности альтернативной генерации для ветростанций может быть связано с небольшой скоростью ветра, а для гелиостанций – с низким солнечным излучением в облачную погоду, вечером или его отсутствием ночью [4]. При таких обстоятельствах трансформаторное оборудование в сетях с альтернативными источниками генерации может работать с низкой токовой нагрузкой в режимах, которые в определенные промежутки времени будут приближаться к режиму холостого хода.

Как правило, рабочие режимы трансформаторов исследуются на основе параметров, рассчитанных для номинального режима работы [5,6]. Обычно при проектировании силовых трансформаторов определяются номинальные (паспортные) параметры опытного холостого хода и опытного короткого замыкания [7–10]. К ним относятся ток холостого хода, напряжение опытного короткого замыкания [7–10] и потери активной мощности в этих испытательных (расчетных) режимах. Однако в эксплуатационных режимах характеристики

трансформаторов, которые определяются для номинальных параметров, рассчитанных при номинальных токах и напряжениях, могут иметь высокую погрешность.

Современные требования к повышению точности проектных данных, прогнозных данных и характеристик для мониторинга силовых трансформаторов в эксплуатации обуславливают актуальность решения вопросов, связанных с учетом особенностей электромагнитных процессов в эксплуатационных режимах работы трансформаторов при изменениях нагрузки от режима холостого хода до номинального режима.

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На этапе конструкторской подготовки производства для определения проектных параметров и характеристик силовых трансформаторов широко применяются схемные модели [11, 12] и методы теории линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей [13, 14]. Использование схемных моделей обуславливается, с одной стороны, эффективными высокоточными алгоритмами их компьютерной реализации [15,16], а, с другой стороны, применением инвариантных к объекту проектирования программных средств [17, 18]. Для их приобретения или использования не требуются значительные затраты. Поэтому рабочие режимы трансформаторов обычно исследуются на основе схем замещения [11, 12], параметры которых рассчитываются, как правило, для данных опытных режимов холостого хода и короткого замыкания.

Точность схемного моделирования ограничивается, прежде всего, точностью определения активных и реактивных сопротивлений электрических контуров в эксплуатационных диапазонах изменения токовых нагрузок. В схемных моделях не отображается сложное конструктивное строение активной части силового трансформатора с магнитной системой, системами обмоток и электроизоляции. Это приводит к качественному и количественному искажению реальной картины электромагнитных процессов, протекающих в нагруженных и ненагруженных силовых трансформаторах. Для повышения точности проектных расчетов для отдельных типоразмеров в существующих сериях силовых трансформаторов применяются корректиру-

ющие коэффициенты [7]. Они определяются при согласовании расчетных данных с данными испытаний трансформаторов этой же серии. Однако использование такого подхода для новых серий силовых трансформаторов весьма затруднительно, так как для корректировки действующих расчетных методик требуются значительные затраты времени, финансовых, материальных ресурсов на изготовление промышленных моделей, опытных образцов изделий и их испытания.

В работах [17,19] отмечается, что пространственное распределение магнитной энергии в области активной части трансформатора существенно зависит от ее конструктивного строения, конструктивных и геометрических параметров магнитной системы, системы обмоток, их отдельных частей и взаимного расположения. Учет указанных факторов требует коррекции параметров в схемах замещения трехфазного трансформатора, в том числе, при симметричной трехфазной системе напряжений питания и симметричной трехфазной нагрузке [11,12]. Однако без широкого спектра экспериментальных данных такую коррекцию осуществить нельзя, что будет приводить к росту погрешностей определения параметров электрических и магнитных цепей [11].

При проектировании новых серий силовых трансформаторов в работах [19,20] рекомендуется применять моделирование переменных электромагнитных полей и осуществлять компьютерную реализацию нестационарных моделей магнитного поля в трехмерной области активной части с использованием методов пространственных конечных элементов. Однако существенные различия геометрических размеров и расстояний между деталями и узлами магнитных систем, систем обмоток, систем главной и продольной электроизоляции, а также отличия до нескольких порядков значений параметров электрофизических и магнитных свойств изоляционных и активных материалов, нелинейность гистерезисных магнитных характеристик анизотропных электротехнических сталей могут существенно осложнить практическое применение моделей магнитного поля [21,22].

Для снижения затрат времени и повышения эффективности моделирования авторы [19,20] предлагают неравномерное распределение пространственных конечных элементов в расчетной области. Размеры конечных элементов рекомендуется уменьшить, а плот-

ность их распределения увеличить только в подобластях, нагруженных токами или магнитными потоками, а также возле границ сред с различными электрическими и магнитными свойствами. За пределами таких подобластей размеры конечных элементов значительно увеличивают, чтобы существенно уменьшить их общее количество [19,20]. Однако при проектировании силовых трансформаторов затраты времени вычислений и требования к вычислительным ресурсам остаются достаточно высокими.

Для данного класса задач также применяются известные предположения и упрощения, основанные на линеаризации физических параметров активных материалов, на объединении многокомпонентных конструкций в однокомпонентные элементы с размерами одного порядка, на преобразовании нестационарных моделей в стационарные частотные модели, на пренебрежении эффектами гистерезиса и вихревых токов [21,23]. Благодаря этим предположениям и упрощениям можно существенно сократить время вычислений. Однако достоверность данных такого моделирования не всегда будет подтверждаться и соответствовать экспериментальным исследованиям.

В классических методиках проектирования режим нагрузки силового трансформатора рассматривают как суперпозицию двух режимов: опытного холостого хода и короткого замыкания [1,2]. Для исследования ненагруженного трансформатора в [24] предлагается «свободно» изменять расположение фазных обмоток по высоте окна магнитной системы, чтобы разделить пространство моделирования дополнительными горизонтальными и вертикальными плоскостями симметрии. В режиме холостого хода трансформатора это позволяет сократить объем расчетной области и количество конечных элементов в 2–4 раза. В работе [21] совместно исследуются схемная модель переходных процессов включения в сеть ненагруженного силового трансформатора и пространственная модель стационарного магнитного поля в области активной части. Однако авторы [21] не приводят результаты верификации и валидации данных моделирования, чтобы подтвердить их точность и достоверность.

Для режима короткого замыкания силового трехфазного трансформатора авторы [17] применяют частотную осесимметричную модель магнитного поля для одной из фаз ак-

тивной части. Это позволяет перейти от трехмерной к двумерной геометрической области моделирования и на несколько порядков уменьшить количество степеней свободы для метода конечных элементов. Поэтому затраты времени можно существенно сократить, а эффективность компьютерной реализации повысить. Однако частотная формулировка задачи магнитного поля не позволяет исследовать влияние высших гармонических составляющих токов намагничивания при работе трансформатора с низкой нагрузкой.

Рассмотренные подходы обеспечивают эффективную компьютерную реализацию моделей магнитного поля в опытных режимах холостого хода и короткого замыкания силового трансформатора, но их нельзя применить для исследования трансформаторов в режимах низкой нагрузки. Для таких режимов необходимо учитывать влияние на параметры трансформатора высших гармонических составляющих токов намагничивания и перераспределение энергии магнитного поля между остовом и системами обмоток.

Таким образом, при изменении нагрузки силовых трансформаторов от режима холостого хода до номинального режима необходимо учитывать особенности конструктивного строения активной части, нелинейность характеристик активных материалов и распределение энергии магнитного поля в подобластях магнитной системы, систем обмоток и электроизоляции, что обуславливает актуальность разработки усовершенствованных моделей электромагнитного преобразования энергии переменного тока, обеспечивающих высокую точность и вычислительную эффективность при моделировании.

Целью работы является оценка влияния нелинейных магнитных свойств электротехнической стали и особенностей конструктивного строения активной части на параметры фазных токов намагничивания силовых трансформаторов при изменении нагрузки от режима холостого хода до номинального режима.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В режиме низкой нагрузки для моделирования электромагнитных процессов в трехфазном силовом трансформаторе необходимо сформировать расчетную область. Для номинальных режимов нагрузки трансформатора расчетная область с

активной частью трансформатора ограничивается внешней поверхностью стального бака или кожуха [2]. Однако при работе силового трансформатора с низкой нагрузкой действующие значения токов оказываются значительно меньше их номинального паспортного значения. Можно считать, что при низких токах поле рассеяния на внутренней поверхности бака существенно уменьшится. Поэтому внутренняя поверхность стального бака будет ограничивать расчетную область модели магнитного поля.

Для 3D модели расчетной области активной части трехфазного силового трансформатора (рис. 1) целесообразно использовать математическое описание ее конструктивной структуры в виде кортежей геометрических размеров узлов и деталей [25], входящих в системы обмоток, электрической изоляции и магнитной системы, которые дополняются кортежами параметров электрофизических свойств и характеристик электроизоляционных, конструктивных, проводниковых материалов и холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей [26].

Первичные фазные обмотки трансформатора подключаются к внешней сети, а вторичные фазные обмотки – к сети потребителя (рис. 2). Это обеспечивает сопряжение схемных моделей на сторонах энергопитания и потребителей с моделью нестационарного магнитного поля в 3D области активной части трансформатора (1). Система линейных напряжений источника питания принимается симметричной:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{AB(\max)} \cdot \sin(\omega\tau + \alpha_{AB}); \alpha_{AB} = 0; \\ U_{BC} = U_{BC(\max)} \cdot \sin(\omega\tau + \alpha_{BC}); \alpha_{BC} = \pi/3; \\ U_{CA} = U_{CA(\max)} \cdot \sin(\omega\tau + \alpha_{CA}); \alpha_{CA} = 2\pi/3. \end{cases} \quad (1)$$

Фазные обмотки исследуемого трансформатора соединяются по схеме Y/Y с группой соединения «0» и имеют одинаковое число витков на сторонах высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений, соответственно:

$$\begin{cases} W_A = W_B = W_C = W_{BH}; \\ W_a = W_b = W_c = W_{HH}. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом несинусоидальности токов намагничивания трансформатора исследуются изменяющиеся во времени электромагнитные процессы, которые описываются известной системой уравнений в векторной форме [27]:

$$\text{rot} \{ \overline{\mathbf{H}} \}_{i,j} = \{ \overline{\delta} \}_{i,j}; \delta_{i,j} = \sigma(\theta)_{i,j} \cdot \{ \overline{\mathbf{E}} \}_{i,j}; \quad (3)$$

$$\text{rot} \{ \overline{\mathbf{E}} \}_{i,j} = - \frac{\partial \{ \overline{\mathbf{B}} \}_{i,j}}{\partial t}, \quad (4)$$

для потенциальных магнитных и электрических полей:

$$\{ \text{rot} \{ \overline{\mathbf{A}} \}_{i,j} = \{ \overline{\mathbf{B}} \}_{i,j}; \text{grad} \{ V \}_{i,j} = \{ \overline{\mathbf{E}} \}_{i,j}, \quad (5)$$

которые удовлетворяют условиям неразрывности вида:

$$\{ \text{div} \{ \overline{\mathbf{B}} \}_{i,j} = 0, \text{div} \{ \overline{\mathbf{E}} \}_{i,j} = 0. \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $V$  – векторный магнитный и скалярный электрический потенциалы;  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  – индукция и напряженности магнитного и электрических полей;  $\theta$  – температура, которая соответствует принятому классу нагревостойкости электрической изоляции [2];  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $\delta$  – плотность тока в обмотках фаз А ( $j = 1$ ), В ( $j = 2$ ), С ( $j = 3$ ); индексами  $i$  обозначаются подобласти расчетной области модели магнитного поля (рис. 1).

В соответствии с данными [26] нелинейная характеристика намагничивания для принятой марки анизотропной электротехнической стали задается для участков остова трансформатора с учетом углов между направлениями прокатки и магнитного потока.

На границах сопряжения сред с различными магнитными и электрическими свойствами для системы (3) применяются условия сопряжения для тангенциальных составляющих напряженностей [27] и однородные условия на внешних границах расчетной области – для векторного магнитного потенциала (рис. 1).

Со стороны ВН трансформатор подключается к внешней сети, с одинаковыми переходными сопротивлениями: ( $Z_A = Z_B = Z_C$ ).

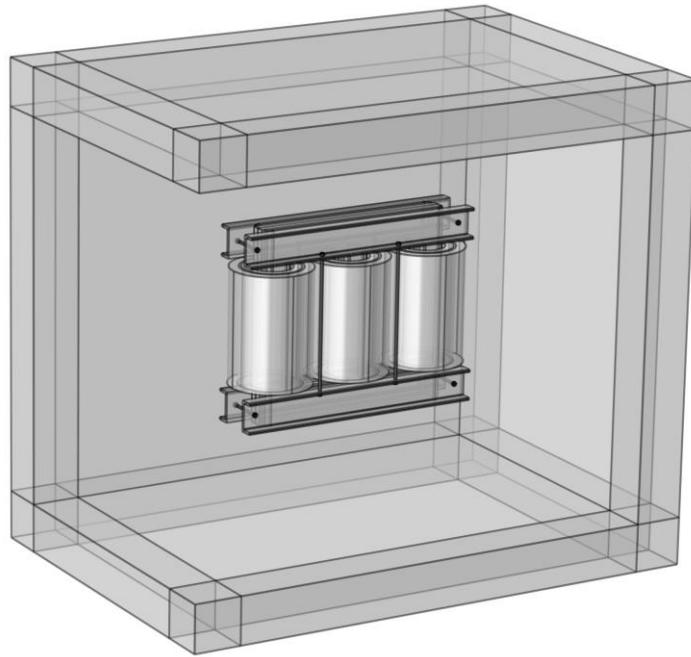


Рис. 1. Расчетная область 3D модели магнитного поля силового трансформатора <sup>1</sup>.

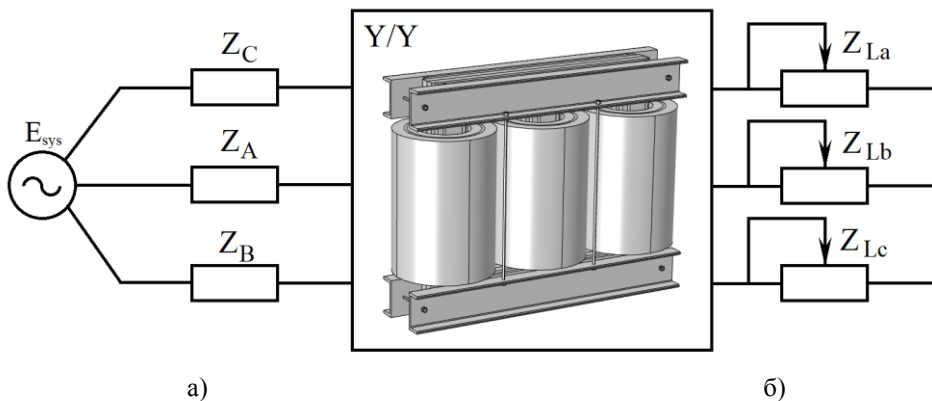


Рис. 2. Сопряжение схемных моделей и 3D модели магнитного поля силового трехфазного трансформатора <sup>2</sup>.

Поэтому для системы уравнений (1) начальные условия Коши должны соответствовать известным законам коммутации [28].

Таким образом, систему дифференциальных уравнений (2) с условиями (3) – (5), 3D геометрическую модель активной части трехфазного силового трансформатора, схемные модели внешней сети и сети потребителя (рис. 1) можно рассматривать как составляющие сопряженной схемно-полевой модели.

Эта модель описывает электромагнитные процессы преобразования электрической энергии переменного тока при работе нагруженных и ненагруженных силовых трансформаторов и реализована

программными средствами COMSOL Multiphysics [19] на примере трехфазного трансформатора мощностью 10 кВА с напряжениями 380/220 В.

Режимы нагрузки изменяются от режима холостого хода до номинального.

По данным моделирования определяют составляющие энергии магнитного поля  $Q_{\Sigma i}$  и распределение ее плотности  $Q$  в  $i$ -х подобластях активной части, первичные  $i_{j(BH)}(\tau)$  и вторичные  $i_{j(HH)}(\tau)$  фазные токи, а также рассчитывают токи намагничивания в фазах трансформатора:

$$Q(x,y,z,\tau) = (\mathbf{B}(x,y,z,\tau), \mathbf{H}(x,y,z,\tau)),$$

$$Q_{\Sigma i}(\tau) = \iiint_V (\mathbf{B}(x,y,z,\tau), \mathbf{H}(x,y,z,\tau)) dx dy dz$$

$$Q^* = \frac{Q(x,y,z,\tau)}{\max[Q(x,y,z,\tau)_{ном}]} \cdot 100\%.$$

$$\left\{ i_j(\tau) = i_{j(BH)}(\tau) - i_{j(HH)}(\tau) \cdot \frac{W_{HH}}{W_{BH}}; j = 1,2,3, (7) \right.$$

которые нормируют:

$$\left\{ i_j^*(\tau) = \frac{i_j(\tau)}{\sqrt{2} \cdot I_{xx}} \cdot 100\%; I_{xx} = \frac{I_{xx}^*[\%] \times I_{ном}}{100\%}, (8) \right.$$

где индекс «xx» обозначает паспортное значение тока холостого хода, а индекс «ном» соответствует номинальному режиму.

Для этого режима работы трансформатора анализируется пространственное распределение плотности энергии магнитного поля, значения которой также нормируются:

В номинальном режиме распределение плотности энергии магнитного поля в поперечном (Рис. 3а) и в продольном (Рис. 3а, б) сечениях активной части представлено в момент времени, который соответствует амплитудному значению тока в фазе А. Для лучшей визуализации картины распределения плотности энергии ее значения  $Q^* \geq 40\%$  отображаются одним, наиболее темным, цветом (рис. 3). Магнитное поле трансформатора преимущественно локализуется в под областях обмоток (рис. 3), где концентрация энергии достигает 72,5% от области активной части (рис. 4). При этом значение энергии магнитного поля в под области магнитной системы составит 27,5%, т.е. будет практически в три раза ниже чем в под области обмоток трансформатора (рис. 4).

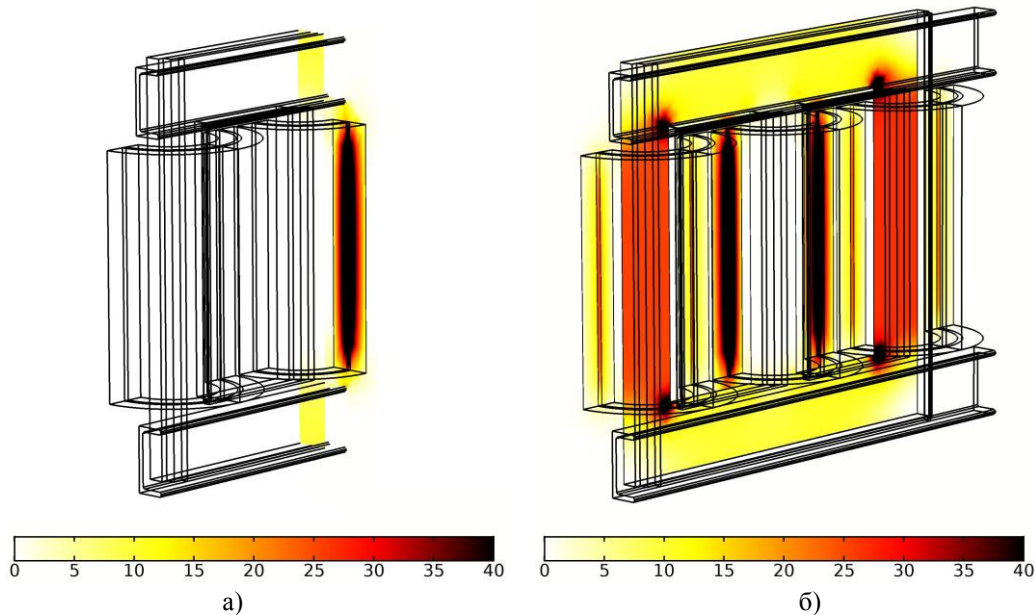


Рис. 3. Распределение плотности энергии магнитного поля в поперечном (а) и продольном сечениях (б) активной части трансформатора<sup>3</sup>

Значения энергии магнитного поля в под областях обмоток и магнитной системы уравниваются и будут составлять 29% от номинального режима работы при снижении токовой нагрузки трансформатора

$$s^* = \left( \frac{\sum_{j=1}^3 I_j}{3 \cdot I_H} \right) \cdot 100\%$$

до 62%. В магнитной системе ненагруженного трансформатора энергия магнитного поля достигает 32,4%, что на 4,9% больше чем в номинальном режиме (рис. 4).

Характер зависимостей энергии магнитного поля в под областях активной части от загрузки трансформатора позволяет использование уравнений параболической регрессии (Рис. 4):

$$\begin{cases} Q_{\Sigma i}(s^{\bullet}) = a_i + b_i(s^{\bullet}) + c_i(s^{\bullet})^2, i = 1, 2, \\ Q_{\Sigma 3}(s^{\bullet}) = Q_{\Sigma 1}(s^{\bullet}) - Q_{\Sigma 2}(s^{\bullet}), \\ a_3 = a_1 - a_2, b_3 = b_1 - b_2, c_3 = c_1 - c_2, \end{cases} \quad (9)$$

где индексы  $i = 1$  относится к области активной части трансформатора,  $i = 2$  – к подобластям системы обмоток и  $i = 3$  – магнитной системы.

С помощью метода наименьших квадратов, который реализован в структуре средств MathCad [29], определяются коэффициенты параболической регрессии (табл. 1) и выполняется оценка значений погрешности соотношений (8):

$$\max(\delta_i) = \max |Q_{\Sigma i}(s_i^{\bullet}) - Q_{\Sigma i,k}|; i = 1, 2, 3,$$

для дискретных данных, которые обозначены круговыми, квадратными и треугольными маркерами для различных подобластей активной части (рис. 4).

Погрешности расчетов энергии магнитного поля в активной части, системе обмоток и магнитной системе трансформатора составляют (0,321%; 0,304%; 0,051%), соответственно, что подтверждает высокую точность уравнений регрессии (9) (табл. 1). Кроме того, значение коэффициента  $c_3$  практически на два порядка ниже значений коэффициентов  $c_1, c_2$  (табл. 1), что связано с

линейностью зависимости энергии магнитного поля в магнитной системе от токовой нагрузки трансформатора (рис. 4). Эта линейность обуславливается снижением значений магнитных потоков и индукции магнитного поля в стержнях и ярмах из-за роста падений напряжения при увеличении токов в контурах первичных фазных обмоток.

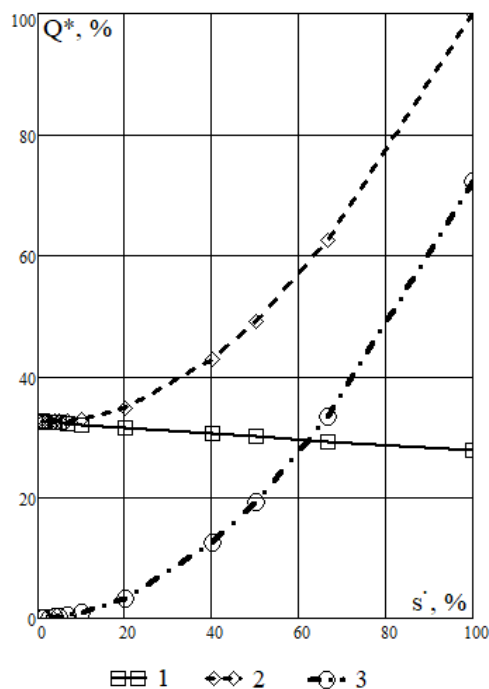


Рис.4. Зависимость энергии магнитного поля от загрузки трансформатора (1 – магнитная система; 2 – активная часть; 3 – обмотки) 4.

Таблица 1<sup>5</sup>.

Коэффициенты полиномиальной регрессии в уравнениях (9) 6

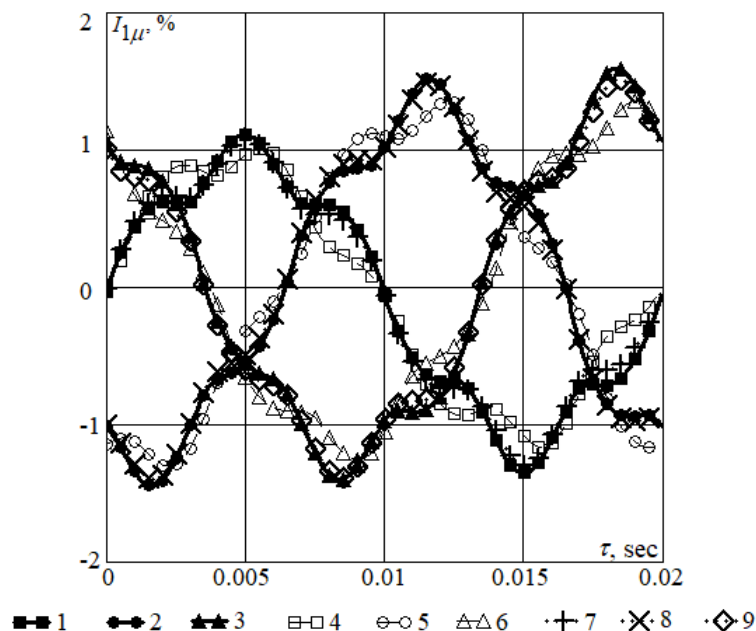
$a_1 = 32.456$	$b_1 = -0.011$	$c_1 = 6.881 \times 10^{-3}$	$\max(\delta_1) = 0.321 \%$
$a_2 = 0$	$b_2 = 0.043$	$c_2 = 6.812 \times 10^{-3}$	$\max(\delta_2) = 0.304 \%$
$a_3 = 32.456$	$b_3 = -0.054$	$c_3 = 6.899 \times 10^{-5}$	$\max(\delta_3) = 0.051 \%$

Таким образом в нагруженном трансформаторе энергия магнитного поля локализуется в подобластях магнитной системы и фазных обмоток, как в окнах магнитной системы, так и вне остова активной части (рис. 3). Пространственная картина, отображающая распределение плотности энергии магнитного поля в активной части трансформатора, определяется конструктивными особенностями активной части и распределением токов в фазных обмотках на разных сторонах напряжения трехфазного силового трансформатора [2]. Для больших токов

большая часть магнитной энергии будет приходиться на зону обмоток (рис. 4).

Однако при снижении токовой нагрузки обмоток эта часть энергии магнитного поля будет уменьшаться, а влияние нелинейных магнитных характеристик электротехнической стали и неравномерного распределения магнитной энергии по стержням и ярмам магнитной системы трансформатора будет увеличиваться. Поэтому для малозагруженных трансформаторов неравномерность распределения и несинусоидальность фазных токов намагничивания будет более выраженной (рис. 5).





**Рис. 5. Фазные токи намагничивания (1 – ток в фазе А (холостой ход); 2 – ток в фазе В (холостой ход); 3 – ток в фазе С (холостой ход); 4 – ток в фазе А (номинальный режим); 5 – ток в фазе В (номинальный режим); 6 – ток в фазе С (номинальный режим); 7 – ток в фазе А (20% номинального режима); 8 – ток в фазе В (20% номинального режима); 9 – ток в фазе С (20% номинального режима))<sup>7</sup>.**

Нелинейность магнитных свойств и характеристик холоднокатаной электротехнической стали существенно влияет на характер изменения во времени и на асимметрию фазных токов намагничивания (рис. 5). При уменьшении токовой нагрузки трансформатора от номинальной (100%) до режима холостого хода (0%) действующие значения токов намагничивания будут изменяться в разных интервалах (1,066%; 1,161%), (1,275%; 1,303%) и (1,187%; 1,308%)% для фаз А, В и С (рис. 4), соответственно. С увеличением токовой нагрузки асимметрия фазных токов намагничивания снижается, а составляющие прямой последовательности фаз увеличиваются. В гармоническом составе токов намагничивания преобладают первые и пятые гармонические составляющие. С увеличением токовой нагрузки трансформатора действующие значения тока намагничивания уменьшаются от 1,24% для режима холостого хода до 1,17% для номинального режима или на 5,56% относительно паспортного значения тока холостого хода. Соответственно снижаются действующие значения его первой

гармонической составляющей с 1,226% до 1,16% и или на 5,3%, соответственно.

Для математического описания зависимости тока намагничивания от загрузки трансформатора (рис. 6) предлагаются известные уравнения полиномиальной регрессии [30]:

$$\left\{ I_{1\mu}(s^{\bullet}) = \sum_{i=0}^n k_i \cdot (s^{\bullet})^i; I_{д\mu}(s^{\bullet}) = \sum_{i=0}^n l_i \cdot (s^{\bullet})^i, \right. \quad (10)$$

и применяется метод наименьших квадратов для определения коэффициентов регрессии  $k_i$ ,  $l_i$  [30] (табл. 2).

Если в соотношениях (10) принять показатель степени  $n$  равным 3, то погрешность расчетов не превысит 0,217% по сравнению с данными моделирования. Верификация данных схемно-полевого моделирования и данных, которые рассчитаны с помощью уравнений регрессии, подтверждает высокую точность соотношений (9), (10).

Это обеспечивает высокую точность прогноза параметров и характеристик для мониторинга силовых трансформаторов в эксплуатации.

<sup>7</sup> Appendix 1

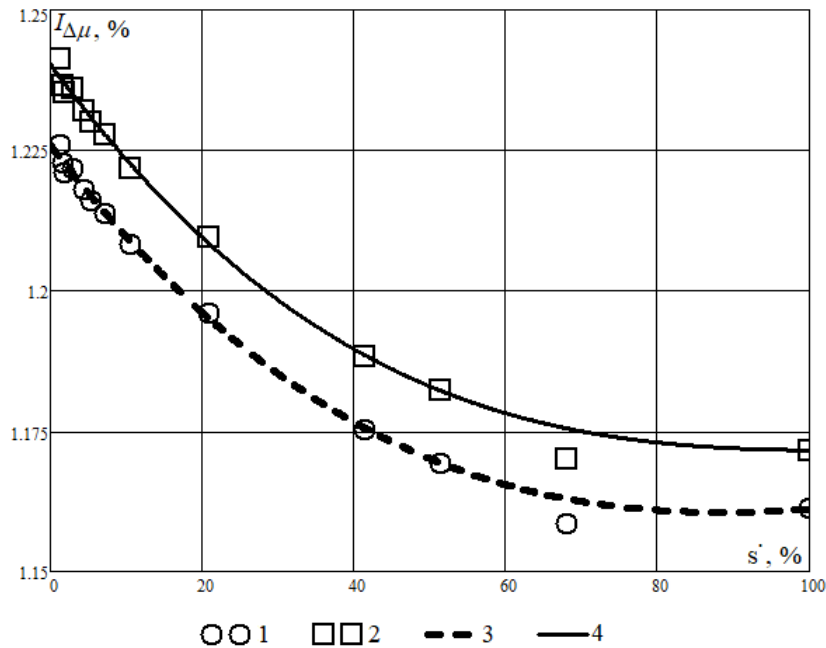


Рис. 6. Зависимость тока намагничивания от загрузки трансформатора (1 – первая гармоника тока намагничивания (моделирование); 2 – ток намагничивания (моделирование); 3 – первая гармоника тока намагничивания (полиномиальная регрессия); 4 – ток намагничивания (полиномиальная регрессия))<sup>8</sup>.

Таблица 2<sup>9</sup>.

Коэффициенты полиномиальной регрессии в уравнениях (10)<sup>10</sup>

$k_0 = 1.226$	$k_1 = -1.772 \times 10^{-3}$	$k_2 = 1.499 \times 10^{-5}$	$k_3 = -3.736 \times 10^{-8}$
$l_0 = 1.240$	$l_1 = -1.854 \times 10^{-3}$	$l_2 = 1.657 \times 10^{-5}$	$l_3 = -4.906 \times 10^{-8}$

Также следует отметить, что при токовой нагрузке трансформатора более 60% изменения тока намагничивания можно считать весьма незначительными, так как они не превышают 0,015% (рис. 6). Это связано с увеличением коэффициента мощности  $\cos(\varphi_1)$  на первичной стороне трансформатора при увеличении токов нагрузки при  $\cos(\varphi_2) = 1$  и, как следствие, со снижением влияния падений напряжения в контурах первичных фазных обмоток на уменьшение магнитных потоков и индукций магнитного поля в стержнях и ярмах магнитной системы. Известно, что падения напряжения в контурах обмоток трансформатора пропорциональны паспортному значению его напряжения короткого замыкания. Поэтому безразмерные зависимости токов намагничивания от загрузки трансформатора (10) можно применять для трансформаторов с аналогичным конструктивным исполнением, аналогичными значениями напряжения короткого замыкания, но с иными другими паспортными данными.

Высокая точность предложенной методики расчета параметров холостого хода

и токов намагничивания трансформатора с использованием соотношений (9), (10) обусловлена, прежде всего, использованием данных схемно-полевого моделирования, в которых учитываются особенности конструктивного исполнения трехфазных силовых трансформаторов, нелинейность характеристик анизотропных холоднокатаных электротехнических сталей, асимметрия фазных токов холостого хода и намагничивания, а также их гармонический состав.

Таким образом, предложенную методику расчета параметров холостого хода и намагничивания можно рассматривать как развитие известных подходов к проектированию силовых трансформаторов с использованием корректирующих коэффициентов [31]. При этом вместо корректирующих коэффициентов предложены корректирующие функции (9), (10), которые расширяют область применения на другие типы силовых трансформаторов с близкими паспортными значениями тока холостого хода и напряжения короткого замыкания, в том числе, для прогнозных

данных и характеристик при мониторинге силовых трансформаторов в эксплуатации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана усовершенствованная схемно-полевая модель для нестационарных процессов электромагнитного преобразования энергии переменного тока в активной части трехфазных силовых трансформаторов, работающих под нагрузкой и без неё, которая позволяет учесть особенности конструктивного исполнения трансформаторов, нелинейные свойства магнитных материалов, несинусоидальный характер и асимметрию токов намагничивания. Научная новизна усовершенствованной схемно-полевой модели заключается в сопряжении схемных моделей внешней сети и сети потребителя с пространственной полевой моделью трансформатора, работающего под нагрузкой или в режиме холостого хода.

Установлено, что при работе трансформатора под нагрузкой фазные токи намагничивания также, как токи холостого хода, характеризуются несимметричностью и несинусоидальностью. При снижении нагрузки трансформатора от номинального режима до режима холостого хода действующие значения токов намагничивания будут увеличиваться, но в разных интервалах (1,066 %; 1,161 %) – для фазы А, (1,275 %; 1,303 %) – для фазы В и (1,187 %; 1,308 %) – для фазы С, соответственно.

Полученные уравнения регрессии (9), (10) и установленные коэффициенты параболической и полиномиальной регрессии для энергии магнитного поля, токов намагничивания обеспечивают высокую точность расчетов при различных режимах нагрузки трансформатора. При сравнении с данными схемно-полевого моделирования установлено, что погрешность расчета энергии магнитного поля не превышает 0,321 %, а токов намагничивания – 0,217 %.

Безразмерные функции (9), (10) могут применяться вместо корректирующих коэффициентов при проектировании различных силовых трансформаторов с близкими паспортными значениями тока холостого хода и напряжения короткого замыкания, а также, в расчетах прогнозных данных и характеристик для мониторинга этих трансформаторов в эксплуатации.

### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** The calculated area of the magnetic field 3D model of the power transformer.

<sup>2</sup>**Fig. 2.** Conjugation of the circuit models and the magnetic field 3D model of the power three-phase transformer.

<sup>3</sup>**Fig. 3.** Magnetic field energy density distribution in the active part of the transformer in cross-section (a) and in longitudinal sections (b).

<sup>4</sup>**Fig. 4.** The dependence of the magnetic field energy on the loads of the transformer in operation mode (1 - magnetic system; 2 - active part; 3 - windings).

<sup>5,6</sup>**Table 1.** Polynomial regression coefficients in equations (9).

<sup>7</sup>**Fig. 5.** Phase magnetization currents (1 - current in phase A (in idle mode); 2 - current in phase B (in idle mode); 3 - current in phase C (in idle mode); 4 - current in phase A (in rated mode); 5 - current in phase B (in rated mode); 6 - current in phase C (in rated mode); 7 - current in phase A (20% of rated mode); 8 - current in phase B (20% of rated mode); 9 - current in phase C (20% of rated mode)).

<sup>8</sup>**Fig. 6.** The dependence of the magnetization current on the loads of the transformer in operation mode (1 - the first harmonic of the magnetization current (simulation); 2 - the magnetization current (simulation); 3 - the first harmonic of the magnetization current (polynomial regression); 4 - magnetization current (polynomial regression)).

<sup>9,10</sup>**Table 2.** Polynomial regression coefficients in equations (10).

### 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., Rummyancev 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] Daus, Yu., Yudaev, I. Estimation of Solar Energy Potential under Conditions of Urban Development. *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017). AER-Advances in Engineering Research*. 2017, vol. 133, pp. 156-161. doi: [10.2991/aime-17.2017.26](https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.26).
- [5] Lup'e, A. I. Process vklucheniya silovogo transformatora na holostoj hod i korotkoe zamykanie [The process of switching power

- transformator on idle and short circuit]. *Elektrotehnika*, 2008, no. 2, pp. 2–18. (in Russian).
- [6] Lejtes, L. V. Elektromagnitnye raschety trasnformatorov 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.
- [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.. Available at: <http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf>.
- [11] Chiesa, N., Mork, B. A., Hoidalén, H. K. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010, vol. 25, no. 4, pp. 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. *Electric Power Systems Research*. 2010, vol. 80, no. 9, pp. 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 perekhodnyh processov v transformatorah na osnove magnitoehlektricheskikh 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 Russian).
- [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. doi: [10.15680/IJIRSET.2016.0503107](https://doi.org/10.15680/IJIRSET.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. doi: [10.15588/1607-3274-2018-1-8](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8)
- [17] 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](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-4)
- [18] 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).
- [19] Yarymbash, D.S., Kotsur, M.I., Yarymbash, S.T., Divchuk, T.Ye. (2019). Modelirovaniye rezhima kholostogo khoda transformatora s uchetom effektivnosti i vikhrevykh tokov. [Hysteresis and Eddy Currents Effects Simulation in Idling Mode of the Transformer]. *Problemele energeticii regionale*, no. 1 (39), pp. 12–21. (in Russian). doi: [10.5281/zenodo.2650413](https://doi.org/10.5281/zenodo.2650413)
- [20] 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. doi: [10.1109/TCSET.2018.8336209](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336209)
- [21] Podol'cev, A. D., Kontorovich, L. N. Chislennyj raschet ehlektricheskikh tokov, magnitnogo polya i ehlektrodinamicheskikh sil v silovom transformatore v avariynykh 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).
- [22] 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. doi: [10.2298/SJEE0801021C](https://doi.org/10.2298/SJEE0801021C)
- [23] 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)
- [24] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. Podkhod k opredeleniyu tokov kholostogo khoda

- silovykh trekhfaznykh transformatorov s ploskimi sterzhnevymi magnitnymi sistemami. [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 Russian). doi: [10.15588/1607-6761-2017-2-6](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6)
- [25] Divchuk, T., Yarymbash, D., Kotsur, M., & Yarymbash, S. Garmonicheskii sostav tokov kholostogo khoda silovogo transformatora. [An idle currents harmonic composition of power transformer]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2019, no. 1, pp. 42-51. (in Russian). doi: [10.15588/1607-6761-2019-1-4](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2019-1-4)
- [26] Molotilov, B.V., Mironov, L.V., Petrenko, A.G. Kholodnokatanye elektrotekhnicheskiye stali. [Cold-rolled electrical steel]. Moscow, 1989, 168 p. (in Russian).
- [27] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, M., Divchuk, T. Electromagnetic Parameters Determination of Power Transformers, *3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, January, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 70–75. doi: [10.1109/IEPS.2018.8559573](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559573)
- [28] Bessonov, L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow, 2003, 317 p. (in Russian).
- [29] Lozynskiy, A., Moroz, V., Paranchuk, Y. Rozv'yazuvannya zadach elektromekhaniky v seredovyshchakh paketiv MathCAD i MATLAB [Solving electromechanical problems in MathCAD and MATLAB]. L'viv, 2000, 166 p. (in Ukrainian)
- [30] Shenin, P., Kosnar, M., Gardan, I., et al. Mathematics and CAD: In 2 book. B. 1. Moscow, 1988, 204 p.
- [31] Divchuk, T., Mimokhid, D., Kutilin, S., Kuznetsov, A., Gurazda, Y., & Syrykh, I. Osobennosti opredeleniya parametrov silovykh transformatorov metodami skhemno-polevogo modelirovaniya. [Features of determining of the parameters of power transformers by circuit-field modeling method]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2017, no. 1, pp. 61-70. (in Russian) doi: [10.15588/1607-6761-2017-1-8](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-8)

**Сведения об авторах.**



**Ярымбаш Дмитрий Сергеевич**, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин Национального университета «Запорожская политехника», Украина.

Е-mail: [yarymbash@gmail.com](mailto:yarymbash@gmail.com)



**Коцур Михаил Игоревич**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Национального университета «Запорожская политехника», Украина.

Е-mail: [kotsur8@gmail.com](mailto:kotsur8@gmail.com)



**Ярымбаш Сергей Тимофеевич**, профессор, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Национального университета «Запорожская политехника», Украина.

Е-mail: [kstj06@gmail.com](mailto:kstj06@gmail.com)



**Килимник Ирина Михайловна**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Национального университета «Запорожская политехника», Украина.

Е-mail: [dnukim76@gmail.com](mailto:dnukim76@gmail.com)