

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДАМИ СХЕМНО-ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы. Разработка нового высокоэффективного подхода для определения параметров силового трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания на основе схемно-полевого моделирования электромагнитных процессов, позволяющего учитывать особенности конструкции, влияние нелинейных свойств проводниковых и ферромагнитных материалов, обладающего высокой точностью, и простотой численной реализации.

Методы исследований. Математическое моделирование электромагнитных полей трехфазных трансформаторов с плоскими магнитными системами в режимах холостого хода и короткого замыкания методами теории электромагнитных полей, конечных элементов, теории электрических цепей; обобщение данных моделирования методами линейной и полиномиальной регрессии.

Основные результаты. Разработана схемно-полевая модель электромагнитных процессов в силовом трансформаторе для режимов холостого хода и короткого замыкания, позволяющая учитывать влияние особенностей конструкции активной части, нелинейность свойств проводниковых и магнитных материалов. Установлено, что в режиме холостого хода магнитный поток локализуется в стержнях магнитной системы, а в режиме короткого замыкания он вытесняется в области обмоток и главных каналов рассеяния. Особенности конструкции плоских трехфазных магнитных систем обуславливают неравномерное распределение магнитных потоков по стержням и ярмам при симметрии фазных токов намагничивания. Поэтому наибольшие индукции в режиме холостого хода характерны для стержня фазы В, а их действующие значения на 15...18% превышают аналогичные значения в стержнях фаз А и С. В режиме опытного короткого замыкания значения индукции на два порядка ниже по сравнению с режимом холостого хода, а ее распределение симметрично для всех фаз активной части трансформатора.

Разработана высокоэффективная методика определения параметров силового трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания на основе схемно-полевого моделирования электромагнитных процессов. Апробация новой методики для трансформаторов второго и третьего габаритов показала простоту численной реализации и высокую точность, за счет учета особенностей конструкции и влияния нелинейных свойств проводниковых и ферромагнитных материалов. Благодаря данному подходу обеспечивается снижение погрешности при определении параметров холостого хода на 12–16% и короткого замыкания – на 5–8% по сравнению с общеизвестными методиками.

Разработана методика корректировки параметров для различных ступеней РПН с использованием уравнений линейной и параболической регрессии, обобщающих нормированные характеристики холостого хода и короткого замыкания для различных серий трансформаторов, которая существенно сокращает затраты времени на этапах конструкторской подготовки производства и значительно повышает точность расчета параметров холостого хода и короткого замыкания. Относительная погрешность методики коррекции параметров для режима холостого хода не превышает 2,82%, а для режима короткого замыкания – 0,7%.

Научная новизна. Разработан и реализован новый эффективный подход для определения параметров силового трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания, на основе схемно-полевого моделирования электромагнитных процессов в силовом трансформаторе с последующей корректировкой методами линейной и полиномиальной регрессии нормированных характеристик холостого хода и короткого замыкания с учетом заданных положений РПН. Он обладает высокой точностью и эффективностью, простотой численной реализации, позволяет учитывать влияние конструктивных параметров, нелинейность электрофизических и магнитных свойств материалов и может применяться для трансформаторов различных серий.

Практическая значимость. Применение предложенного подхода для определения параметров трансформатора на основе методов схемно-полевого моделирования и нормирования позволяет снизить погрешность расчета параметров холостого хода и короткого замыкания на 12–16% и 5–8%, соответственно, по сравнению с общеизвестными методиками.

Ключевые слова: схема замещения; математическая модель; электромагнитные процессы; метод конечных элементов; параметры; сопротивление; холостой ход; короткое замыкание; силовой трансформатор.

ВВЕДЕНИЕ

Жесткая конкуренция на рынке электротехнической продукции обуславливает высокие требования к качеству, характеристикам и показателям энергоэффективности силовых трансформаторов. Кроме того, параметры и характеристики силовых трансформаторов могут оказывать существенное влияние на режимы и параметры энергоэффективности электросетей и технологических комплексов, в составе которых они работают. Рабочий режим трансформатора определяется параметрами холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). При низком уровне загрузки производственных технологических комплексов, реактивная мощность трансформаторов, обусловленная параметрами холостого хода, может существенно влиять на работу и потери в энергосистемах из-за перетоков реактивной мощности. В других эксплуатационных режимах определяющими становятся параметры короткого замыкания трансформаторов, поскольку влияние трансформатора на работу энергосети характеризуется индуктивным сопротивлением короткого замыкания [1]. При этом потери и уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов также определяются их параметрами короткого замыкания.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На современном этапе основным методом расчета параметров холостого хода и короткого замыкания силовых трансформаторов является метод схемного моделирования, когда трансформатор представляется соответствующей электрической схемой замещения в однолинейном представлении [2]. В работах [1–6] для определения параметров схемных моделей предлагается использовать аналитические выражения, полученные из решения моделей, имеющих существенные упрощения и допущения. Применение такого подхода для определения параметров трансформаторов не удовлетворяет современным требованиям по точности (в отдельных случаях погрешности могут достигать 30...40%), что в свою очередь не позволяет их использовать при проектировании современных энергоэффективных и надежных конструктивных решений силовых трансформаторов [7, 8]. Также, применение методик [1–5] связано с определенными затруднениями при проектировании силовых трансформаторов, имеющих нестандартные конструктивные решения или требующие использования современных электротехнических материалов. Альтернативными методами определения параметров схемных моделей являются методы полевого моделирования [9–13]. Их преимуществом является высокая точность и возможность учета влияния конструктивных параметров, электрофизических и магнитных свойств материалов на параметры электромагнитного преобразования энергии в силовом трансформаторе и его электрические характеристики.

Широкому распространению таких методов расчета способствует интенсивное развитие компьютерной техники и появление программного обеспечения с открытой лицензией (например, FEMM). Однако, численная реализация таких моделей затруднена такими факторами как нелинейность свойств электротехнических материалов и существенные различиями в геометрических размерах отдельных конструктивных элементов [9, 10]. Поэтому, в ряде работ [4–6], при определении параметров подобного класса электротехнических объектов вносятся упрощения в виде пренебрежения отдельными конструктивными элементами или нелинейностью электрических и магнитных свойств. Такие допущения не всегда оправданы, в отдельных случаях могут приводить к существенным погрешностям [7, 8], а, иногда, и к физически неправильному результату.

Таким образом, актуальной является разработка и реализация модели, позволяющей учитывать влияние всех конструктивных параметров, электрофизических и магнитных свойств материалов и их нелинейности, при расчете электрических параметров силовых трансформаторов обладающей высокой точностью.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является разработка и реализация нового эффективного подхода определения параметров силового трансформатора для режимов холостого хода и короткого замыкания, на основе схемно-полевого моделирования электромагнитных процессов в силовом трансформаторе, обладающего высокой точностью, простотой численной реализации, позволяющего учитывать влияние конструктивных параметров, электрофизических и магнитных свойств материалов и их нелинейностей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проводились для режимов холостого хода и короткого замыкания силовых трансформаторов типа ТМН-1600/15, ТМН-1600/20, ТМН-1600/35, ТМНС-6300/110 и ТМНС-6300/10. Согласно [9], электрические схемы исследуемых трансформаторов для опытных режимов ХХ и КЗ могут быть представлены последовательно соединенными активным и индуктивным сопротивлениями (рис. 1).

Приведённым схемам замещения соответствуют уравнения [9]:

$$U_{xx} = \dot{I}_{xx} \cdot r_{xx} + j \cdot \dot{I}_{xx} \cdot x_{xx}; \quad (1)$$

$$U_k = \dot{I}_k \cdot r_k + j \cdot \dot{I}_k \cdot x_k, \quad (2)$$

где U_{xx} , U_k – напряжения холостого хода и короткого замыкания, r_{xx} , r_k , x_{xx} , x_k , – активные и индуктивные

сопротивления холостого хода и короткого замыкания, которые определяются согласно [9]:

$$r_{xx} = \frac{P_{xx}}{I_{xx}^2}; r_k = \frac{P_k}{I_k^2};$$

$$x_{xx} = \sqrt{\left(\frac{U_{xx}}{I_{xx}}\right)^2 - r_{xx}^2}; x_k = \sqrt{\left(\frac{U_k}{I_k}\right)^2 - r_k^2}.$$

Для повышения точности идентификации параметров трансформатора для опытных режимов ХХ и КЗ схемная модель (1), (2) должна дополняться полевой моделью, описывающей процессы электромагнитного преобразования энергии в силовом трансформаторе [10–14]. Для этого формируется обобщенная геометрическая модель трансформатора (рис. 2) [11, 16].

Данная модель включает геометрические подобласти магнитной системы 1 ($j = 1$) со стержнями, ярмами, стыками и углами, подобласти обмоток НН 2 ($j = 2$), ВН 3 ($j = 3$) и изоляции 4 ($j = 4$), масла 5 ($j = 5$) и бака трансформатора ($j = 6$).

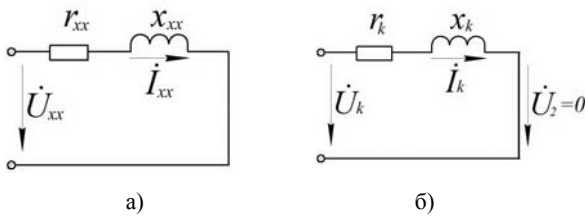


Рисунок 1 – Схема замещения трансформатора для режима ХХ (а) и КЗ (б)

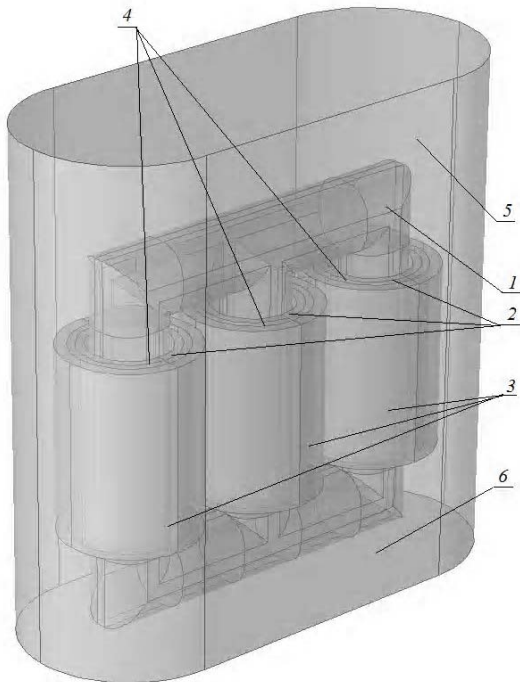


Рисунок 2 – Обобщенная геометрическая модель трансформатора

Принимается допущение об отсутствии токов смещения, свободных зарядов, допущение об изотропности электрофизических и электромагнитных свойств материалов и принимается допущение о плоскопараллельном характере поля [10, 12, 13]. Это позволяет представить электромагнитные процессы в исследуемых трансформаторах (рис. 3) системой уравнений Максвелла относительно векторного магнитного потенциала в плоскопараллельном приближении [17–20]:

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla \times \left[\left(\mu_0 \mu_{\varepsilon j} \right) \nabla \times \mathbf{A}_j \right] + \\ + j\omega \sigma_j (\theta_j) (\mathbf{A}_j + \mathbf{V}_j) = \mathbf{J}_{ej}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

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

Эффективные зависимости действующих значений индукции от действующих значений напряженности магнитного поля переменного тока рассчитываются по табличным данным для удельной намагничивающей мощности соответствующих электротехнических сталей и участков магнитной системы (стержней и ярмов, углов и стыков) [1], а затем преобразуется к непрерывному виду

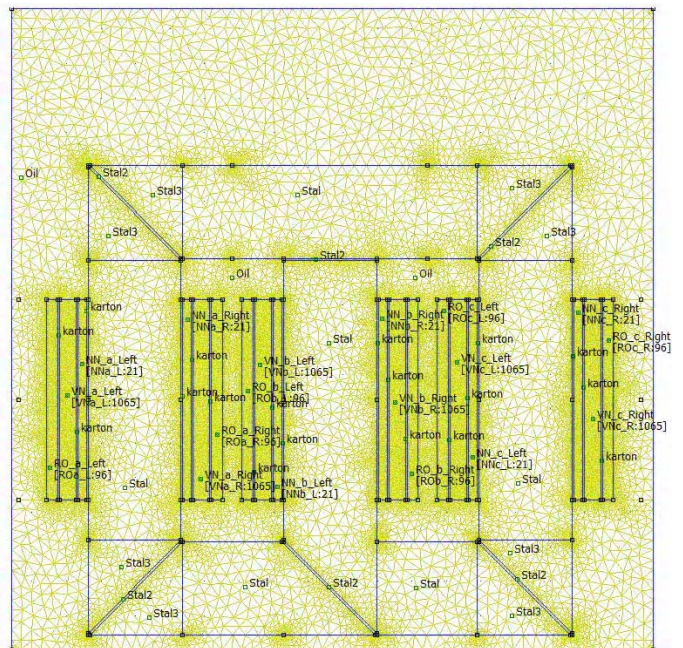


Рисунок 3 – Дискретизация расчетной области трансформатора

методами сплайн інтерполяції в структурі средств ПО FEMM.

Система уравнений (2) дополняется условием калибровки Кулона $\text{div}(A) = 0$ [19].

Для сопряжения магнитных и электрических полей на границах подобластей расчетной области трансформатора (рис. 2) формулируются граничные условия вида [21]:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}; \\ \mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}, \end{cases} \quad (4)$$

где H – напряженность магнитного поля; E – напряженность электрического поля.

А для внешних границ задаются граничные условия [20]:

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

Температурный режим исследуемого трансформатора принимается стационарным, распределение температур, в соответствии с [3].

Численная реализация модели (3) с условием калибровки Кулона, условиями сопряжения (4) и граничными условиями (5) реализуется методом конечных элементов [20] в структуре средств ПО FEMM (рис. 4) [11, 16].

Плотность распределения и размеры конечных элементов в расчетной области (рис. 3) варьируются для сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов без снижения требуемого уровня точности расчетов. В токопроводящих подобластях и углах магнитной системы плотность конечных элементов увеличивается, а по мере приближения к внешним границам расчетной области она снижается.

Данные полевого моделирования приводятся для силового трансформатора ТМН-1600/35. Для режимов ХХ и КЗ распределения нормальной составляющей индукции в активной части трансформатора ТМН-1600/35 имеют характерные отличия (рис. 4). В режиме ХХ магнитный поток локализуется в стержнях магнитной системы, а в режиме КЗ он вытесняется в обмотки и главный канал рассеяния. Конструктивная несимметрия плоских магнитных систем обуславливает неравномерное распределение магнитного потока по стержням при одинаковых фазных токах намагничивания. Поэтому при одинаковых фазных токах ХХ наибольшие значения индукции характерны для стержня фазы В, а их значения превышают аналогичные значения в стержнях фаз А и С на 15...18% (рис. 4а). В режиме опытного короткого замыкания значения индукции на два порядка ниже чем при холостом ходе, а ее распределение практически повторяется для каждой фазы активной части трансформатора (рис. 4б).

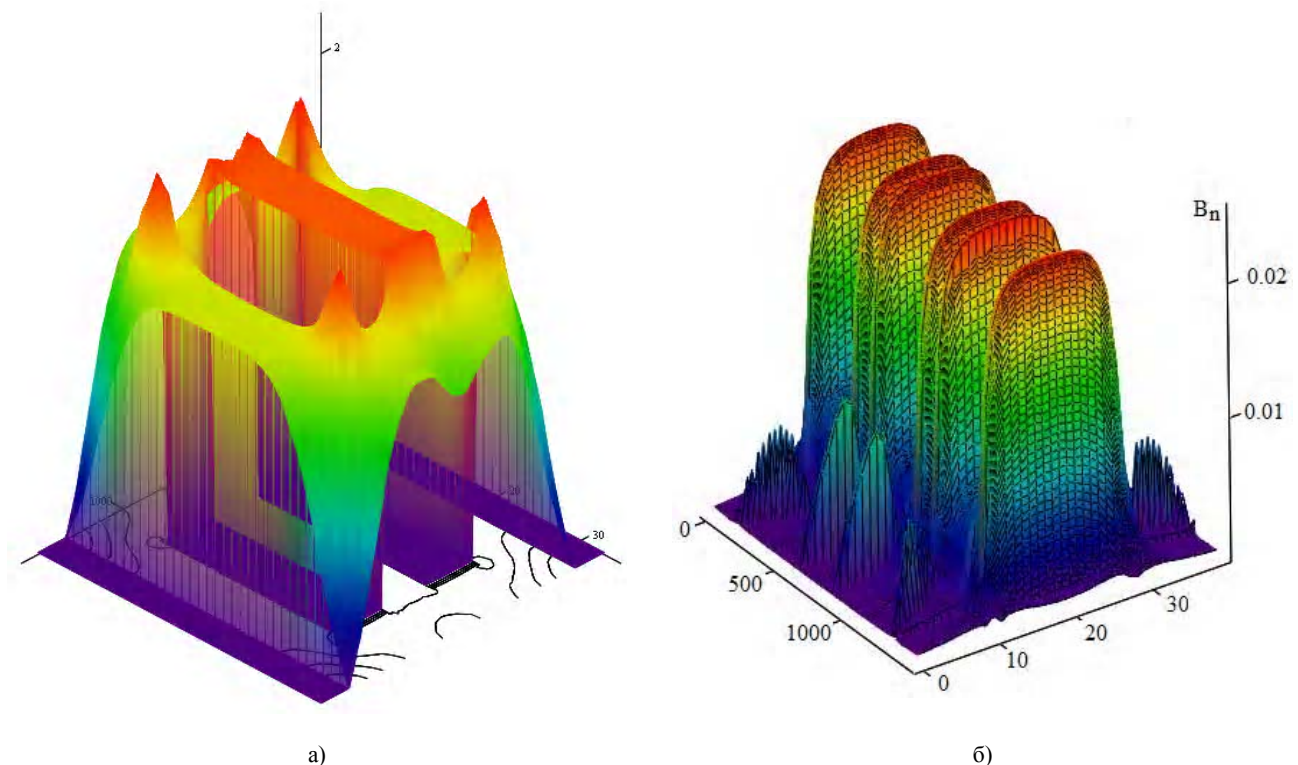


Рисунок 4 – Расчётное распределение нормальной составляющей индукции для опытных режимов ХХ (а) и КЗ (б) трансформатора ТМН-1600/35

Исследованиями установлено, что конструктивные особенности плоской трехфазной магнитной системы трансформатора оказывают определяющее влияние на неравномерное распределение параметров XX трансформатора по фазам. Этот фактор не учитывается классическими методиками расчета параметров XX, что на практике компенсируют значительными допусками по погрешности (до 30% [1, 3, 15]). В режиме опытного КЗ значения индукции на два порядка ниже чем при XX, а ее распределение практически повторяется для каждой фазы активной части трансформатора. Поэтому допуск по погрешности параметров КЗ в три раза ниже.

По данным моделирования режима XX трансформатора для заданных напряжений на соответствующих ступенях РПН для каждого трансформатора i типа

$$U_{ВН} = 4,44 \cdot W_{ВН} \cdot \overline{B_c} \cdot F_{a.c} \cdot f \cdot 10^{-4}, \quad (6)$$

определяются значения тока XX

$$I_0 = F_{ВН} / W_{ВН}, \quad (7)$$

где $F_{ВН}$ – намагничивающая сила обмоток, $W_{ВН}$ – число витков со стороны ВН, которое представляется вектором значений:

$$W_{ВН} = \left[W_{ВН\text{ ном}} - N_{РПН} \times \Delta W_{РПН}, \dots, W_{ВН\text{ ном}}, \dots, W_{ВН\text{ ном}} - N_{РПН} \times \Delta W_{РПН} \right],$$

на соответствующей ступени РПН из $\{\pm N_{РПН}\}$.

Для обобщения результатов исследований для i типов трансформаторов выполняется нормирование соотношений (6), (7):

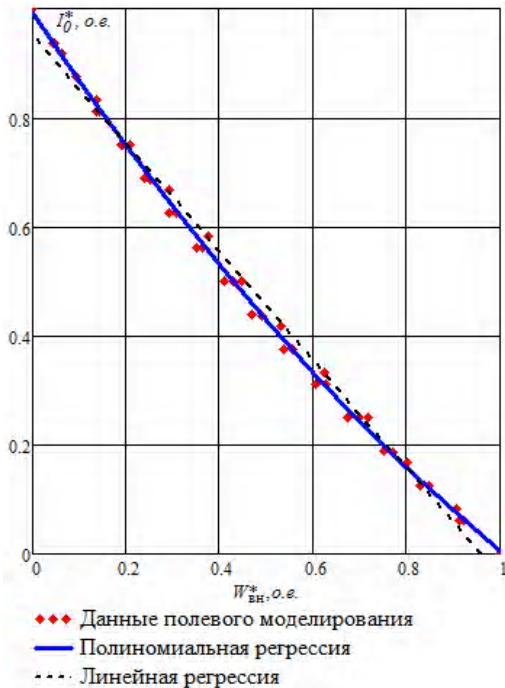


Рисунок 5 – Линейная и полиномиальная регрессия параметров XX

$$W_{ВН}^* = \frac{W_{ВН,i} - W_{ВН,-N_{РПН}}}{W_{ВН,N_{РПН}} - W_{ВН,-N_{РПН}}};$$

$$I_0^* = \frac{I_{0,i} - I_{0,+N_{РПН}}}{I_{0,-N_{РПН}} - I_{0,+N_{РПН}}}. \quad (8)$$

Аналогичный подход реализуется для режима опытного короткого замыкания. Для этого в режиме КЗ рассчитываются энергия магнитного поля в объеме расчетной области активной части трансформатора (рис. 2)

$$\sum_j W|_j = \sum_j \frac{1}{2} \iiint_{V_j} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad (9)$$

и индуктивные сопротивления в соответствии с [22],

$$X_{КЗ} = \sum \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \sum_j W|_j}{I_{КЗ}^2}, \quad (10)$$

с последующим их нормированием, аналогичным для (6), (7):

$$X_{КЗ}^* = \frac{X_{КЗ,i} - X_{КЗ,+N_{РПН}}}{X_{КЗ,-N_{РПН}} - X_{КЗ,+N_{РПН}}}. \quad (11)$$

Данные исследований представляются в виде зависимостей нормированных значений фазных токов в режимах XX (рис. 5) и нормированных значений индуктивных сопротивлений в режимах КЗ (рис. 6) от нормированных чисел витков обмотки на ступенях РПН каждого из i типов трансформаторов.

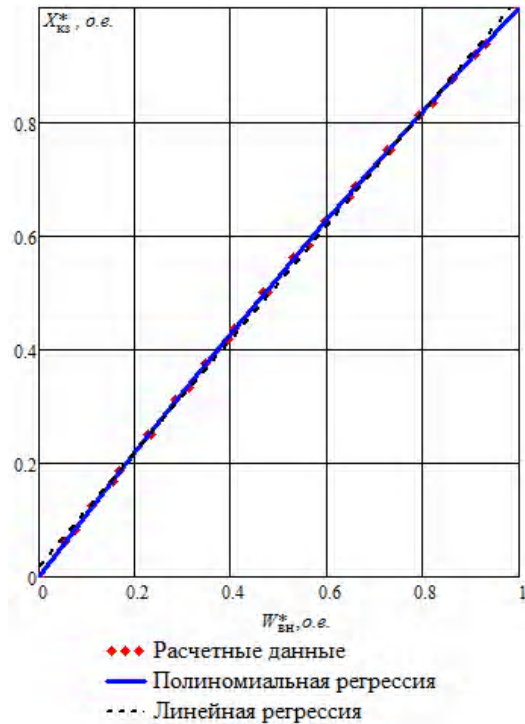


Рисунок 6 – Линейная и полиномиальная регрессия параметров КЗ

Для обработки экспериментальных данных применяются методы линейной и квадратичной регрессии, которые позволяют получить обобщенные зависимости $I_0^*(W_{ВН}^*)$ и $X_{кз}^*(W_{ВН}^*)$ в структуре средств Mathcad. Эти зависимости характеризуются высокой точностью: для режима ХХ относительная погрешность линейной регрессии (коэффициенты регрессии: $b_0=1,041$, $b_1=-0,993$) не превышает 4,83%, а погрешность параболической регрессии (коэффициенты регрессии: $b_0=0,993$, $b_1=0,697$, $b_2=0,288$) – 2,82%. Относительная погрешность линейной регрессии (коэффициенты регрессии: $b_0=0,019$, $b_1=-0,999$) для режима КЗ не превышает 1,87%, а параболической регрессии (коэффициенты регрессии: $b_0=0,00122$, $b_1=1,11424$, $b_2=-0,11645$) – 0,7%.

Нелинейный характер зависимости $I_0^*(W_{ВН}^*)$ обуславливается магнитными свойствами электротехнических сталей и особенностями регулирования напряжения в трансформаторах с РПН по схеме «реверс» [1]. С ростом числа витков на стороне ВН при согласном включении обмоток ВН и РО снижаются ЭДС витка, магнитные потоки и индукция в стержнях и ярмах, что, в свою очередь, приводит к снижению тока холостого хода. С ростом числа ступеней РО при ее реверсном подключении к обмотке ВН ток холостого хода увеличивается (рис. 5).

Для режима КЗ нормированные зависимости имеют более выраженный линейный характер (рис. 6), что существенно упрощает методику пересчета индуктивных сопротивлений КЗ по номинальным паспортным данным для заданных ступеней РПН.

Применение комбинированного метода схемно-полевого моделирования на основе уравнений Максвелла, условий сопряжения, алгебраических и интегральных соотношений (1)–(7), (9), (10) позволяет снизить погрешность расчета параметров трансформатора на 12–16% для режима ХХ и на 5–8% – для режима КЗ, по сравнению с известными методиками [1, 3, 15]. Этот метод может применяться практически для любых типоразмеров силовых трансформаторов и разнообразных активных материалов, так как в математическую модель включаются геометрическая модель активной части и функциональные описания для табличных зависимостей электрофизических и магнитных свойств проводниковых и ферромагнитных материалов с использованием интерфейсов встроенных модулей сплайн-интерполяции ПО FEMM. Обобщение результатов исследований достигается посредством формирования кортежей данных и преобразования их размерных параметров к безразмерным соотношениям. Эти преобразования реализуются процедурами нормирования расчетных данных для граничных оценок минимальных и максимальных значений (8), (11).

Это обеспечивает одинаковые интервалы варьирования исследуемых параметров, определяемых как функции и аргументы функций.

Для использования стандартных описаний процедур линейной и полиномиальной регрессии ПО Mathcad сформированные в кортежи дискретные массивы нормированных расчетных данных параметров КЗ и ХХ различных типов трансформаторов упорядочиваются по признаку возрастания аргументов. Это позволяет существенно сократить затраты на обработку массивов полных расчетов большой размерности и перейти к векторам коэффициентов линейной или полиномиальной регрессии для зависимостей безразмерных нормированных параметров упрощенных схемных моделей КЗ и ХХ трансформатора.

На основе обобщающего метода нормирования (8), (11) успешно реализованы высокоточные уравнения линейной и параболической регрессии, обеспечивающие коррекции параметров ХХ и КЗ трехфазных силовых трансформаторов с плоскими трехстержневыми магнитными системами при заданных положениях РПН. Это позволяет существенно сократить затраты времени на этапах конструкторской подготовки производства и значительно повысить точность расчета трансформатора как для номинального, так и для других эксплуатационных режимов его работы.

ВЫВОДЫ

Предложена схемно-полевая модель работы силового трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания, позволяющего учитывать влияние конструктивных параметров, нелинейностей электрофизических и магнитных свойств активных материалов.

Установлены особенности распределения индукции магнитного поля в активной части силового трансформатора для режимов холостого хода и короткого замыкания.

Разработана и реализована новая эффективная методика расчета параметров ХХ и КЗ силового трансформатора на основе схемно-полевого моделирования электромагнитных процессов в силовом трансформаторе, обладающая высокой точностью, простотой численной реализации, позволяющая учитывать влияние конструктивных параметров, электрофизических и магнитных свойств материалов и их нелинейностей.

Применение новой методики позволяет снизить погрешность расчета параметров ХХ и КЗ трансформатора на 12–16% и 5–8% по сравнению с общеизвестными методиками [1, 3, 15].

Разработан новый подход корректировки параметров ХХ и КЗ при различных ступенях РПН на основе применения линейной и параболической регрессии для обобщения нормированных характеристик ХХ и КЗ. Это существенно сокращает затраты времени на этапах конструкторской подготовки производства других серий трансформаторов и значительно улучшает точность расчета параметров ХХ и КЗ трансформатора. Относительная погрешность для режима ХХ не превышает 2,82%, а для режима КЗ – 0,7%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
2. Marcel Dekker. Transformer Engineering. Design and Practice / Marcel Dekker, S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde. Indian Institute of Technology, Bombay (Mumbai), India. 2004.
3. Гончарук А.И. Расчёт и конструирование трансформаторов [Текст] / А.И. Гончарук. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
4. Придубков П. Я. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора [Текст] / П. Я. Придубков, І. В. Хоменко // Энерго-сбережение. Энергетика. Энергоаудит. Харьков. №2. 2010. С. 55–61.
5. 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.
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. Leon F. Transformer Model for Electromagnetic Transients / F. Leon, A. Seemly // IEEE Transactions on Power Delivery. 1994. Вып. 9, № 1, С. 231-239
8. Majumder R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model / R. Majumder, S. Ghosh, R. Mukherjee // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Вып. 5, № 3, С. 3300–3306. DOI:10.15680/IJRSET.2016.0503107
9. Ананичева С. С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учебное пособие [Текст] / С. С. Ананичева, А. Л. Мызин; 6-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 80 с.
10. Jazebi S. Dual Reversible Transformer Model for the Calculation of Low-Frequency Transients / S. Jazebi, F. de Leyn, A. Farazmand and D. Deswal // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Вып. 28, № 4, С. 2509–2517. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2268857
11. Ярымбаш Д. С. Особливості розподілу магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 2 С. 5–12. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-1
12. Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – с. 95–102.
13. 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, Issue 2, pp. 86–92. DOI: http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121.
14. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика, 2016, № 2, С. 43–50. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5.
15. Кислицин А.Л. Трансформаторы. Ульяновск: УЛГТУ, 2001. - 76 с
16. Ярымбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 1, С. 12–17. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2
17. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електромеханіка. 2012. № 1. С. 49–54.
18. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. 2015. № 2. С. 65–70. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-9.
19. Андриенко П. Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Ярымбаш // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163–167.
20. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2012. № 2. С. 55–61. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2012-2-10
21. Ярымбаш Д. С. Численно-полевой анализ электромагнитных и электротепловых процессов в шинных пакетах печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш / Ползуновский вестник. – Барнаул, 2013. – №4–2. – С. 216–222
22. Бурдин В.В. Физика: Учеб. пособие. Часть II. Основы электромагнетизма [Текст] / Под общ. ред. профессора А. И. Цаплина; Перм. гос. техн. ун-т.– Пермь, 2007. – 188 с.

Статья поступила в редакцию 17.05.2017

Дівчук Т. Е.¹, Мимохід Д. К.², Кутілін С. А.³, Кузнецов О. Е.⁴, Гуразда Ю. В.⁵, Сирих І. С.⁶

¹Старший викладач кафедри електричних машин, Запорозький національний технічний університет, Україна, e-mail: DIV2009@i.ua

²⁻⁶Магістр кафедри електричних машин, Запорозький національний технічний університет, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ МЕТОДАМИ СХЕМО-ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи. Розробка нового високоефективного підходу для визначення параметрів силового трансформатора в режимах неробочого ходу і короткого замикання на основі схемо-польового моделювання електромагнітних процесів, що має високу точність, простоту чисельної реалізації і дозволяє враховувати особливості конструкції і вплив нелінійних властивостей провідникових і феромагнітних матеріалів.

Методи досліджень. Математичне моделювання електромагнітних полів трифазних трансформаторів з плоскими магнітними системами в режимах неробочого ходу і короткого замикання методами теорії електромагнітних полів, скінчених елементів, теорії електричних ланцюгів; узагальнення даних моделювання методами лінійної і поліноміальної регресії.

Основні результати. Розроблено схемо-польову модель електромагнітних процесів у силовому трансформаторі для режимів неробочого ходу і короткого замикання, що дозволяє враховувати вплив особливостей конструкції активної частини, нелінійність властивостей провідникових і магнітних матеріалів. Встановлено, що в режимі неробочого ходу магнітний потік локалізується в стрижнях магнітної системи, а в режимі короткого замикання він зосереджений в області обмоток і головних каналів розсіювання. Особливості конструкції плоских трифазних магнітних систем обумовлюють нерівномірний розподіл магнітних потоків по стрижнях і ярмах при симетрії фазних струмів намагнічування. Тому найбільші індукції в режимі неробочого ходу характерні для стрижня фази В, а їх діючі значення на 15–18% перевищують аналогічні значення в стрижнях фаз А і С. В режимі дослідного короткого замикання значення індукції на два порядки нижче в порівнянні з режимом неробочого ходу, а її розподіл симетричний для всіх фаз активної частини трансформатора.

Розроблено високоефективну методику визначення параметрів силового трансформатора в режимах неробочого ходу і короткого замикання на основі схемо-польового моделювання електромагнітних процесів. Апробація нової методики для трансформаторів другого та третього габаритів показала простоту чисельної реалізації та високу точність, за рахунок врахування особливостей конструкції і впливу нелінійних властивостей провідникових і феромагнітних матеріалів. Завдяки цьому підходу забезпечується зниження похибки при визначенні параметрів неробочого ходу на 12–16% і короткого замикання - на 5–8% в порівнянні з загальновідомими інженерними методиками.

Розроблено методику коригування параметрів для різних ступенів РПН з використанням рівнянь лінійної і параболічної регресії, узагальнюючих нормовані характеристики неробочого ходу і короткого замикання для різних серій трансформаторів, яка істотно скорочує витрати часу на етапах конструкторської підготовки виробництва і значно підвищує точність розрахунку параметрів неробочого ходу і короткого замикання. Відносна похибка методики корекції параметрів для режиму неробочого ходу не перевищує 2,82%, а для режиму короткого замикання – 0,7%.

Наукова новизна. Розроблено та реалізовано новий ефективний підхід для визначення параметрів силового трансформатора в режимах неробочого ходу і короткого замикання, на основі схемо-польового моделювання електромагнітних процесів в силовому трансформаторі і подальшого корегування методами лінійної і поліноміальної регресії нормованих характеристик неробочого ходу та короткого замикання з урахуванням заданих положень РПН. Він має високу точність і ефективність, простоту чисельної реалізації, дозволяє враховувати вплив конструктивних параметрів, нелінійність електрофізичних і магнітних властивостей матеріалів та може застосовуватися для трансформаторів різних серій.

Практична значимість. Застосування запропонованого підходу для визначення параметрів трансформатора на основі методів схемо-польового моделювання та нормування дозволяє знизити похибки розрахунку параметрів неробочого ходу і короткого замикання на 12–16% і 5–8%, відповідно, в порівнянні з загальновідомими інженерними методиками.

Ключові слова: схема заміщення; математична модель; електромагнітні процеси; метод скінчених елементів; параметри; опір; неробочий хід; коротке замикання; силовий трансформатор

Divchuk T. E.¹, Mimoskhid D. K.², Kutilin S. A.³, Kuznetsov A. E.⁴, Gurazda Yu. V.⁵, Syrykh I. S.⁶

Senior lecturer of the Electrical Machines Department, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: DIV2009@i.ua

²Master of the Electrical Machines Department, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

FEATURES OF DETERMINING OF THE PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS BY CIRCUIT-FIELD MODELING METHOD

Purpose of the work. The research of a new highly effective approach for determining power transformer parameters in no-load and short circuit modes, based on the scheme-field modeling of electromagnetic processes which allowing to consider design features, influence of conductor nonlinear properties and ferromagnetic materials, possesses high accuracy and simplicity of numerical realization was developed.

Research methods. Mathematical modeling of electromagnetic fields of three-phase transformers with flat magnetic

systems in no-load and short-circuit modes by methods of theory electromagnetic fields, finite elements, the theory of electrical circuits; generalization of modeling data by linear and polynomial regression methods.

The obtained results. Scheme-field model of electromagnetic processes in power transformer for no-load and short circuit mode are developed, which allowing to consider the influence of design features in the active part, also non-linearity of conductor properties and magnetic materials. It's established that in no-load mode magnetic flux is localized in the rods of the magnetic system, and in short-circuit mode it is displaced in the windings region and main dispersion channels. The design features of flat three-phase magnetic system causes uneven distribution of magnetic fluxes lengthways rods and yokes by symmetry of the phase magnetization currents. Therefore, the largest values of magnetic flux density in no-load mode are characteristic for B phase rod, and their effective values are higher by 15–18% than the analogous values in the rods A and C phases. In experimental short circuit mode, magnetic flux density values are two orders lower in comparison with no-load mode, and its distribution is symmetric for all phases of transformer active part.

A highly effective method for determining power transformer parameters in no-load and short circuit modes, which is based on the scheme-field modeling of electromagnetic processes, is researched. Approbation of a new technique for transformers second and third dimensions showed the simplicity of numerical implementation and high accuracy, due to design features and influence of conductor nonlinear properties and ferromagnetic materials. Thanks to this approach is provided the decreasing an error during parameters determination for no-load mode by 12–16% and short circuit mode by 5–8% in comparison with well-known method.

The method of parameters correction for various stages of the load control device is researched. This method uses linear and parabolic regression equations, which generalize the standardized no-load and short circuit characteristics for various transformers series. This significantly reduces the time spent at the stages of production design preparation, and significantly increases calculation accuracy of no-load and short circuit parameters. The relative error of the correction parameters method for no-load mode does not exceed 2.82%, and for the short-circuit mode it's 0.7%.

Scientific novelty. A new effective approach for determining power transformer parameters in no-load and short circuit modes is researched and implemented. The approach is based on the scheme-field modeling of electromagnetic processes in the power transformer and subsequent correction by the linear and polynomial regression methods of the standardized no-load and short circuit characteristics with taking into account the set positions of the load control device. This approach has high accuracy and efficiency, simplicity of numerical realization, which allows take into account the influence of design parameters, nonlinearity of electrophysical and magnetic properties of materials, and can be used for transformers of various series.

Practical significance. Application of the proposed approach for determining transformer parameters based on the methods of scheme-field simulation and standardization makes it possible to reduce the error of calculating of no-load and short-circuit parameters by 12–16% and 5–8%, respectively in comparison with wellknown engineering methods.

Keywords: replacement circuit; mathematical model; electromagnetic processes; finite element method; parameters; resistance; no-load; short circuit; power transformer.

REFERENCES

1. Tikhomirov, P. M. (1986). Raschet transformatorov. Moscow: Energoatomizdat, 528.
2. Marcel Dekker, Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A. (2004). Transformer Engineering, Design and Practice, Indian Institute of Technology, Bombay (Mumbai), India.
3. Goncharuk, A. I. (2009). Raschyot i konstruirovaniye transformatorov. Moscow, Energoatomizdat, 256.
4. Pridubkov, P. Y., Khomenko, I. V. (2010). Matematichne modelyuvannya elektromagnitnix procesiv ideal'nogo transformatora. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2, 55–61.
5. Roginskaya, L. E., Gusakov, D. V. (2014). Imitacionnoe modelirovaniye i e'ksperimental'noye issledovaniye trexfaznogo transformatora s vitymi lentochnymi ploskimi i prostranstvennymi magnitprovodami, *Bulletin of the South Ural State University Series «Power Engineering»*. 14, 4, 76–83.
6. Novash, I. V., Rumiantsev, Yu. V. (2015). Raschet parametrov modeli trexfaznogo transformatora iz biblioteki matlab-simulink s uchetom nasyshheniya magnitprovoda, *Energetika*, 1, 12–24.
7. Leon, F., Seemly, A. (1994). Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9, 1, 231–239
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/IJIRSET.2016.0503107
9. Ananicheva, S. S., Myzin, A. L. (2012). Skhemy zameshcheniya i ustanovivshiyesya rezhimy elektricheskikh setey: uchebnoye posobiye. Ekaterinburg: UrFU. 80.
10. S. Jazebi, F. de Leyn, A. Farazmand, D. Deswal, (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
11. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., Kylymnik, I. (2016). Osoblivosti rozpodilu magnitnix potokiv u rezhimi nerobochogo xodu silovix transformatoriv. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5–12. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-1
12. Yarymbash, D. S. Issledovaniye e'lektromagnitnyx i termoe'lektricheskix processov v pechax grafitacii peremennogo i postoyannogo toka. *Naukoviy visnyk*

13. Yarymbash, D. S., Oleinikov, A. M. (2005). On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*, 1, 86, 2, 86–92. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121>.
14. Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Osobennosti trexmernogo modelirovaniya e'lektromagnitnykh polej asinxronnogo dvigatelya. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43–50. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
15. Kislitsyn A. L. (2001). Transformatory, Ulyanovsk: UISTU, 76.
16. Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., Kylymnik, I. D. (2016). Osoblivosti viznachennya parametrov korotkogo zamikannya silovix transformatoriv zasobami pol'ovogo modelyuvannya. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12–17. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2>.
17. Yarymbash, D. S. (2012). Identifikaciya e'lektricheskix parametrov pechnoj petli moshhnykh pechej grafitacii. *Electrical engineering & Electromechanics*, 1, 49–54.
18. Yarymbash, D., Kilimnik, I., Yarymbash, S., (2015). Dinamicheskaya adaptaciya sxemnykh modelej korotkoj seti. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 65–70. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-9>.
19. Andriyenko, P. D., Yarymbash, D. S. (2008). Modelirovaniye elektromagnitnykh i teplovykh protsessov pri induktsionnom nagreve mundshtuka pressa. *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*, Krivoy Rog, 92, 163–167.
20. Yarymbash, D. S., Yarymbash, S. T., Kylymnyk, I. M. (2012). Identifikaciya e'lektricheskix parametrov pechnoj petli moshhnykh pechej grafitacii. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2, 55–61. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2012-2-10>.
21. Yarymbash, D. S. (2013). Chislenno-polevoj analiz e'lektromagnitnykh i e'lektroteplovykh processov v shinnykh paketax pechej grafitacii. *Polzunovskiy vestnik*, Barnaul, 4–2, 216–222.
22. Burdin, V. V. (2007). Fizika: Ucheb. posobiye. Ch. II. Osnovy elektromagnetizma. PGTU. Perm', 188.