

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

А. Е. Фокеев, аспирант;*В. К. Барсуков*, кандидат технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ
РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Рассмотрены существующие подходы к анализу режимов работы силовых трансформаторов. Показана необходимость использования предложенного экспериментально-расчетного метода к исследованию процессов в силовых трансформаторах при несинусоидальных режимах.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, несинусоидальные режимы, конечно-элементное моделирование

Рассматривая несинусоидальные режимы работы трансформатора, можно выделить четыре основных подхода к анализу режимов работы. Это расчет параметров схем замещения по данным измерений, производимых непосредственно в рабочем режиме, статистический анализ рабочих параметров и характеристик силовых трансформаторов, полученных в процессе эксплуатации, конечно-элементное моделирование процессов в силовых трансформаторах, создание интегрированных моделей с использованием программ схемного и конечно-элементного моделирования.

Расчет параметров схем замещения силовых трансформаторов в рабочем режиме производится с использованием массивов мгновенных значений измеряемых токов и напряжений [1]. Точность измерений в этом методе зависит от метрологических характеристик средств измерений и обоснованности, принимаемых в ходе расчета допущений. Основным же достоинством такого подхода является возможность отслеживания изменения контролируемых параметров трансформатора за достаточно короткие интервалы времени.

Использование статистических методов для анализа характеристик силовых трансформаторов возможно только при значительном объеме исходных статистических данных [2]. При этом для проведения качественного анализа требуется выполнение следующих условий: идентичность параметров и характеристик исследуемого ряда трансформаторов, идентичность режимов их работы. Такой подход позволяет выявить лишь общие закономерности, без теоретического объяснения полученного результата.

Применяемые для моделирования различных физических процессов методы конечно-элементного моделирования позволяют имитировать любые режимы работы трансформаторов и рассчитывать их параметры с высокой степенью точности [3, 4]. При проведении конечно-элементного моделирования используются пакеты программ с предустановленными алгоритмами расчета. Принятые в расчетных алгоритмах допущения могут оказаться некорректными при проведении исследований, нацеленных на объяснение реальных физических процессов.

Принцип создания интегрированной модели трансформатора заключается в объединении двух инструментов: программ динамического схемного моделирования и пакетов конечно-элементного моделирования [5]. При проведении конечно-элементного моделирования магнитного поля используются параметры трансформатора, полученные с помощью динамической схемной модели. Принимаемые для расчетных алгоритмов динамических схемных моделей допущения сводят достоинства интегрированной модели лишь к автоматизации процесса моделирования.

Задача исследования влияния нелинейной нагрузки на работу силовых трансформаторов требует подхода, при котором моделирование магнитного поля осуществляется с использованием измеренных значений, полученных при экспериментальной имитации несинусоидальных режимов. Необходимость использования экспериментальных данных при моделировании магнитных полей силовых трансформаторов обусловлена необходимостью корректного определения параметров рабочего режима.

В рамках применения предлагаемого экспериментально-расчетного метода исследования рассматривался однофазный трансформатор при работе на линейную и нелинейную нагрузку.

Для проведения исследования использовались: среда графического программирования LabVIEW 2009 и программа конечно-элементного моделирования Elcut 5.1. Определение параметров и характеристик трансформатора осуществлялось с использованием массивов мгновенных значений токов и напряжений, измеряемых в процессе исследования (рис. 1, а).

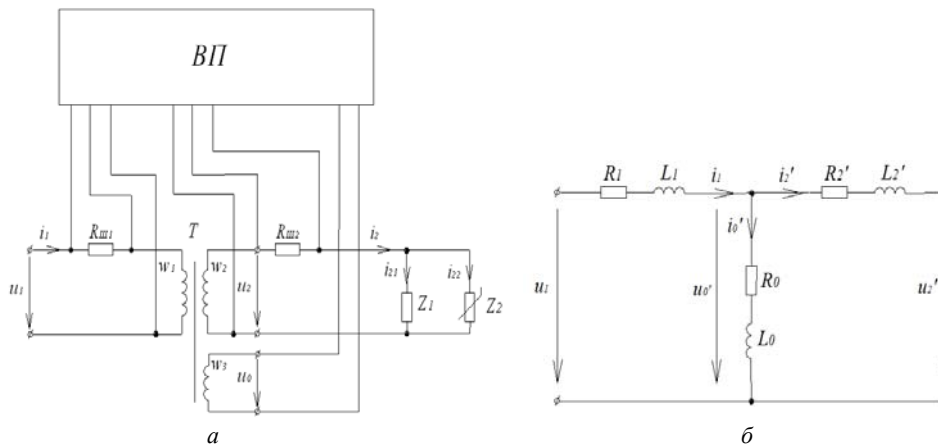


Рис. 1. Схема измерения параметров рабочего режима (а) и полная Т-образная схема замещения однофазного силового трансформатора (б): ВП – виртуальный прибор; Z_1 – линейная нагрузка; Z_2 – нелинейная нагрузка

Расчет параметров рабочего режима производился для полной Т-образной схемы замещения (рис. 1, б) по уравнениям электрического состояния приведенного трансформатора

$$u_1(t) = w_1 \frac{d\Phi}{dt} + R_1 \cdot i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} = u'_0(t) + u_{R1}(t) + u_{L1}(t), \quad (1)$$

$$u_2'(t) = w_1 \cdot k \frac{d\Phi}{dt} - R_2' \cdot i_2'(t) - L_2' \frac{di_2'(t)}{dt} = u_0'(t) - u_{R2}'(t) - u_{L2}'(t), \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ – рабочий магнитный поток; w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток; $k = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки; R_2', L_2' – приведенные активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки; i_1, u_1 – ток и напряжение первичной обмотки; i_2', u_2' – приведенные ток и напряжение вторичной обмотки; u_0' – приведенное напряжение ветви намагничивания.

Посредством виртуального прибора, блок-диаграмма которого приведена на рис. 2, а, выполнялся расчет следующих величин.

Суммарные потери в трансформаторе

$$\Delta P_T = \frac{1}{T} \int_0^T [u_1(t) \cdot i_1(t) - u_2(t) \cdot i_2(t)] dt. \quad (3)$$

Потери в обмотках

$$\Delta P_{w1} = \frac{1}{T} \int_0^T [u_1(t) - u_0'(t)] i_1(t) dt, \quad (4)$$

$$\Delta P_{w2} = \frac{1}{T} \int_0^T [u_0'(t) - u_2'(t)] i_2'(t) dt. \quad (5)$$

Потери в магнитопроводе

$$\Delta P_0 = \Delta P_T - \Delta P_{w1} - \Delta P_{w2}. \quad (6)$$

На рис. 2, б обозначены: ток $i_1(t)$ первичной обмотки с амплитудным значением I_{1m} ; ток $i_2(t)$ вторичной обмотки с амплитудным значением тока линейной нагрузки I_{21m} ; ток $i_{22}(t)$ нелинейной нагрузки с амплитудным значением I_{22m} и длительностью импульса $\tau = t_1 - t_2 = t_3 - t_4$.

Построение кривой намагничивания магнитопровода $B = f(H)$ выполнялось по выражениям, описывающим связь электрических и магнитных параметров:

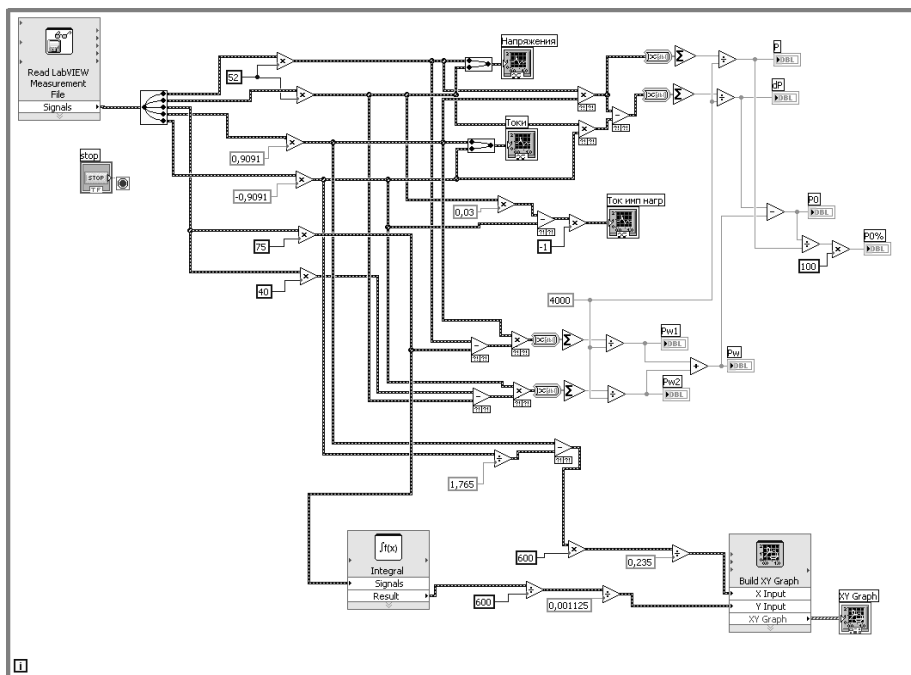
$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{S} = \frac{\int_0^T \frac{1}{w_1} u_0'(t) dt}{S}, \quad (7)$$

$$i_0'(t) = i_1(t) - i_2'(t), \quad (8)$$

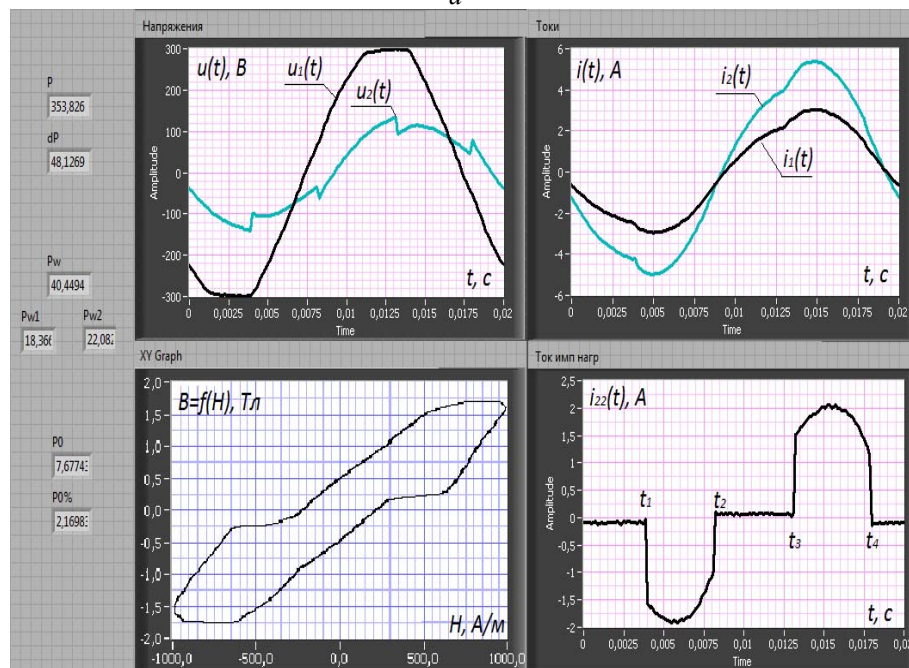
$$H(t) = \frac{i_0'(t) \cdot w_1}{\ell}, \quad (9)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода; ℓ – средняя длина магнитной силовой линии магнитопровода.

Отображение измеренных параметров рабочего режима трансформатора и полученных значений расчетных величин производилось с помощью графических индикаторов лицевой панели виртуального прибора (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Блок-диаграмма (а) и лицевая панель (б) ВП для определения параметров и характеристик однофазного силового трансформатора

Полученные при экспериментальном определении параметров рабочего режима значения амплитуды тока I_{1m} первичной обмотки, амплитуды тока линейной нагрузки I_{21m} и параметров нелинейной нагрузки (I_{22m} , t_1 , t_2 , t_3 , t_4) использовались для моделирования магнитного поля трансформатора. Источники поля задавались через токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$ первичной и вторичной обмоток, определенных на периоде $t \in (0; T)$:

$$i_1(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (10)$$

$$i_2(t) = I_{21m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) + I_{22m} \text{impulse}(t_1; t_2) - I_{22m} \text{impulse}(t_3; t_4), \quad (11)$$

где ϕ – угол фазового сдвига между токами $i_1(t)$ и $i_2(t)$.

При моделировании использовалась кривая намагничивания магнитопровода трансформатора $B = f(H)$. Расчет магнитного поля производился на основе уравнений Максвелла для вектора индукции $\vec{B}$ и векторного магнитного потенциала $\vec{A}$:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (12)$$

вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и скалярного электрического потенциала U :

$$\vec{E} = - \text{grad } U, \quad (13)$$

по уравнениям

$$\text{rot}(\mu^{-1} \cdot \text{rot} \vec{A}) = \vec{j} + \text{rot} \vec{H}_C, \quad (14)$$

$$\vec{j} = g \cdot \vec{E} = -g \cdot \text{grad } U - g \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (15)$$

где μ^{-1} – тензор, обратный тензору магнитной проницаемости; $\vec{j}$ – вектор полного тока в проводнике; $\vec{H}_C$ – вектор коэрцитивной силы; g – электропроводность.

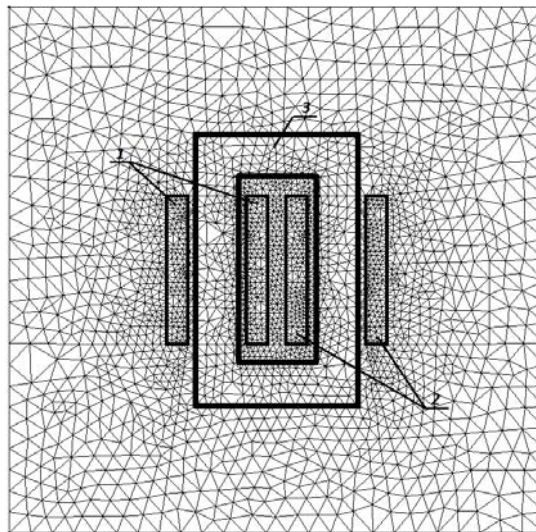


Рис 3. Геометрия осесимметричной модели однофазного трансформатора и сетка конечных элементов в программе Elcut 5.1: 1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – магнитопровод

Граничные условия, используемые при расчете магнитного поля, задавались по условию Дирихле

$$r \cdot \vec{A}_0 = a + b \cdot zr + \frac{c \cdot r^2}{2}, \quad (16)$$

где $\vec{A}_0$ – векторный магнитный потенциал, обратный тензору магнитной проницаемости и определенный в заданной точке рассматриваемой области; a, b, c – геометрические размеры элемента модели, для которого определяется условие Дирихле; r – ось; zr – полуплоскость, в которой выполняется расчет параметров магнитного поля.

Результатом расчета является графическое отображение картины распределения силовых линий магнитного поля однофазного силового трансформатора с возможностью определения в любой точке рассматриваемой области следующих параметров: вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$, векторов магнитной индукции $\vec{B}_z$ и $\vec{B}_r$, суммарной намагничивающей силы F , энергии магнитного поля W , мощности тепловыделения Q в заданном объеме dV (рис. 4).

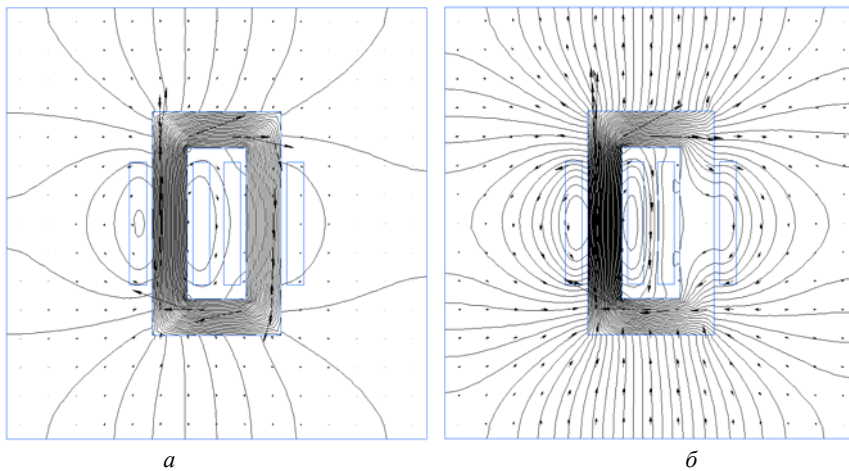


Рис. 4. Картина магнитного поля трансформатора при работе на линейную нагрузку (а) и в момент появления импульса тока нелинейной нагрузки (б)

Получаемое с помощью рассматриваемого экспериментально-расчетного метода графическое отображение магнитного поля силового трансформатора позволяет провести анализ влияния нелинейной нагрузки на магнитный поток в магнитопроводе и полей рассеяния в обмотках. На рис. 4, б приведена картина распределения магнитных силовых линий в момент появления во вторичной обмотке импульса тока нелинейной нагрузки. При этом происходит вытеснение магнитного потока и значительное увеличения потока рассеяния первичной обмотки.

Преимуществом решения задачи нестационарного магнитного поля при исследовании несинусоидальных режимов работы силовых трансформаторов является возможность отображения распределения силовых линий магнитного поля в любые заданные моменты времени.

Экспериментально-расчетный метод исследования силовых трансформаторов позволяет производить анализ процессов в магнитопроводах однофазных трансформаторов при работе на нелинейную нагрузку (однофазные выпрямители с различными схемами – однополупериодные, двухполупериодные, мостовые). Применение экспериментально расчетного метода возможно для исследования трехфазных силовых трансформаторов при несимметричных режимах работы и при работе на нелинейную нагрузку (трехфазные и многофазные неуправляемые и управляемые выпрямители).

Библиографические ссылки

1. Гольдштейн Е. И., Бацева Н. Л., Панкратов А. В. Технический контроль параметров схемы замещения трансформаторов по результатам их измерений в режимах холостого хода и номинальной нагрузки // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы : сб. ст. Ч. 1. Специальные электрические машины и электромагнитные устройства. Вопросы энергоснабжения. Образоват. проекты. Екатеринбург : Вестн. УГТУ – УПИ. – 2003. – № 5 (25). – С. 398–401.
2. Казаков Ю. Б., Коротков В. В., Чирков В. А. Изменение мощности потерь холостого хода трансформаторов распределительных сетей 6–10 кВ в процессе эксплуатации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – СПб. : ПЭИПК, 2004. – Вып. 24 : Современные методы и технические средства оценки состояния опорно-стержневых, подвесных и аппаратных конструкций / под ред. А. И. Таджибаева. – С. 124–129.
3. Трайно А. С., Осренко М. В. Сравнительный анализ расчета добавочных потерь в элементах конструкций автотрансформатора мощностью 200 МВА, полученных с помощью программ EDMAG-3Dv2 и ANSYS / ВАТ «Український науково-дослідний проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування». – Запорожье, 2009. – 15 с.
4. Климов Д. А., Попов Г. В., Тихонов А. И. Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / ГОУ ВПО «Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина». – Иваново, 2006. – 100 с.
5. Стороженко Ю. И., Губански С., Сердюк Ю. Интегрированная компьютерная модель высоковольтного силового трансформатора в среде Comsol-Simulink // Науч. вестн. Норил. индустр. ин-та. – 2008. – № 3. С. 28–45. – URL: http://www.norvuz.ru/var/uploads/File/rio/vestnik_3_2008.pdf (дата обращения: 27.04.2012).

A. E. Fokeev, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Experimental design method of power transformers research at non-sinusoidal operating modes

Existing approaches to analysis of power transformers operating modes are considered. Necessity of applying the offered experimental design method for research of processes in power transformers at non-sinusoidal modes is shown.

Keywords: power transformers, non-sinusoidal modes, finite element mathematical modeling

Получено: 27.03.12