

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 531.44

Определение параметров силовых трансформаторов на основе измерений

В.П. Закарюкин¹, А.В. Крюков^{1*}, М.С. Шульгин¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского 15, Иркутск, Россия.
Статья поступила 26.10.2011, принята 15.02.2012

Предложен новый метод параметрической идентификации силовых трансформаторов, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели устройства в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой соединены по схеме полного графа. Рассматривается наиболее распространенный в электрических сетях двухобмоточный трансформатор. В качестве исходных данных для построения идентификационной модели используются результаты замеров токов и напряжений по фазам обмоток в нагрузочном режиме, а также в режиме, близком к холостому ходу. Полученная в результате идентификации модель может использоваться для определения несимметричных режимов электроэнергетических систем. Кроме того, на основе предлагаемой в статье процедуры параметрической идентификации возможно решение задачи технического диагностирования силовых трансформаторов. Приведен пример идентификации реального трансформатора. В качестве измерительной информации использовались результаты компьютерного моделирования для эталонной модели. Полученные результаты показали высокую точность предложенного метода параметрической идентификации.

Ключевые слова: трансформаторы, параметрическая идентификация, фазные координаты.

Measurement-based characterization of power transformers

V. P. Zakaryukin¹, A. V. Kryukov^{1*}, M. S. Shul'gin¹

¹Irkutsk State University of Railway Engineering, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, Russia
Received 26.10.2011; Accepted 15.02.2012

The new method of parametric identification of two-winding power transformers has been proposed. It is distinguished from the common ones by application of phase coordinates and modeling the device in the form of a lattice equivalent circuit, its elements being connected on the basis of a complete graph scheme. The article deals with a two-winding power transformer which is considered to be the most common one in the power distribution systems. The results of current and voltage level measurements on winding under load mode as well as under near open-circuit mode are used as basic data for the identification model construction. The obtained model can be used for determining energy systems asymmetric modes. Besides, based on the proposed parametric identification technique, it is possible to solve the problem of power transformers technical diagnosis. The example of the actual transformer identification has been made. The results of the reference model computer modeling were used as measurement information. The obtained results have confirmed high accuracy of the proposed parametric identification technique.

Keywords: transformers, parametrical identification, phase coordinates.

Введение. Задача расчета режима электроэнергетической системы (ЭЭС) сводится к решению нелинейной системы уравнений

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{D}) = \mathbf{0},$$

где \mathbf{F} – n -мерная вектор-функция; \mathbf{X} – n -мерный вектор нерегулируемых параметров; $\mathbf{D} = \mathbf{\Pi} \cup \mathbf{Y}$ – вектор исходных данных. Вектор \mathbf{D} включает две группы параметров: структурные $\mathbf{\Pi}$ и режимные \mathbf{Y} . В состав вектора $\mathbf{\Pi}$ входят параметры высоковольтных ли-

ний электропередачи (ЛЭП), трансформаторов, а также регулирующих и компенсирующих устройств. Вектор \mathbf{Y} образуют активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок. В современных ЭЭС компоненты вектора \mathbf{Y} определяются на основании телеизмерений с использованием хорошо разработанных методов оценивания состояния [1], и потому вопрос об адекватности этой группы параметров можно считать решенным. Параметры $\mathbf{\Pi}$ определяются на основании аналитических выражений, представленных, например, в работе [2]. При этом могут возникнуть значительные погрешности, о чем свидетельствуют данные, приведенные в работе [3]. Уточнение параметров и

* E-mail address: and_kryukov@mail.ru

получение адекватных реальным условиям математических моделей элементов ЭЭС может быть выполнено на основе методов параметрической идентификации [4]. Однако существующие методы идентификации параметров элементов ЭЭС разработаны применительно к однолинейным схемам замещения и потому не применимы для расчета режимов при наличии продольной и поперечной несимметрии, которая особенно проявляется в ЭЭС, питающих электротяговые нагрузки.

Адекватный метод параметрической идентификации ЛЭП, позволяющий корректно учитывать продольную и поперечную несимметрию в ЭЭС, предложен в работе [5]. В настоящей статье предлагается новый метод параметрической идентификации двухобмоточных трансформаторов, основанный на использовании фазных координат, который может применяться для определения несимметричных режимов.

Следует отметить, что на основе параметрической идентификации трансформаторов может быть решена задача их технического диагностирования. Действительно, на основе регулярных измерений параметров \mathbf{Y} , точной идентификации компонент вектора $\mathbf{\Pi}$ и оценки его принадлежности допустимой области \mathbf{D}_{Π} , т. е. и $\mathbf{\Pi} \in \mathbf{D}_{\Pi}$, можно выявить повреждения или отклонения от нормального режима работы трансформатора. Своевременное выявление дефектов позволяет принять меры по предупреждению их развития и сохранению работоспособного состояния трансформатора.

Уравнения состояния трансформатора. В статье рассматривается трехфазный двухобмоточный трансформатор, схематическое изображение которого показано на рис. 1. При моделировании использовались следующие положения:

- трансформатор считается линейной системой;
- два крайних стержня характеризуются единичной магнитной проницаемостью и отображают магнитные потоки рассеяния; площади сечения крайних стержней одинаковы и равны S_1 , длины крайних стержней равны между собой;
- три средних стержня магнитопровода характеризуются постоянной величиной комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}_{r2} - j \underline{\mu}_{r2}$, определяемой из паспортных значений тока и активной мощности холостого хода; площади сечения этих стержней одинаковы и равны S_2 ;
- каждая катушка обладает активным и реактивным сопротивлениями $Z_{ik} = R_{ik} + j\omega L_{ik}$ (i – номер обмотки, k – номер фазы), которые определяются параметрами короткого замыкания;
- числа витков w_{ik} определяются по значению рабочей индукции в сердечнике и номинальному напряжению катушки U_{ik} (именно катушки, а не обмотки в целом, последнее может быть больше первого на $\sqrt{3}$),

$$w_{ik} = \frac{U_{ik} \sqrt{2}}{\omega B_{2m} S_2} = \frac{4.502 U_{ik}}{B_{2m} S_2},$$

если U_{ik} – в киловольтах, амплитуда индукции B_{2m} – в

тесла, $S_2 - \text{м}^2$.

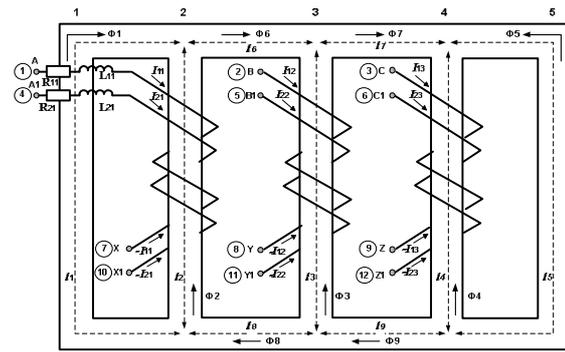


Рис. 1. Схема трансформатора.

Предполагается симметрия конструкции трансформатора, то есть равные длины $l_1 = l_5$, $l_6 = l_7 = l_8 = l_9$, $l_2 = l_4$. При этом очевидно равны магнитные потоки $\Phi_6 = \Phi_8$, $\Phi_7 = \Phi_9$.

Уравнения электрического и магнитного состояний трансформатора с двумя обмотками и шестью катушками можно записать так [6]:

$$\begin{aligned} (R_{11} + j\omega L_{11}) \dot{I}_{11} + j\omega w_{11} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{11} = \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_7; \\ (R_{12} + j\omega L_{12}) \dot{I}_{12} + j\omega w_{12} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{12} = \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_8; \\ (R_{13} + j\omega L_{13}) \dot{I}_{13} + j\omega w_{13} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{13} = \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_9; \\ (R_{21} + j\omega L_{21}) \dot{I}_{21} + j\omega w_{21} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{21} = \dot{\Phi}_4 - \dot{\Phi}_{10}; \\ (R_{22} + j\omega L_{22}) \dot{I}_{22} + j\omega w_{22} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{22} = \dot{\Phi}_5 - \dot{\Phi}_{11}; \\ (R_{23} + j\omega L_{23}) \dot{I}_{23} + j\omega w_{23} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{23} = \dot{\Phi}_6 - \dot{\Phi}_{12}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_6 &= 0; \\ \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_6 - \dot{\Phi}_7 &= 0; \\ \dot{\Phi}_4 + \dot{\Phi}_5 + \dot{\Phi}_7 &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 l_1 - \dot{H}_2 l_2 &= -\dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21}; \\ \dot{H}_2 l_2 + 2\dot{H}_6 l_6 - \dot{H}_3 l_3 &= \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22}; \\ \dot{H}_3 l_3 + 2\dot{H}_7 l_7 - \dot{H}_4 l_4 &= \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23}; \\ \dot{H}_4 l_4 - \dot{H}_5 l_5 &= \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23}. \end{aligned}$$

Записанная система включает шесть уравнений электрического состояния и семь уравнений магнитного состояния. В уравнениях U_{ik} – напряжения фаз обмоток, H_i – напряженности магнитного поля стержней или частей яра с длинами l_i . Первый индекс в обозначениях напряжений, токов и чисел витков обозначает номер обмотки, второй индекс – номер фазы. Взаимосвязи напряженностей поля с потоками задаются следующими уравнениями:

$$\dot{H}_k l_k = \frac{\dot{B}_k l_k}{\mu_0 \underline{\mu}_{rk}} = \underline{R}_{mk} \dot{\Phi}_k;$$

$$\underline{R}_{mk} = \frac{l_k}{\mu_0(\underline{\mu}_{r1}' - j\underline{\mu}_{r1}'') S_1},$$

если $k = 1, 5$;

$$\underline{R}_{mk} = \frac{l_k}{\mu_0(\underline{\mu}_{r2}' - j\underline{\mu}_{r2}'') S_2},$$

если $k = 2, 3, 4, 6, 7$;

где $\underline{R}_{mi} = R_{mi}' + jR_{mi}''$ – магнитные сопротивления магнитных ветвей.

С учетом магнитных сопротивлений система преобразуется следующим образом

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + j \omega w_{11} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{11}; \quad \underline{Z}_{21} \dot{I}_{21} + j \omega w_{21} \dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21}; \\ \underline{Z}_{12} \dot{I}_{12} + j \omega w_{12} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{12}; \quad \underline{Z}_{22} \dot{I}_{22} + j \omega w_{22} \dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22}; \\ \underline{Z}_{13} \dot{I}_{13} + j \omega w_{13} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{13}; \quad \underline{Z}_{23} \dot{I}_{23} + j \omega w_{23} \dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23}; \end{aligned}$$

$$\underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} = 0;$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + 2\underline{R}_{m6}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2) - \\ - \underline{R}_{m3} \dot{\Phi}_3 - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21} + \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m3} \dot{\Phi}_3 + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) - \\ - \underline{R}_{m4} \dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22} + \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m4} \dot{\Phi}_4 + \underline{R}_{m5}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) - \\ - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23} = 0 \end{aligned}$$

Симметрия сердечника трансформатора обуславливает равенства

$$\underline{R}_{m1} = \underline{R}_{m5}; \quad \underline{R}_{m2} = \underline{R}_{m3} = \underline{R}_{m4}; \quad \underline{R}_{m6} = \underline{R}_{m7},$$

поэтому

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + j \omega w_{11} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{11}; \quad \underline{Z}_{21} \dot{I}_{21} + j \omega w_{21} \dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21}; \\ \underline{Z}_{12} \dot{I}_{12} + j \omega w_{12} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{12}; \quad \underline{Z}_{22} \dot{I}_{22} + j \omega w_{22} \dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22}; \\ \underline{Z}_{13} \dot{I}_{13} + j \omega w_{13} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{13}; \quad \underline{Z}_{23} \dot{I}_{23} + j \omega w_{23} \dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23}; \end{aligned}$$

$$\underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} = 0;$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2) - \\ - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21} + \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) - \\ - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22} + \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \\ + \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23} = 0. \end{aligned}$$

Разные схемы соединений обмоток трансформатора требуют разного подхода. В данной статье рассматривается трансформатор со схемой соединений обмоток

Y/D с изолированной нейтралью первичной обмотки (рис. 2).

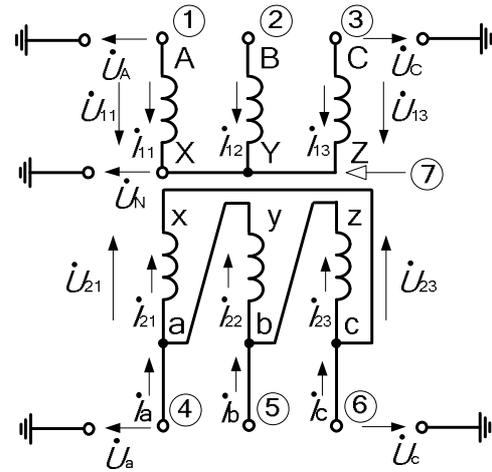


Рис. 2. Схема трансформатора Y/D с изолированной нейтралью звезды.

При этом для напряжений отдельных фаз обмоток справедливы следующие соотношения:

$$\dot{U}_{11} = \dot{U}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_{12} = \dot{U}_B - \dot{U}_N;$$

$$\dot{U}_{13} = \dot{U}_C - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_{21} = \dot{U}_a - \dot{U}_c;$$

$$\dot{U}_{22} = \dot{U}_b - \dot{U}_a; \quad \dot{U}_{23} = \dot{U}_c - \dot{U}_b.$$

Средний стержень трансформатора имеет меньшее магнитное сопротивление по сравнению с соседними стержнями. Поскольку падение магнитного напряжения между двумя узлами практически нулевое – по крайней мере, при холостом ходе, – а магнитные потоки определяются напряжениями катушек, то для компенсации меньшего падения магнитного напряжения на среднем стержне требуется меньший ток по сравнению с соседними фазами. Наличие одного меньшего тока обуславливает наличие составляющей тока нулевой последовательности, то есть при отсутствии нагрузки вторичной обмотки по ней протекает ток нулевой последовательности, и сумма токов фаз обмотки не равна нулю. Уравнения состояния трансформатора с учетом тока нулевой последовательности вторичной обмотки могут быть представлены в следующем виде:

$$\underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + j \omega w_{11} \dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{11};$$

$$\underline{Z}_{21} (\dot{I}_{21} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{21} \dot{\Phi}_2 = \dot{U}_{21};$$

$$\underline{Z}_{12} \dot{I}_{12} + j \omega w_{12} \dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{12};$$

$$\underline{Z}_{22} (\dot{I}_{22} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{22} \dot{\Phi}_3 = \dot{U}_{22};$$

$$\underline{Z}_{13} \dot{I}_{13} + j \omega w_{13} \dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{13};$$

$$\underline{Z}_{23} (\dot{I}_{23} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{23} \dot{\Phi}_4 = \dot{U}_{23};$$

$$\underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + (\dot{I}_{21} + \dot{I}_{20}) w_{21} = 0;$$

$$\underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2) - \dot{I}_{11} w_{11} -$$

$$\begin{aligned}
 &-(\dot{I}_{21} + \dot{I}_{20}) w_{21} + \dot{I}_{12} w_{12} + (\dot{I}_{22} + \dot{I}_{20}) w_{22} = 0; \\
 &\underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) - \dot{I}_{12} w_{12} - \\
 &-(\dot{I}_{22} + \dot{I}_{20}) w_{22} + \dot{I}_{13} w_{13} + (\dot{I}_{23} + \dot{I}_{20}) w_{23} = 0; \\
 &\underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \\
 &-\dot{I}_{13} w_{13} - (\dot{I}_{23} + \dot{I}_{20}) w_{23} = 0.
 \end{aligned}$$

Для режима холостого хода можно записать следующее:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Phi}_2 &= \frac{\dot{U}_{11}}{j \omega w_{11}}; \quad \dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{j \omega w_{12}}; \quad \dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13}}{j \omega w_{13}}; \\
 \underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{20} w_{21} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2) - \\
 -\dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{20}(w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}(\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4) + 2\underline{R}_{m7}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) - \\
 -\dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{20}(w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} &= 0; \\
 \underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \\
 -\dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{20} w_{23} &= 0
 \end{aligned}$$

Последние четыре уравнения с учетом определения магнитных потоков стержней трансформатора содержат пять неизвестных. Однако если полагать известным соотношение

$$\underline{R}_{m7} = \underline{R}_{m2} \frac{l_7}{l_2} = \frac{1}{2} k_{72} \underline{R}_{m2},$$

то число неизвестных сокращается:

$$\begin{aligned}
 \underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{20} w_{21} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1)\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3] - \\
 -\dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{20}(w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1 + k_{72}\dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1)\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4] - \\
 -\dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{20}(w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} &= 0; \\
 \underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \\
 + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{20} w_{23} &= 0.
 \end{aligned}$$

В нагрузочном режиме аналогичное преобразование приводит к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + j \omega w_{11} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{11}; \\
 \underline{Z}_{21}(\dot{I}_{21} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{21} \dot{\Phi}_2 &= \dot{U}_{21}; \\
 \underline{Z}_{12} \dot{I}_{12} + j \omega w_{12} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{12}; \\
 \underline{Z}_{22}(\dot{I}_{22} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{22} \dot{\Phi}_3 &= \dot{U}_{22}; \\
 \underline{Z}_{13} \dot{I}_{13} + j \omega w_{13} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{13}; \\
 \underline{Z}_{23}(\dot{I}_{23} + \dot{I}_{20}) + j \omega w_{23} \dot{\Phi}_4 &= \dot{U}_{23}; \\
 \underline{R}_{m1}\dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} + \dot{I}_{20} w_{21} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1)\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3] - \dot{I}_{11} w_{11} - \\
 -\dot{I}_{21} w_{21} - \dot{I}_{20}(w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} &= 0; \\
 \underline{R}_{m2}[k_{72}\dot{\Phi}_1 + k_{72}\dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1)\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4] - \dot{I}_{12} w_{12} - \\
 -\dot{I}_{22} w_{22} - \dot{I}_{20}(w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23} &= 0; \\
 \underline{R}_{m1}(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2}\dot{\Phi}_4 - \\
 -\dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23} - \dot{I}_{20} w_{23} &= 0.
 \end{aligned}$$

Определение параметров трансформатора. Алгоритм параметрической идентификации включает следующие этапы.

1. Из параметров режима холостого хода можно определить числа витков фаз обмоток:

$$w_{ik} = \frac{0.004502 U_{ik}}{B_{2m} S_2}, \tag{1}$$

где напряжение катушки U_{ik} – в вольтах, амплитуда индукции B_{2m} – в тесла, площадь сечения стержня сердечника S_2 – м². Для масляных трансформаторов мощностью от 25 кВ·А до 100 кВ·А максимальная индукция лежит в пределах от 1.2 до 1.6 Тл, для трансформаторов мощностью более 160 кВ·А максимальная индукция находится в пределах от 1.4 до 1.65 Тл (верхние значения соответствуют современным трансформаторам).

Оценка магнитных сопротивлений, магнитных потоков и тока нулевой последовательности вторичной обмотки производится итерационным методом Ньютона. Для этого вычисляются начальные приближения по формулам следующего вида [6]:

$$\begin{aligned}
 \underline{R}_{m1} &= \frac{l_1}{\mu_0 S_1}; \quad k_{72} = \frac{2 l_7}{l_2}; \\
 \underline{R}_{m7} &= \underline{R}_{m2} \frac{l_7}{l_2} = \frac{1}{2} k_{72} \underline{R}_{m2}; \\
 \dot{\Phi}_2 &= \frac{\dot{U}_{11}}{j \omega w_{11}}; \quad \dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{j \omega w_{12}};
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13}}{j \omega w_{13}}; \quad (3) \quad R_{m2} = \frac{q_x}{6 + 4k_{72}} + j \frac{P_x}{6 + 4k_{72}};$$

$$Q_x = \sqrt{\left(\frac{i_x S_H}{100}\right)^2 - P_x^2}; \quad p_x = \frac{2\omega w_{11}^2 P_x}{U_n^2}; \quad \dot{\Phi}_1 = \frac{R_{m2} \dot{\Phi}_2 - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21}}{R_{m1}}, \quad (5)$$

$$q_x = \frac{2\omega w_{11}^2 Q_x}{U_n^2}; \quad (4)$$

где U_n – номинальное фазное напряжение первичной обмотки, S_H – номинальная мощность трансформатора, P_x – активная мощность холостого хода.
Для реализации метода Ньютона составляется векторная функция

$$F(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{20}) = \begin{bmatrix} \underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{20} w_{21} \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3] - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{20} (w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + k_{72} \dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4] - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{20} (w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} \\ \underline{R}_{m1} (\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{20} w_{23} \end{bmatrix}$$

с матрицей Якоби

$$J(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{20}) = \begin{bmatrix} \dot{\Phi}_1 & -\dot{\Phi}_2 & \underline{R}_{m1} & w_{21} \\ 0 & k_{72} \dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3 & \underline{R}_{m2} k_{72} & w_{22} - w_{21} \\ 0 & k_{72} \dot{\Phi}_1 + k_{72} \dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m2} k_{72} & w_{23} - w_{22} \\ \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4 & \dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m1} & -w_{23} \end{bmatrix}$$

и реализуется итерационный цикл вида

$$\mathbf{X}^{<k+1>} = \mathbf{X}^{<k>} - [\mathbf{J}(\mathbf{X}^{<k>})]^{-1} \cdot \mathbf{F}(\mathbf{X}^{<k>}), \quad (6)$$

где

$$\mathbf{X}^{<k>} = [\underline{R}_{m1}^{<k>} \quad \underline{R}_{m2}^{<k>} \quad \dot{\Phi}_1^{<k>} \quad \dot{I}_{20}^{<k>}]^T$$

– k -е приближение метода Ньютона.

2. Для нагрузочного режима или режима короткого замыкания предварительно определяются магнитные потоки магнитопровода и активно-индуктивные сопротивления фаз обмоток. Оценка производится по следующим формулам (величины – в основных единицах системы СИ):

$$u_k' = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{100P_k}{S_H}\right)^2};$$

$$\underline{Z}_1 = \frac{3U_{1n}^2 P_k}{2S_H^2} + j \frac{3U_{1n}^2 u_k'}{200S_H}; \quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_1 \frac{U_{2n}^2}{U_{1n}^2},$$

где P_k – потери короткого замыкания; u_k – напряжение короткого замыкания, %; S_H – номинальная мощность трансформатора; U_{1n} , U_{2n} – фазные номинальные напряжения обмоток;

$$\dot{\Phi}_2 = \frac{\dot{U}_{11} - \dot{I}_{11} \underline{Z}_1}{j \omega w_{11}}; \quad \dot{\Phi}_3 = \frac{\dot{U}_{12} - \dot{I}_{12} \underline{Z}_1}{j \omega w_{12}};$$

$$\dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13} - \dot{I}_{13} \underline{Z}_1}{j \omega w_{13}}. \quad (7)$$

Аналогично предыдущему пункту решается система уравнений

$$\begin{aligned} \underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} + \dot{I}_{20} w_{21} &= 0; \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3] - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21} - \dot{I}_{20} (w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} &= 0; \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + k_{72} \dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4] - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22} - \dot{I}_{20} (w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23} &= 0; \\ \underline{R}_{m1} (\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23} - \dot{I}_{20} w_{23} &= 0 \end{aligned}$$

составлением векторной функции

$$\mathbf{F}(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{20}) = \begin{bmatrix} \underline{R}_{m1} \dot{\Phi}_1 - \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_2 + \dot{I}_{11} w_{11} + \dot{I}_{21} w_{21} + \dot{I}_{20} w_{21} \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3] - \dot{I}_{11} w_{11} - \dot{I}_{21} w_{21} - \dot{I}_{20} (w_{21} - w_{22}) + \dot{I}_{12} w_{12} + \dot{I}_{22} w_{22} \\ \underline{R}_{m2} [k_{72} \dot{\Phi}_1 + k_{72} \dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4] - \dot{I}_{12} w_{12} - \dot{I}_{22} w_{22} - \dot{I}_{20} (w_{22} - w_{23}) + \dot{I}_{13} w_{13} + \dot{I}_{23} w_{23} \\ \underline{R}_{m1} (\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4) + \underline{R}_{m2} \dot{\Phi}_4 - \dot{I}_{13} w_{13} - \dot{I}_{23} w_{23} - \dot{I}_{20} w_{23} \end{bmatrix}$$

с матрицей Якоби

$$\mathbf{J}(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{20}) = \begin{bmatrix} \dot{\Phi}_1 & -\dot{\Phi}_2 & \underline{R}_{m1} & w_{21} \\ 0 & k_{72} \dot{\Phi}_1 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_3 & \underline{R}_{m2} k_{72} & w_{22} - w_{21} \\ 0 & k_{72} \dot{\Phi}_1 + k_{72} \dot{\Phi}_2 + (k_{72} + 1) \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m2} k_{72} & w_{23} - w_{22} \\ \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_4 & \dot{\Phi}_4 & \underline{R}_{m1} & -w_{23} \end{bmatrix}$$

в итерационном цикле метода Ньютона.

3. Уточнение полученных величин осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{21} &= \frac{\dot{U}_{21} - j \omega w_{21} \dot{\Phi}_2}{\dot{I}_{21} + \dot{I}_{20}}; \\ \underline{Z}_{22} &= \frac{\dot{U}_{22} - j \omega w_{22} \dot{\Phi}_3}{\dot{I}_{22} + \dot{I}_{20}}; \\ \underline{Z}_{23} &= \frac{\dot{U}_{23} - j \omega w_{23} \dot{\Phi}_4}{\dot{I}_{23} + \dot{I}_{20}}; \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_{21} \frac{w_{11}^2}{w_{21}^2}; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{22} \frac{w_{12}^2}{w_{22}^2}; \\ \underline{Z}_{13} &= \underline{Z}_{23} \frac{w_{13}^2}{w_{23}^2}; \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_2 &= \frac{\dot{U}_{11} - \dot{I}_{11} \underline{Z}_{11}}{j \omega w_{11}}; \\ \dot{\Phi}_3 &= \frac{\dot{U}_{12} - \dot{I}_{12} \underline{Z}_{12}}{j \omega w_{12}}; \quad \dot{\Phi}_4 = \frac{\dot{U}_{13} - \dot{I}_{13} \underline{Z}_{13}}{j \omega w_{13}} \end{aligned} \tag{10}$$

с повторным решением системы четырех уравнений аналогично предыдущему пункту с векторной функцией $\mathbf{F}(\underline{R}_{m1}, \underline{R}_{m2}, \dot{\Phi}_1, \dot{I}_{20})$.

4. Определение параметров решетчатой схемы замещения осуществляется по методике работы [6]. Из полученных на предыдущих этапах параметров трансформатора составляется матрица обобщенных сопротивлений \underline{Z}_T и решается относительно токов

$$\dot{\mathbf{I}}_T = \underline{Z}_T^{-1} \mathbf{U}_T$$

с получением матрицы проводимостей $\underline{\mathbf{D}}_1 = \underline{Z}_T^{-1}$. Матрица \underline{Z}_T имеет симметричную подматрицу размером $3n \times 3n$, где n – количество обмоток трансформатора, поэтому и матрица $\underline{\mathbf{D}}_1$ имеет симметричную подматрицу $\underline{\mathbf{D}}$ такого же размера, которая и используется в матрице проводимостей решетчатой схемы замещения.

Из матрицы $\underline{\mathbf{D}}$ образуется матрица решетчатой схемы

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} -\underline{\mathbf{D}} & \underline{\mathbf{D}} \\ \underline{\mathbf{D}} & -\underline{\mathbf{D}} \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$ представляют собой проводимости ветвей полносвязной решетчатой схемы замещения, и проводимость ветви между концами катушек i, k (нумерация по рис. 1) равна значению элемента матрицы \underline{Y}_{ik} (нумерация строк и столбцов начинается с единицы). Из-за отсутствия заземленных узлов шунты всех семи узлов имеют нулевые проводимости на землю. Ветви между соединяемыми друг с другом концами катушек игнорируются. Проводимости ветвей между узлами определяются из условий соединения друг с другом концов катушек трансформатора:

$$\begin{aligned} \underline{y}_{ik} &= \underline{Y}_{ik}, \quad i = 1 \dots 3, \quad k = 1 \dots 3, \quad i \neq k; \\ \underline{y}_{-ik} &= \underline{Y}_{ik} + \underline{Y}_{i,k+7}, \quad i = 1 \dots 3, \quad k = 4 \dots 5; \\ \underline{y}_{i,6} &= \underline{Y}_{i,6} + \underline{Y}_{i,10}, \quad i = 1 \dots 3; \\ \underline{y}_{i,7} &= \underline{Y}_{i,7} + \underline{Y}_{i,8} + \underline{Y}_{i,9}, \quad i = 1 \dots 3; \\ \underline{y}_{i,7} &= \underline{Y}_{i,7} + \underline{Y}_{i,8} + \underline{Y}_{i,9} + \underline{Y}_{i+7,7} + \underline{Y}_{i+7,8} + \underline{Y}_{i+7,9}, \\ & i = 4 \dots 5; \\ \underline{y}_{6,7} &= \underline{Y}_{6,7} + \underline{Y}_{6,8} + \underline{Y}_{6,9} + \underline{Y}_{10,7} + \underline{Y}_{10,8} + \underline{Y}_{10,9}; \\ \underline{y}_{4,5} &= \underline{Y}_{4,5} + \underline{Y}_{5,11}; \quad \underline{y}_{4,6} = \underline{Y}_{4,6} + \underline{Y}_{4,10}; \\ \underline{y}_{5,6} &= \underline{Y}_{5,6} + \underline{Y}_{6,12}, \end{aligned}$$

где \underline{y}_{ik} – проводимости ветвей между узлами i, k решетчатой схемы (номера по рис. 2), \underline{Y}_{ik} – элемент строки i столбца k матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$.

Общее количество ветвей итоговой решетчатой схемы равно 21.

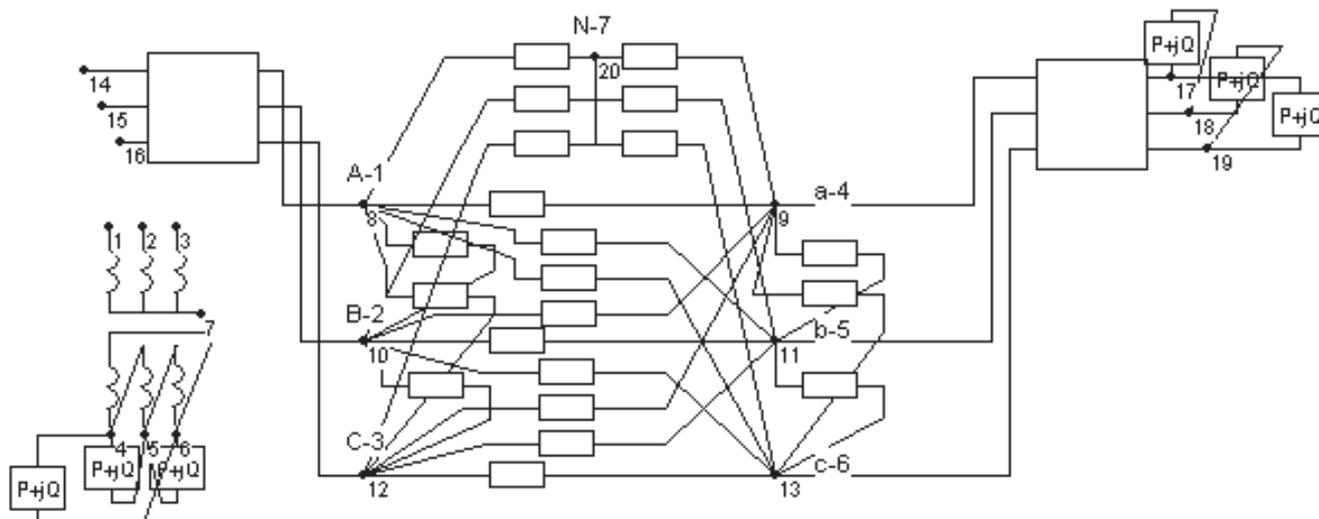


Рис. 3. Расчетная схема ПК Fazonord.

Таблица 1

Напряжения и токи холостого хода и нагрузочного режима трансформатора

Узел	Холостой ход				Нагрузочный режим			
	U, кВ	U, град	I, А	I, град	U, кВ	U, град	I, А	I, град
1	22.25	0	1.33	-88.5	22.25	0	62.41	-43.2
2	22.25	-120.0	0.96	160.4	22.25	-120.0	62.09	-135.2
3	22.25	120.0	1.33	49.4	22.25	120.0	86.46	91.0
4	10.497	0.01	0	-115	10.262	-1.2	187.94	-178.2
5	10.497	-60.0	0	5	10.256	-62.1	287.83	72.5
6	0	108.4	0	125	0	126.9	287.27	-69.3
7	0.0005	-113.1	0	94.4	0.0005	-113.1	0	94.4

Пример идентификации параметров трансформатора. В качестве примера рассмотрен трансформатор ТД-10000-38.5/11 Y/D. На рис. 3 показана расчетная схема ПК Fazonord с «правильной» моделью трансформатора и с решетчатой схемой замещения из RL-элементов. Узлы 1, 2, 3 и 14, 15, 16 объявлены балансирующими с симметричной системой напряжений 22.25 кВ. Дополнительные модели трехфазных линий длиной 0.01 км слева и справа от решетчатой схемы добавлены для удобства оперирования со схемой и практически никакого вклада в режим не вносят. Нагрузки включены между узлами вторичной обмотки. Поскольку вторичная обмотка изолирована от земли и ее потенциал неопределен, что приводит к произвольным потенциалам узлов 4, 5, 6 и 17, 18, 19, рассчитывается режим при заземлении узлов 6 и 19 на землю через шунт 1 См. Этот режим соответствует однофазному замыканию на землю в сети с изолированной нейтралью. В таблице 1 представлены напряжения и токи «правильной» модели трансформатора, использованные для идентификации его параметров

1. По формуле (1) из режима холостого хода определяются числа витков обмоток трансформатора:

$$w_{11} = w_{12} = w_{13} = 430.8; w_{21} = w_{22} = w_{23} = 203.3.$$

Оценка потоков и сопротивлений по формулам (2) ... (6) дает следующие значения:

$$\dot{\Phi}_1 = 5.746 \cdot 10^{-4} + j 6.733 \cdot 10^{-4} \text{ Тл};$$

$$\dot{\Phi}_2 = 3.397 \cdot 10^{-6} - j 0.1644 \text{ Тл};$$

$$\dot{\Phi}_3 = -0.1424 + j 0.0822 \text{ Тл};$$

$$\dot{\Phi}_4 = 0.1424 + j 0.0822 \text{ Тл};$$

$$\underline{R}_{m1} = 2.806 \cdot 10^5 + j 1.085 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1};$$

$$\underline{R}_{m2} = 1852.95 + j 340.643 \text{ Гн}^{-1};$$

$$I_0 = -0.235 + 0.085 \text{ А}.$$

2. Вычисления для нагрузочного режима дают близкие значения величин:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_1 &= 0.00419 - j 0.0179 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_2 &= -0.0017 - j 0.1625 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_3 &= -0.1404 + j 0.0838 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_4 &= 0.1421 + j 0.0786 \text{ Тл}; \\ \underline{R}_{m1} &= -1.353 \cdot 10^4 + j 7997.7 \text{ Гн}^{-1}; \\ \underline{R}_{m2} &= 1853.78 + j 282.35 \text{ Гн}^{-1}; \\ I_0 &= -0.237 + 0.091 \text{ А},\end{aligned}$$

причем ток нулевой последовательности, определяемый внутренней несимметрией трансформатора, практически не меняется.

3. Уточнение параметров, полученных из нагрузочного режима, мало меняет величины:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_1 &= 0.00419 - j 0.0179 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_2 &= -0.0017 - j 0.1625 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_3 &= -0.1404 + j 0.0838 \text{ Тл}; \\ \dot{\Phi}_4 &= 0.1422 + j 0.0787 \text{ Тл}; \\ \underline{R}_{m1} &= -1.353 \cdot 10^4 + j 7997.7 \text{ Гн}^{-1}; \\ \underline{R}_{m2} &= 1853.78 + j 282.35 \text{ Гн}^{-1}; \\ I_0 &= -0.237 + 0.091 \text{ А}.\end{aligned}$$

Таблица 2

*Сопротивления ветвей решетчатой схемы
(нумерация узлов по рис. 3)*

Ветвь между узлами	Активное сопротивление ветви, Ом	Реактивное сопротивление ветви, Ом
1-2	-15107.8	25522
1-3	-11788.1	24308.4
1-4	0.37068	5.15929
1-5	-24741.8	-103967
1-6	-0.37065	-5.15953
1-7	0.79341	10.943
2-3	-15107.6	25521.8
2-4	-0.3923	-5.24177
2-5	0.3923	5.24181
2-6	48941.6	682350
2-7	0.83947	11.11732
3-4	31884.7	124885
3-5	-0.39408	-5.20815
3-6	0.39406	5.20836
3-7	0.84323	11.04671
4-5	0.18510	2.47257
4-6	0.17491	2.43326
4-7	34.62402	-316.21179
5-6	0.18594	2.45637
5-7	163.18831	791.66753
6-7	-147.57476	477.00074

4. Составление матрицы обобщенных сопротив-

лений и ее обращение с последующим определением сопротивлений ветвей дает параметры решетчатой схемы, представленные в таблице 2. Проводимости узловых шунтов решетчатой схемы нулевые.

5. В таблицах 3 – 6 приведены сравнительные расчеты режимов холостого хода и нагрузочного режима по «правильной» модели и по решетчатой схеме.

Таблица 3

*Режим первичной обмотки при холостом ходе
(нумерация узлов по рис. 3)*

Узел	1	14	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	0.0	0.0	–
Узел	2	15	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	-120.0	-120.0	–
Узел	3	16	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	120.0	120.0	–

Примечание. Активная мощность, потребляемая трансформатором «правильной» модели, равна 14.5 кВт, активная мощность, потребляемая решетчатой схемой, равна 14.1 кВт. Реактивные мощности соответственно равны 78.6 квар и 74.8 квар, что соответствует небольшому занижению тока холостого хода трансформатора – от 0.79% в «правильной» модели до 0.75% в решетчатой схеме.

Таблица 4

*Режим вторичной обмотки при холостом ходе
(нумерация узлов по рис. 3)*

Узел	4	17	Различие
Напряжение, кВ	10.497	10.494	0.0 %
Угол, град.	0.0	0.0	0.0°
Узел	5	18	Различие
Напряжение, кВ	10.497	10.494	0.0 %
Угол, град.	-60.0	-60.0	0.0°
Узел	6	19	Различие
Напряжение, кВ	0	0	–
Угол, град.	108.4	55.9	–

Приведенные данные показывают хорошее совпадение режима исходной «правильной» модели и режима восстановленной решетчатой схемы при холостом ходе и практически полное совпадение в нагрузочном режиме.

Таблица 5

Режим первичной обмотки при включении нагрузки

Узел	1	14	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	0.0	0.0	–
Ток, А	62.41	61.36	-1.7 %
Ток, град.	-43.2	-43.2	0.0°
Узел	2	15	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	-120.0	-120.0	–
Ток, А	62.09	62.00	-0.1 %
Ток, град.	-135.2	-135.1	0.1°
Узел	3	16	Различие
Напряжение, кВ	22.25	22.25	–
Угол, град.	120.0	120.0	–
Ток, А	86.46	86.42	0.0 %
Ток, град.	91.0	91.0	0.0°

Выводы.

1. Предложен новый метод параметрической идентификации двухобмоточных трансформаторов, отличающийся от известных использованием фазных координат и построением модели трансформатора в виде решетчатой схемы замещения, элементы которой со-

Таблица 6

Режим вторичной обмотки при включении нагрузки

Узел	4	17	Различие
Напряжение, кВ	10.262	10.264	0.0 %
Угол, град.	-1.2	-1.2	0.0°
Ток, А	187.9	187.9	0.0 %
Ток, град.	-178.2	-178.2	0.0°
Узел	5	18	Различие
Напряжение, кВ	10.256	10.251	0.0 %
Угол, град.	-62.1	-62.1	0.0°
Ток, А	287.8	287.8	0.0 %
Ток, град.	72.5	72.5	0.0°
Узел	6	19	Различие
Напряжение, кВ	0	0	–
Угол, град.	180	98.2	–
Ток, А	287.3	287.2	0.0 %
Ток, град.	-69.3	-69.3	0.0°

единены по схеме полного графа.

2. Компьютерное моделирование, выполненное применительно к реальному трансформатору, показало высокую точность предложенного метода параметрической идентификации.

Литература

1. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Шелюг С.Н. Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2000. 23 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
5. Шульгин М.С., Крюков А.В., Закарюкин В.П. Параметрическая идентификация линий электропередачи на основе фазных координат // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1(29). С. 140-148.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.
7. Fazonord-Quality – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов: программа для ЭВМ / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. Св. ГР. № 2007612771 Рос. Федерация. Зарег. Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 28.06.2007.

References

1. Gamm A.Z. Statistical technology for estimation of electric power systems pathology. M.: Nauka, 1976. 220 s.
2. Idel'chik V.I. Electrical systems and networks. M.: Energoatomizdat, 1989. 592 s.
3. Shelyug S.N. Techniques for adaptive identification of equivalent circuit parameters of electrical network elements: avtoref.dis. ... kand.tekhn.nauk. Ekaterinburg, 2000. 23 s.
4. Automatic control theory handbook / pod red. A.A. Krasovskogo. M.: Nauka, 1987. 712 s.
5. Shul'gin M.S., Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Power lines parametric identification based on the phase coordinates // Sovremennyye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye. 2011. № 1(29). S. 140-148.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex unbalanced states of electrical systems. Irkutsk: Irkut. un-t. 2005. 273 s.
7. Fazonord-Quality-Electric power quality indices computations in the power-supply systems at the phase coordinates taking into account train operation: computer program / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov. Sv. GR. № 2007612771 Ros. Federatsiya. Zareg. Feder. sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. 28.06.2007.