

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-51-59

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора и данных полнофазного моделирования

В.Е. Шмелев, Е.В. Абрамченко, С.А. Сбитнев

Повышение энергоэффективности и качества электроэнергии в распределительных сетях является комплексной задачей, при решении которой следует руководствоваться объективными критериями. Основным критерий при оценке эффективности технических средств и организационных мер по снижению технических и коммерческих потерь и повышению основных показателей качества электрической энергии — данные расчета установившегося режима исследуемой сети. Вместе с тем, значительной проблемой в электроэнергетике остается повышение точности расчета электрических сетей с неравномерно распределенной по фазам нагрузкой, к которым относятся распределительные сети. Традиционно применяющиеся на практике однолинейные схемы замещения не позволяют с достаточной точностью проводить расчет установившегося режима трехфазной электрической сети с множественными источниками несимметрии. В таких условиях целесообразным является переход к использованию полнофазного представления исследуемой сети, что предполагает создание, расчет параметров и применение трехфазных схем замещения электротехнического оборудования.

Описана принципиальная методика построения полнофазной модели трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток звезда — звезда с нулем, широко распространенного в распределительных сетях. На испытательном стенде проведены следующие опыты: холостого хода, короткого замыкания, работы под нагрузкой; холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности; холостого хода и работы под нагрузкой при обрыве одной из фаз. Часть экспериментальных данных использовалась для расчета параметров полнофазной схемы замещения и моделирования трехфазного трансформатора в среде MATLAB на основе представленной методики.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует о высокой степени достоверности и точности проведенного моделирования различных режимов трансформатора. В симметричном режиме максимальная погрешность основных параметров составила 4,78 %, минимальная — 2,13 %. В несимметричном режиме максимальная погрешность — 6,6 %, минимальная — 0,78 %. Это позволяет сделать вывод, что предлагаемая полнофазная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения звезда — звезда с нулем адекватно отражает свойства реального трансформатора. Предложенная методика выявляет важнейшие свойства трехфазного трансформатора — перераспределение магнитных потоков по стержням магнитопровода и наличие напряжения на вторичной обмотке при обрыве одной из фаз первичной обмотки. Можно сделать вывод, что трехфазный трансформатор обладает симметрирующим эффектом.

Ключевые слова: схема замещения, моделирование, трансформатор.

Для цитирования: Шмелев В.Е., Абрамченко Е.В., Сбитнев С.А. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора и данных полнофазного моделирования // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 51—59. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-51-59.

A Comparative Analysis of the Results from Experimental Investigation of Imbalanced Operation Modes of a Three-phase Transformer and Full-phase Simulation Data

V.E. Shmelev, E.V. Abramchenko, S.A. Sbitnev

Achieving better energy efficiency and quality of electrical power supply in distribution networks is a multipronged problem, which should be solved with reference to unbiased criteria. Data obtained from load flow analysis of the network under study serve as the main criterion in estimating the efficiency of technical solutions and administrative measures aimed at decreasing technical and commercial losses and improving the key electric energy quality indicators. At the same time, achieving better accuracy of a numerical analysis of electrical networks with loads unevenly distributed among the phases, including, in particular, distribution networks, still remains a significant problem in the electric power industry. The single-line equivalent circuits, which are conventionally used in engineering applications, do not allow the steady-state operating conditions of a three-phase electric network containing multiple sources of imbalance to be analyzed with sufficient accuracy. Under such conditions, it is reasonable to make a shift for using a three-phase representation of the network under study. This approach involves the need to construct three-phase equivalent circuits of electrical equipment, determine their parameters and use them for analysis.

The article describes a conceptual approach for constructing the three-phase model of a three-phase two-winding transformer with a wye – grounded wye winding connection circuit, which is widely used in distribution networks. The following experiments were carried out on the test bench: open-circuit test, short-circuit test, load operation tests, open-circuit test under zero sequence supply voltage, and open-circuit test and load operation tests with one phase disconnected. Part of the experimental data was used to calculate the parameters of the three-phase equivalent circuit and to model a three-phase transformer in the MATLAB environment based on the described method.

A comparison between the simulated and the experimental data testifies that the performed simulation of various transformer operating conditions yields highly reliable and accurate results. In the balanced mode, the maximum and minimum errors of simulating the main parameters were found to be 4.78 and 2.13%, respectively. In the unbalanced mode, the maximum and minimum errors of simulating the main parameters were found to be 6.6 and 0.78%, respectively. The obtained results allow a conclusion to be drawn that the proposed model of a three-phase two-winding transformer with the wye – grounded wye winding connection circuit adequately reflects the properties of a real transformer. The proposed technique allows the key properties of a three-phase transformer to be revealed, namely, the redistribution of magnetic fluxes among the magnetic core legs and the presence of voltage across the secondary winding when one of the primary winding phases is open. It can also be inferred that a three-phase transformer has a balancing effect.

Key words: equivalent circuit, modeling, transformer.

For citation: Shmelev V.E., Abramchenko E.V., Sbitnev S.A. A Comparative Analysis of the Results from Experimental Investigation of Imbalanced Operation Modes of a Three-phase Transformer and Full-phase Simulation Data. MPEI Vestnik. 2018;3:51—59. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-51-59.

Введение

В настоящее время перед электроэнергетикой Российской Федерации стоит задача повышения энергоэффективности. Исходя из государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики», утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 512-Р от 03.04.2013, потери в электрических сетях должны быть снижены до уровня 8,8 % к 2020 г. Значительная их часть приходится на распределительный электросетевой комплекс, имеющий высокий уровень как технологических, так и коммерческих потерь [1]. Существует множество способов решения данных проблем: установка автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), борьба с безучетным и бездоговорным потреблением электроэнергии с привлечением работников сетевых компаний (обходы потребителей), замена оборудования на энергоэффективное и т. д. В то же время в распределительных сетях качество электроэнергии, остается на низком уровне [2]. Проблемы усугубляются ростом количества заявок на технологическое присоединение к сетям 6(10)...0,4 кВ (по данным ЕМИСС количество заявок в 2012 г. составило около 350 000 шт., в 2013 г. — 520 000, в 2014 г. — 490 000, в 2015 г. — 500 000). Меры по повышению энергоэффективности и качества электроэнергии в распределительных сетях должны применяться комплексно, с учетом их экономической эффективности [3]. Первым шагом должен стать расчет режима сети или участка сети, в котором планируется применять те или иные технические и организационные меры.

Известно, что распределительные сети являются примером сетей, в которых нагрузка по фазам распределена неравномерно. Существующие и применяющиеся на практике методы расчета установившихся режимов работы основаны на методе симметричных составляющих, который имеет ограничение на количество источников несимметрии (не больше одного–двух) [4, 5]. Од-

нолинейное (однофазное) представление трехфазной сети по своей сути подразумевает равенство фазных параметров, однако распределительные электрические сети не обладают этим свойством, поскольку большинство бытовых потребителей являются однофазными. Трехфазные схемы замещения не имеют ограничения на количество источников несимметрии, поэтому логичным представляется использование полнофазных схем замещения для расчета распределительных сетей. Полученные результаты, описанные в [6, 7], показывают перспективность такого подхода.

Полнофазное представление трехфазных трансформаторов освещалось как в отечественных [8 — 10], так и в зарубежных [11 — 13] работах. К их недостаткам можно отнести отсутствие экспериментального подтверждения адекватности модели [8, 9, 12] и алгоритма расчета параметров полнофазной схемы замещения трехфазного трансформатора на основе паспортных данных [8, 12], необходимость проведения множественных измерений токов и напряжений на каждой фазе каждой обмотки [11, 13], использование коммерческого программного обеспечения с закрытым исходным кодом [10, 13].

Представлена уточненная методика построения полнофазной модели трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулем». На испытательном стенде экспериментально проведены опыты холостого хода, короткого замыкания, работы под нагрузкой, опыты холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности, а также опыты холостого хода и работы под нагрузкой при обрыве одной из фаз. В качестве средства измерения использовался прибор для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор-3.3Т1». Результаты названных опытов использованы для моделирования в среде MATLAB трехфазной схемы замещения трансформатора, параметры которой были рассчитаны на основе представленной методики. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными.

Методика моделирования трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения «звезда – звезда с нулем»

Однофазное представление

На практике широко распространены однофазная Т-образная и Г-образная схемы замещения (рис. 1, а, б) трехфазного трансформатора [14].

Параметры каждой схемы замещения можно рассчитать на основе паспортных данных реального прибора. Широко известные формулы приведены в [4, 14]. Недостатком однофазных схем замещения, представленных на рис. 1, можно считать невозможность учета несимметрии фазных параметров и необходимость приведения параметров одной обмотки к другой. В целом такие схемы замещения не учитывают взаимное влияние обмоток. Для составления полнофазной схемы замещения электрической сети они использоваться напрямую не могут.

Полнофазное представление

Трехфазный трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда – звезда с нулем» можно представить как пассивный элемент электрической сети, содержащий две группы по 3 ветви, соединенные звездой (рис. 2).

Паспортные данные трехфазного трансформатора соответствуют паспортным данным однофазного. Их принципиальное отличие, с точки зрения моделирования по полнофазной схеме замещения, заключается в том, что индуктивная связь существует не только между первичными и вторичными обмотками соответствующи-

хих фаз (как это наблюдается в трансформаторных группах), но и между разными фазными обмотками. Если трехфазный трансформатор имеет магнитопровод стержневого типа, то магнитные потоки, обусловленные токами нулевой последовательности, в таких индуктивных связях во много раз меньше рабочих магнитных потоков в сечениях стержней (имеется сильное электромагнитное влияние фаз друг на друга, которое обязательно нужно учитывать в несимметричных режимах работы). Такое взаимное влияние приводит к тому, что режим холостого хода при питании стороны высоким (ВН) или низким (НН) напряжением нулевой последовательности близок к режиму короткого замыкания при питании симметричной системой напряжений. У трехфазных трансформаторов имеется также конструктивная несимметрия импедансов фазных обмоток, поэтому для расчета параметров трехфазной схемы замещения в методику, помимо паспортных, введены дополнительные данные:

- U_{0x} — напряжение холостого хода нулевой последовательности в процентах от номинального;
- P_{0x} — активная мощность потерь на холостом ходу при питании напряжением нулевой последовательности;
- K_s — отношение комплексной мощности фазы на крайнем стержне к комплексной мощности фазы на среднем стержне при питании напряжением прямой последовательности в режиме холостого хода.

С учетом изложенных дополнений алгоритм вычисления матрицы импедансов ветвей Z_b трехфазного

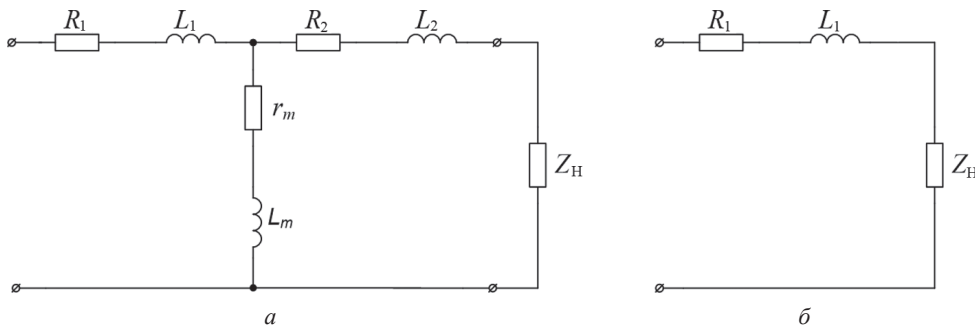


Рис. 1. Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения

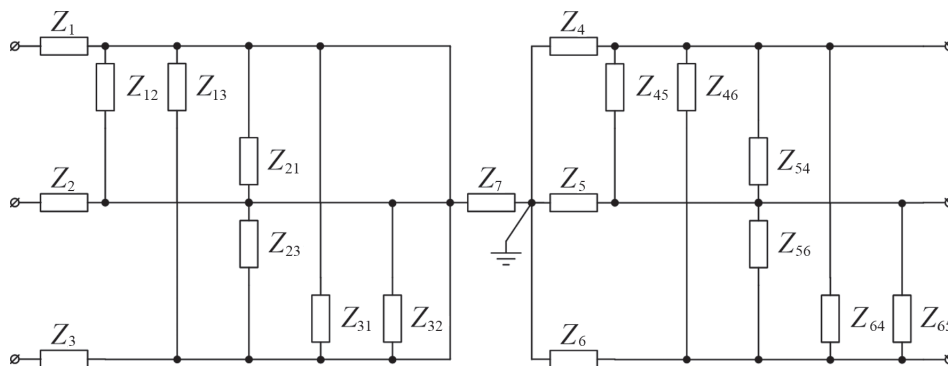


Рис. 2. Полнофазная схема замещения (взаимные импедансы между обмотками ВН и НН не показаны)

трансформатора может быть описан с помощью соотношений:

полной мощности холостого хода при питании симметричной системой напряжений

$$S_0 = S_H \frac{I_0}{100};$$

комплексной мощности холостого хода

$$\tilde{S}_0 = P_0 + j\sqrt{S_0^2 - P_0^2};$$

полной мощности холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности

$$S_{0x} = S \frac{U_{0x}}{100};$$

комплексной мощности холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности

$$\tilde{S}_{0x} = P_{0x} + j\sqrt{S_{0x}^2 - P_{0x}^2};$$

коэффициента трансформации (определяется так же, как и для однофазного трансформатора)

$$k = U_2/U_1;$$

матрицы комплексных мощностей холостого хода при питании напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательностей

$$S_{0s} = \begin{bmatrix} K_s & K_s \\ 1 & 1 \\ K_s & K_s \end{bmatrix} \frac{\tilde{S}_0}{1+2K_s} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{S}_{0x} \\ 3 \end{bmatrix};$$

матрицы напряжений холостого хода

$$U_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{U_{0x, \%}}{100} U_\phi = \\ = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{U_{0x, \%}}{100} \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}},$$

где $a = \exp\left(-j\left(\frac{2}{3}\right)\right) = -0,5 - j\sqrt{0,75}$ — оператор поворота в симметричной трехфазной системе; U_{BH} — номинальное напряжение стороны ВН;

матрицы комплексных токов холостого хода I_s (при питании напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательностей определяется почленным делением матрицы, комплексно-сопряженной с S_{0s} , на матрицу, комплексно-сопряженную с U_s)

$$I_s = S_{0s}^* / U_s^*;$$

матрицы импедансов ветвей на стороне ВН Z_{BH} (определяется правым матричным делением матрицы

напряжений холостого хода при питании напряжением прямой, обратной и нулевой последовательностей U_s на матрицу I_s)

$$Z_{BH} = U_s / I_s;$$

полной мощности короткого замыкания

$$S_k = S \frac{U_k}{100};$$

фазного напряжения короткого замыкания

$$U_{kf} = U_\phi \frac{U_k}{100};$$

коэффициента электромагнитной связи между первичными и вторичными обмотками соответствующих фаз

$$k_{эм} = \sqrt{1 - \left(P_k - j\sqrt{S_k^2 - P_k^2}\right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \end{bmatrix} Z_{BH}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} U_{kf}^2};$$

матрицы импедансов ветвей трехфазной схемы замещения трансформатора

$$Z_B = \begin{bmatrix} 1 & n^{-1} \\ n^{-1} & (k_{эм}n)^{-2} \end{bmatrix} \otimes Z_{BH},$$

где \otimes — оператор произведения Кронекера двух матриц.

Моделирование различных режимов работы трехфазного трансформатора

Моделирование и расчет проводился в вычислительной среде MATLAB. Была составлена схема замещения, соответствующая экспериментально исследуемой электрической сети (рис. 3). На ее основе построен направленный граф (рис. 4), а также матрицы источников ЭДС E , соединений A и импедансов ветвей Z :

$$E = [E_1 \ E_2 \ E_3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix};$$

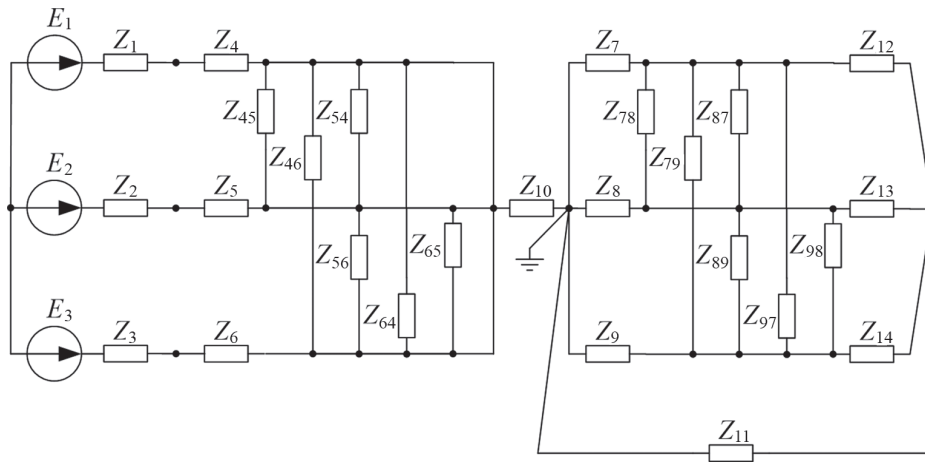


Рис. 3. Схема замещения исследуемой электрической сети (взаимные импедансы между обмотками ВН и НН не показаны)

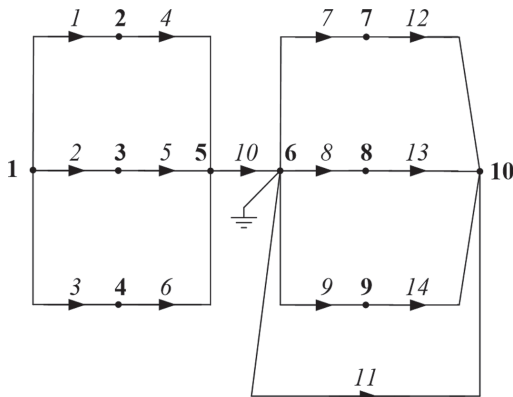


Рис. 4. Направленный граф исследуемой электрической сети: полужирным выделены номера узлов, курсивом — ветвей

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & Z_{54} & Z_{64} & Z_{74} & Z_{84} & Z_{94} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{45} & Z_5 & Z_{65} & Z_{75} & Z_{85} & Z_{95} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{46} & Z_{56} & Z_6 & Z_{76} & Z_{86} & Z_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{47} & Z_{57} & Z_{67} & Z_7 & Z_{87} & Z_{97} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{48} & Z_{58} & Z_{68} & Z_{78} & Z_8 & Z_{98} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{49} & Z_{59} & Z_{69} & Z_{79} & Z_{89} & Z_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{14} & 0 \end{bmatrix}$$

Величины $E_1 — E_3$ и $Z_{12} — Z_{14}$ меняются в зависимости от условий конкретного опыта, поэтому будут приведены в описании схемы проведения вычислительных экспериментов. Для моделирования несимметричных режимов использована модифицированная схема замещения. Она отличается от схемы замещения, изображенной на рис. 4, только наличием дополнительной ветви Z_{15} , соединяющей нейтральные узлы 1 и 5. Соответствующие изменения учтены в матрицах A, E, Z . В настоящей работе они не приводятся.

Результаты моделирования

Рассмотрим условия проведения каждого из вычислительных экспериментов.

Опыт холостого хода

Параметры источников ЭДС $E_1 — E_3$ устанавливаются равными номинальному напряжению стороны ВН трансформатора, а параметрам нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ присваивается значение 1010 Ом, что практически соответствует разомкнутым обмоткам НН трансформатора, то есть режиму холостого хода. Результаты приведены в табл. 1.

Опыт короткого замыкания

Параметры источников $E_1 — E_3$ равны напряжению короткого замыкания в абсолютных единицах; параметрам нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ дано значение 10^{-4} Ом (табл. 1).

Работа под нагрузкой

Параметры источников $E_1 — E_3$ приняты равными номинальному напряжению стороны ВН трансформатора, а параметры нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ подобраны таким образом, чтобы нагрузка трансформатора была равна его установленной полной мощности (табл. 2).

Опыт холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности

Параметры источников ЭДС $E_1 — E_3$ равны номинальному напряжению стороны ВН трансформатора без введения оператора поворота, а параметрам нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ присвоено значение 108 Ом (табл. 3).

Таблица 1

Опыт холостого хода и короткого замыкания

Параметр	Опыт	Моделирование
Ток XX, %	4,58	4,582552
Потери XX, Вт	1,55	1,550000
Напряжение КЗ, %	13,67	13,66999
Потери КЗ, Вт	8,43	8,434067

Опыт холостого хода при обрыве фазы А

ЭДС E_1 равна нулю, а ЭДС E_2, E_3 — номинальному напряжению стороны ВН трансформатора. Параметрам нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ дано значение 108 Ом (табл. 4).

Работа под нагрузкой при обрыве фазы А

ЭДС E_1 равна нулю, а ЭДС E_2, E_3 — номинальному напряжению стороны ВН трансформатора. Параметры нагрузок $Z_{12} — Z_{14}$ подобраны таким образом, чтобы

нагрузка трансформатора была равна его установленной полной мощности (табл. 5).

Расчет относительных погрешностей результатов моделирования при сравнении с экспериментально полученными данными для симметричных (опыты 1 — 3) и несимметричных (опыты 4 — 6) режимов представлены в табл. 6. Относительная погрешность параметра A , полученного при моделировании, равна

Таблица 2

Работа под нагрузкой

Параметр	Опыт						Моделирование					
	Сторона											
	ВН			НН			ВН			НН		
	Фаза											
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Напряжение, В	129,46	128,54	127,85	10,30	10,17	10,39	129,09	128,57	128,19	11,24	11,10	11,15
Ток, А	0,458	0,466	0,478	4,796	5,273	4,905	0,425	0,420	0,421	4,589	4,530	4,551
Мощность, Вт	58,8	59,0	60,4	49,2	53,4	50,7	54,2	53,4	53,2	51,6	50,3	50,7
Среднее напряжение, В	128,62			10,29			128,62			11,16		
Средний ток, А	0,467			4,991			0,42			4,56		
Средняя мощность, Вт	59,4			51,1			53,58			50,86		

Таблица 3

Опыт холостого хода при питании напряжением нулевой последовательности

Параметр	Опыт						Моделирование					
	Сторона											
	ВН			НН			ВН			НН		
	Фаза											
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Напряжение, В	31,42	31,40	31,41	2,56	2,57	2,57	31,40	31,39	31,41	2,86	2,86	2,86
Ток, А	0,519	0,519	0,518	—	—	—	0,472	0,472	0,472			
Мощность, Вт	7,5	7,5	7,5	—	—	—	7,5	7,5	7,5			
Среднее напряжение, В	31,41			2,57			31,40			2,86		
Средний ток, А	0,519			0,47			—			—		
Средняя мощность, Вт	7,5			7,54			—			—		

Таблица 4

Опыт холостого хода с обрывом фазы А

Параметр	Опыт						Моделирование					
	Сторона											
	ВН			НН			ВН			НН		
	Фаза											
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Напряжение, В	160,20	136,10	136,52	14,14	12,57	12,56	131,74	136,00	136,00	12,00	12,38	12,38
Ток, А	0	0,074	0,069	—	—	—	0	0,074	0,069	—	—	—
Среднее напряжение, В	144,27			13,09			134,58			12,25		
Средний ток, А	0,048			0,05			—			—		

Таблица 5

Работа под нагрузкой с обрывом фазы *A*

Параметр	Опыт						Моделирование					
	Сторона											
	ВН			НН			ВН			НН		
	Фаза											
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Напряжение, В	105,68	140,36	100,88	7,43	9,45	11,67	91,10	136,00	136,00	8,04	11,60	12,00
Ток, А	0	0,783	0,537	3,370	4,803	5,321	0,000	0,661	0,554	3,093	4,460	4,614
Мощность, Вт	0	107,3	36,6	25,0	45,3	61,8	0,0	89,1	58,2	24,9	51,7	55,4
Среднее напряжение, В	115,64			9,51			121,03			10,55		
Средний ток, А	0,440			4,498			0,40			4,06		
Средняя мощность, Вт	48,0			44,0			49,13			43,98		

Таблица 6

Сравнение результатов моделирования с опытными данными

Опыт	Относительная погрешность результатов моделирования, %					
	напряжение		ток		активная мощность	
	ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН
Холостой ход	0	0	0	–	–	–
Короткое замыкание	0	0	0	–	–	–
Работа под нагрузкой	0,001	8,531	–9,658	–8,715	–9,785	–0,509
Холостой ход при питании напряжением нулевой последовательности	–0,035	11,486	–8,967	–	–0,022	–
Холостой ход с обрывом фазы <i>A</i>	–6,719	–6,392	0,350	–	–	–
Под нагрузкой с обрывом фазы <i>A</i>	4,664	10,843	–7,959	–9,834	2,432	–0,063
Режим	Средняя относительная погрешность результатов моделирования, %					
	напряжение		ток		активная мощность	
Симметричный	2,133	–4,593	–4,778	–	–	–
Несимметричный	2,308	–6,602	0,782	–	–	–

$$A = \left(\frac{B}{C} 100 - 100 \right),$$

где *B*, *C* — средние по трем фазам значения параметра, полученные в ходе моделирования и эксперимента.

Средняя относительная погрешность параметра A_{cp} рассчитывалась следующим образом:

$$A_{cp} = \frac{1}{N} \sum A_N,$$

где A_N — относительная погрешность параметра, полученного при моделировании опыта *N*; *N* — количество значений относительной погрешности параметра в серии опытов.

Заключение

В анализе полученных данных обязательно следует учитывать несовершенство проведения опытов на ре-

альном трансформаторе, а в особенности следующие факторы: нестабильное и несимметричное питающее напряжение, класс точности измерительного оборудования, а также трудоемкость проведения эксперимента и фиксации данных. Тем не менее, приведенные результаты свидетельствуют о высокой степени достоверности и точности моделирования различных режимов трансформатора. В симметричном режиме максимальная погрешность основных параметров составила 4,78 %, минимальная — 2,13 %. В несимметричном режиме максимальная погрешность равна 6,6 %, минимальная — 0,78 %.

Следует отметить очень важные результаты по опытам 5, 6 (опыт холостого хода при обрыве фазы *A* и работа под нагрузкой при обрыве фазы *A*). При сравнении опытных и расчетных данных моделирования установлено их соответствие с технически приемлемой точностью. Более того, полнофазная модель трансформатора выявляет важнейшие свойства трехфазного

трансформатора — перераспределение магнитных потоков по стержням магнитопровода и наличие напряжения на вторичной обмотке при обрыве одной фазы. На этом основании можно заключить, что трехфазный трансформатор обладает симметрирующим эффектом. Вполне очевидно, что представленные результаты не могут быть получены при однофазном (однолинейном) моделировании трехфазного трансформатора.

Таким образом, предлагаемая полнофазная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения «звезда – звезда с нулем» адекватно отражает свойства реального трансформатора. Предложенная методика может быть применена для расчета параметров силовых трансформаторов [15], в том числе распределительных.

Полнофазная модель трехфазного трансформатора является одним из ключевых элементов, необходимых для перехода от использования однолинейного представления исследуемой сети. Использование трехфазных схем замещения позволяет увеличить точность расчета распределительных сетей и научно обоснованно подойти к вопросам повышения их энергоэффективности, снижения технологических и коммерческих потерь и повышения качества электроэнергии.

Литература

1. **Воротницкий В.Э.** Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях России — стратегический путь повышения их энергетической эффективности // Доклад на IV Междунар. форуме по энергоэффективности и энергосбережению ENES [Электрон. ресурс] http://www.sro-eo.ru/data/Doki_SRO/enes2015_doklad_see_vve.pdf. (дата обращения 05.06.2017).

2. **Бучкина Е.А. и др.** Динамика изменений показателей качества электроэнергии распределительных сетей ОАО «МОЭСК» // Управление качеством электрической энергии: Сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. М.: Радуга, 2014.

3. **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009.

4. **Теоретические основы электротехники.** Т. 1. Основы теории цепей / под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1965.

5. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970.

6. **Сбитнев С.А., Шмелев В.Е., Абрамченко Е.В.** Моделирование трехфазной электрической сети малого населенного пункта // Вестник МЭИ. 2015. № 6. С. 44 — 47.

7. **Абрамченко Е.В., Сбитнев С.А., Шмелев В.Е.** Расчет тестовой распределительной сети на основе трехфазных схем замещения // Сб. науч.-техн. статей сотрудников группы компаний «Россети». М.: Энергоэнергия. Передача и распределение, 2017.

8. **Гусейнов А.М., Ибрагимов Ф.Ш.** Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. № 5. С. 10 — 17.

9. **Солдатов В.А., Баранов А.А.** Аналитическая модель трансформаторов «звезда – треугольник» и «звезда – звезда с нулем» в фазных координатах // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 1. С. 76 — 79.

10. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С.** Параметрическая идентификация силовых трансформаторов // Вестник ИргТУ. 2011. № 12. С. 219 — 227.

11. **Peng Xiao, David C. Yu, Wei Yan.** A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations // IEEE Trans. Power Syst. 2006. V. 21. No.1. Pp. 153 — 159.

12. **Izudin Džafić, Rabih A. Jabr, Hans-Theo Neisius.** Transformer Modeling for Three-phase Distribution Network Analysis // IEEE Trans. Power Syst. 2015. V. 30. No. 5. Pp. 2604 — 2611.

13. **Qiong Wu, Saeed Jazebi, Francisco de Leon.** Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V. 53. No. 7. Pp. 1 — 8.

14. **Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.** Электрические машины. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1979.

15. **Селезнев В.Ю., Сбитнев С.А., Шмелев В.Е., Горюшин Ю.А.** Новый матричный метод моделирования режимов магистральных и распределительных электрических сетей по трехфазным схемам замещения // Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика, высоковольтное оборудование: Материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. М., 2014.

References

1. **Vorotnitskiy V.E.** Snizhenie Poter' Elektroenergii v elektricheskikh Setyah Rossii — Strategicheskii Put' Povysheniya ih Energeticheskoi Effektivnosti. Doklad na IV Mezhdunar. Forume po Energoeffektivnosti i Energoberezeniyu ENES [Elektron. Resurs] http://www.sro-eo.ru/data/Doki_SRO/enes2015_doklad_see_vve.pdf. (Data Obrashcheniya 05.06.2017). (in Russian).

2. **Buchkina E.A. i dr.** Dinamika Izmeneniy Pokazateley Kachestva Elektroenergii Raspredelitel'nykh Setey ОАО «МОЭСК». Upravlenie Kachestvom Elektricheskoi Energii: Sb. Trudov Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. M.: Raduga, 2014. (in Russian).

3. **Zhelezko Yu.S.** Poteri Elektroenergii. Reaktivnaya Moshchnost'. Kachestvo Elektroenergii. M.: ENAS, 2009. (in Russian).

4. **Teoreticheskie Osnovy Elektrotehniki.** T. 1. Osnovy Teorii Tsepey / pod Red. P.A. Ionkina. M.: Vysshaya Shkola, 1965. (in Russian).

5. **Ul'yanov S.A.** Elektromagnitnye Perekhodnye Protsestry V Elektricheskikh Sistemah. M.: Energiya, 1970. (in Russian).

6. **Sbitnev S.A., Shmelev V.E., Abramchenko E.V.** Modelirovanie Trekhfaznoy Elektricheskoy Seti Malogo Naselennogo Punkta. Vestnik MPEI. 2015;6:44 — 47. (in Russian).

7. **Abramchenko E.V., Sbitnev S.A., Shmelev V.E.** Raschet Testovoy Raspredelitel'noy Seti na Osnove Trekhfaznykh Skhem Zameshcheniya. Sb. Nauch.-tekhn. Sta-tey Sotrudnikov Gruppy Kompaniy «Rosseti». M.: Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie, 2017. (in Russian).

8. **Guseynov A.M., Ibragimov F.Sh.** Raschet v Faznykh Koordinatakh Nesimmetrichnykh Ustanovivshihya i Perekhodnykh Rezhimov v Slozhnykh Elektroenergeticheskikh Sistemah. Elektrichestvo. 2012;5:10 — 17. (in Russian).

9. **Soldatov V.A., Baranov A.A.** Analiticheskaya Model' Transformatorov «Zvezda – Treugol'nik» i «Zvezda – Zvezda s Nulem» v Faznykh Koordinatakh. Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK. 2011;1:76 — 79. (in Russian).

10. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S.** Parametricheskaya Identifikatsiya Silovykh Transformatorov. Vestnik IrGTU. 2011;12:219 — 227. (in Russian).

11. **Peng Xiao, David C. Yu, Wei Yan.** A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations. IEEE Trans. Power Syst. 2006;21;1: 153 — 159.

12. **Izudin Džafić, Rabih A. Jabr, Hans-Theo Neisius.** Transformer Modeling for Three-phase Distribution Network Analysis. IEEE Trans. Power Syst. 2015;30;5: 2604 — 2611.

13. **Qiong Wu, Saeed Jazebi, Francisco de Leon.** Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements. IEEE Trans. Magnetics. 2017;53;7:1 — 8.

14. **Bruskin D.E., Zorohovich A.E., Hvostov V.S.** Elektricheskie Mashiny. Ch. 1. M.: Vysshaya Shkola, 1979. (in Russian).

15. **Seleznev V.Yu., Sbitnev S.A., Shmelev V.E., Goryushin Yu.A.** Novyy Matrichnyy Metod Modelirovaniya

Rezhimov Magistral'nykh i Raspredelitel'nykh Elektricheskikh Setey po Trekhfaznym Skhemam Zameshcheniya. Intellektual'naya Elektroenergetika, Avtomatika, Vysokovol'tnoye Oborudovanie: Materialy XX Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. M., 2014.

Сведения об авторах

Шмелев Вячеслав Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Абрамченко Евгений Вячеславович — ведущий специалист отдела НИОКР и инноваций департамента технологического развития и инноваций ПАО «МРСК Северо-Запада», e-mail: evgenyabramchenko@icloud.com

Сбитнев Станислав Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электроэнергетики Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Information about authors

Shmelev Vyacheslav E. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electrical Engineering And Power Engineering Dept., Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

Abramchenko Evgeniy V. — Leading Specialist of R & D and Innovation Department of Technological Development and Innovation Department of PJSC «IDGC of the North-West», e-mail: evgenyabramchenko@icloud.com

Sbitnev Stanislav A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Engineering And Power Engineering Dept., Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

Статья поступила в редакцию 28.06.2017