

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

### РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА РАБОТУ УСТРОЙСТВА В ПРОИЗВОЛЬНЫХ РЕЖИМАХ<sup>1</sup>

А.И. ТИХОНОВ<sup>1</sup>, А.В. СТУЛОВ<sup>2</sup>, А.А. КАРЖЕВИН<sup>1</sup>, А.В. ПОДОБНЫЙ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация<sup>2</sup>ООО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск, Российская Федерация  
E-mail: aitispu@mail.ru, drusja95@gmail.com, aleksandr.rash@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В настоящее время при проектировании силовых трансформаторов в целях учета влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства, особенно в переходных режимах, все чаще используются пакеты инженерного анализа на основе полевых моделей. Однако такие модели обладают малым быстродействием. В то же время динамические модели трансформатора на основе модели магнитной цепи мало уступают по точности полевым моделям. Существующие цепные модели трехфазного трансформатора либо не учитывают несимметрию магнитной системы, либо плохо интегрируются с имитационными пакетами. В связи с этим необходима разработка динамической модели трехфазного трансформатора, позволяющей учесть на этапе проектирования особенности его конструкции, в частности несимметрию магнитной системы, и влияние этих особенностей на произвольные режимы работы устройства.

**Материалы и методы.** Для расчета нелинейной магнитной цепи трехстержневого трансформатора использован метод контурных токов. Для расчета электрической цепи использован одношаговый метод на основе модифицированной формулы Розенброка 2-го порядка.

**Результаты.** Разработана основанная на использовании управляемых источников тока и ЭДС нелинейная динамическая модель трехфазного трехстержневого трансформатора, способная интегрироваться с имитационными пакетами, в том числе MatLab Simulink SimPowerSystem. Особенность модели состоит в возможности учета влияния несимметрии магнитной системы на работу трансформатора в различных режимах работы, в том числе аварийных и несимметричных. Новизна модели состоит в приведенном подходе к построению нелинейной матрицы магнитных сопротивлений без использования в явном виде матриц индуктивностей, что повышает точность и устойчивость работы модели с учетом несимметрии магнитной системы. Приведены кривые переходных процессов в характерных режимах работы трансформатора.

**Выводы.** Разработанные модели могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов, в том числе специальных, повышая точность поверочного расчета и выводя его на уровень имитационного моделирования, а также для построения цифровых двойников силовых трансформа-

<sup>1</sup> Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 18-43-370012 от 09.06.2018.

торов, позволяя учитывать влияние на работу энергосетей особенностей конструкции трансформаторного оборудования.

**Ключевые слова:** динамическая модель трехфазного трансформатора, модель магнитной цепи, имитационное моделирование трансформаторов

## DEVELOPMENT OF A NONLINEAR MODEL OF A THREE-PHASE TRANSFORMER TO STUDY THE EFFECT OF ASYMMETRY OF THE MAGNETIC SYSTEM ON THE OPERATION OF THE DEVICE IN ARBITRARY MODES

A.I. TIKHONOV<sup>1</sup>, A.V. STULOV<sup>2</sup>, A.A. KARZHEVIN<sup>1</sup>, A.V. PODOBNY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup>Transformer, Moscow Region, Podolsk, Russian Federation

E-mail: aitispu@mail.ru, drusja95@gmail.com, aleksandr.rash@mail.ru, crus943@gmail.com

### Abstract

**Background.** Currently, when designing power transformers in order to take into account the influence of the asymmetry of the magnetic system on the operation of the device, especially in transition modes, engineering analysis packages based on field models are increasingly being used. However, such models are slow. At the same time, dynamic transformer models based on the magnetic circuit model are not inferior in accuracy to field models. Existing chain models of a three-phase transformer either do not take into account the asymmetry of the magnetic system or poorly integrate with simulation packages. The purpose of this article is to develop a dynamic model of a three-phase transformer which would allow considering the design features at the design stage, in particular, the asymmetry of the magnetic system and the influence of these features on arbitrary modes of the device operation.

**Materials and methods.** A contour current method was used to calculate a non-linear magnetic circuit of a three-rod transformer, and a single-step method based on a modified 2nd order Rosenbrock formula was used to calculate the electrical circuit.

**Results.** A nonlinear dynamic model of a three-phase three-core transformer based on the use of controlled current sources and EMF has been developed. This model is able to integrate with simulation packages including MatLab Simulink SimPowerSystem. The model allows taking into account the influence of the asymmetry of the magnetic system on the transformer operation in various operating modes including emergency and asymmetric ones. The novelty of the developed model can be seen in the approach to constructing a nonlinear matrix of magnetic resistances without explicitly using inductance matrices, which increases the accuracy and stability of the model considering the asymmetry of the magnetic system. The curves of transients in the characteristic operating modes of the transformer are given.

**Conclusions.** The developed models can be used in the design of power transformers, including specific ones. They enable to increase the accuracy of the verification calculation and bring it to the level of simulation modeling. These models can also be applied for constructing digital twins of power transformers taking into account the influence of the design features of transformer equipment on the operation of power grids.

**Key words:** dynamic model of a three-phase transformer, magnetic circuit model, simulation of transformers

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.1.022-031

**Введение.** Одной из характерных особенностей современного трансформаторостроения является преобладание в нем мелкосерийного или даже штучного производства. Для того чтобы выдержать конкурентный прессинг, предприятия зачастую вынуждены брать заказы на изготовление специальных трансформаторов, не имея достаточного опыта их проектирования и производства. В то же время проведение НИОКР с изготовлением и исследованием опытных образцов продукции зача-

стую оказывается невозможным как по срокам, так и по затратам. Вопрос о приобретении соответствующих руководящих документов (РД) упирается либо в проблему их отсутствия (в случае новых разработок, которые не были отражены в РД советских времен), либо в проблему коммерческой тайны со стороны тех предприятий, на которых подобные проблемы уже решены или где еще сохранились опытные кадры. То есть квалифицированную консультацию получить практически невозможно.

В этих условиях растет роль математических моделей, позволяющих не только рассчитать характеристики проектируемого устройства произвольной конструкции, но и симулировать его работу, в том числе, в произвольных режимах и на произвольную нагрузку.

Следует отметить, что современные технологии автоматизированного проектирования предлагают проектировщикам эффективные средства инженерного анализа, позволяющие решить практически все типовые задачи по расчету трансформаторов. Можно вспомнить, в частности, такие пакеты, как ANSYS Maxwell [1, 2], COMSOL Multiphysics [3], ELCUT [4, 5]. Здесь задача имитации работы трансформатора решается в полевой постановке, в том числе, в комбинации с моделью внешней электрической цепи. Однако время расчета нестационарного поля оказывается настолько большим, что имитационными назвать такие модели очень сложно.

В то же время, согласно [6], достаточно точный результат, не уступающий полевым моделям, можно получить и с использованием цепных моделей, особенно если в них с помощью обоснованных коэффициентов учтены некоторые технологические особенности реальных устройств, которые затруднительно учесть в идеализированных полевых моделях. В наибольшей мере этому утверждению удовлетворяют именно цепные модели трансформаторов.

Цепные модели в настоящее время обладают таким быстродействием, которое позволяет осуществлять исследования динамических режимов сложных систем в режиме имитации эксперимента. Это в свою очередь позволяет выявить особенности работы исследуемых систем как в установившихся режимах, так и в динамических и аварийных режимах.

Наибольшее распространение для решения подобных задач получил имитационный пакет MatLab Simulink. В частности, внедренная в него библиотека SimPowerSystem предлагает проектировщикам целый набор трансформаторов, в том числе многообмоточных и нелинейных [7].

Однако в этих моделях не учтен факт несимметрии магнитной системы относительно разных фаз. Специальные трансформаторы, например преобразователь-

ные, в данной системе также не представлены. Поэтому актуальной является задача разработки открытой для развития модели трехфазного трансформатора, способной интегрироваться с современными имитационными пакетами, позволяя охватить специальные трансформаторы, в том числе преобразовательные.

Подобная задача решалась разными разработчиками по-разному. Обычно [8] математическая модель трансформатора представляется системой уравнений

$$\{u\} = [R]\{i\} + [L]\frac{d}{dt}\{i\}, \quad (1)$$

где  $\{u\}$  – вектор мгновенных напряжений на обмотках;  $[R]$  – диагональная матрица сопротивлений;  $\{i\}$  – вектор мгновенных токов;  $[L]$  – квадратная матрица нелинейных индуктивностей.

Однако в [9], например, модель трехфазного трансформатора предлагается строить на основе уравнений обобщенной электрической машины [6] в трехфазных заторможенных координатах.

В [10] матрица индуктивностей напрямую не рассчитывается и расчет модели электрической цепи совмещен с расчетом разветвленной схемы замещения магнитной цепи, представленной нелинейными и линейными магнитными сопротивлениями и учитывающей сложный характер потоков рассеяния.

В [11] модель трансформатора реализована с использованием нелинейных индуктивностей, поставляемых библиотекой SimPowerSystem, что позволило интегрировать данную схему во внешние цепи без согласования данных цепей.

В [12] на примере однофазного трансформатора предлагается вообще отказаться от операции вычисления индуктивностей и интегрирование по времени осуществлять непосредственно по кривой намагничивания, заданной в форме  $i_0(\Phi)$ , где  $i_0$  – ток намагничивания;  $\Phi$  – основной магнитный поток. Это избавляет от погрешностей, связанных с операциями дифференцирования при вычислении нелинейных индуктивностей.

Аналогичный подход реализован и в [13], но уже с использованием схемы с управляемыми источниками тока и ЭДС, что обеспечивает данной схеме математическую автономность и позволяет подключать к ней сложные электрические цепи, не

заботясь при этом о согласовании этих цепей со схемой трансформатора.

Данный подход хорошо оправдал себя при моделировании однофазного трансформатора. Целью предлагаемого исследования является распространение данного подхода на случай трехфазных трансформаторов.

**Методы исследования.** Модель однофазного трансформатора, представленная в [13], строится на базе идеального трансформатора с управляемыми источниками тока и напряжения (рис. 1).

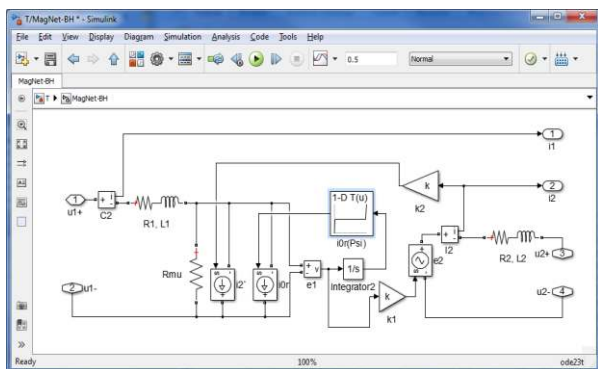


Рис. 1. Модель реального однофазного нелинейного трансформатора на основе кривой  $i_{0r}(\Psi_1)$

Кривая намагничивания трансформатора вида  $\Psi_1(i_{0r})$  может быть построена как с помощью модели магнитной цепи, так и с помощью конечно-элементной модели магнитного поля. Затем она преобразуется к виду  $i_{0r}(\Psi_1)$ , где  $i_{0r}$  – реактивная составляющая тока намагничивания первичной обмотки;  $\Psi_1$  – потокосцепление первичной обмотки.

Простейшая модель трехфазного трансформатора может быть построена в виде трансформаторной группы из трех однофазных трансформаторов, как это реализовано в моделях MatLab Simulink SimPowerSystem. Такая модель нечувствительна к несимметрии токов холостого хода в трех фазных обмотках, расположенных на разных стержнях. Поэтому задача моделирования трехфазного трансформатора остается актуальной и единый подход здесь, как в случае однофазного трансформатора, выработать пока не удалось.

Дело в том, что для построения модели трехфазного трансформатора с трехстержневой магнитной системой, анало-

гичной модели на рис. 1, необходимо иметь три зависимости:

$$i_{0rk}(\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3) \Big|_{k=1,2,3}, \quad (2)$$

где индекс  $k$  соответствует номерам первичных обмоток трех фаз.

С помощью полевых моделей удастся построить только обратные зависимости:

$$\Psi_k(i_{0rk1}, i_{0rk2}, i_{0rk3}) \Big|_{k=1,2,3}. \quad (3)$$

Для этого необходимо реализовать серию расчетов магнитного поля при варьировании намагничивающих токов во всем диапазоне возможных значений.

Преобразование (3) в (2) является сложной задачей, решение которой может привести к дополнительным погрешностям.

Поэтому приходится возвратиться к модели трансформатора, построенной на основе (1), которая требует расчета матриц индуктивности. Для этого, например, в [14] с помощью серии расчетов магнитного поля предлагается построить матрицы

$$L_{kj}(F_1, F_2, F_3) = W_j \frac{\partial \Psi_k(F_1, F_2, F_3)}{\partial F_m} \Big|_{\substack{k=1..6; j=1..6 \\ m=k, \text{ при } k \leq 3 \\ m=k-3, \text{ при } k > 3}}. \quad (4)$$

Матрица [L] имеет размер 6×6 по числу обмоток трансформатора.

Для реализации модели с использованием управляемых источников тока и ЭДС данный подход необходимо адаптировать к зависимостям потокосцеплений от намагничивающих токов. При этом намагничивающие токи в каждой фазе могут быть вычислены по формуле

$$\{i_{0r}\} = [L_{\mu}]^{-1} \{e\}, \quad (5)$$

где {e} – вектор ЭДС в трех первичных обмотках;  $[L_{\mu}]$  – квадратная матрица нелинейных индуктивностей ветви намагничивания размера 3×3, элементы которой вычисляются по формуле [13]

$$L_{\mu kj} = \frac{\partial \Psi_k \{i_{0r}\}}{\partial i_{0rj}} \approx \frac{\Delta \Psi_k \{i_{0r}\}}{\Delta i_{0rj}} \Big|_{\mu=const}, \quad (6)$$

где  $\Delta \Psi_k \{i_{0r}\} \Big|_{\mu=const}$  – приращение потокосцепления  $k$ -й обмотки, вычисленное при заданных мгновенных значениях намагничивающих токов в первичных обмотках при условии, что магнитная проницаемость  $\mu$  всех элементов конечно-элементной сетки в окрестности вектора  $\{i_{0r}\}$  остается неизменной.

Быстродействие такой модели выше, чем в случае шестимерной матрицы индуктивностей, рассчитываемой по (4).

Недостаток данного подхода состоит в том, что расчет взаимных индуктивностей по формулам частных производных от потокосцеплений вносит дополнительную погрешность в решение уравнений динамики трансформатора. При этом в случае трехфазного трехстержневого трансформатора, ввиду существенного влияния обмоток друг на друга, матрица индуктивностей оказывается близкой к сингулярной. Поэтому погрешности, вносимые дифференцированием, делают динамическую модель трансформатора очень нестабильной.

Выход может быть найден на пути отказа от полевых моделей при разработке динамической модели трансформатора.

Дело в том, что, как показано в [15], расчеты магнитного поля, например, трансформатора ТМГ-1000-10/0,4 на 3D-модели и на 2D-модели дают расхождения в значениях магнитных потоков в магнитопроводе и потокосцеплений обмоток, не превышающие 2,5 %, что вызвано очень малыми потоками рассеяния, которые на 2–3 порядка меньше основного потока. При этом расхождения в значениях потоков рассеяния, полученные в 3D- и 2D-модели, составили 97 %. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) невозможно определенно сказать, какая модель (3D или 2D) дает более точный результат при расчете потоков рассеяния (3D-модель учитывает пространственную конструкцию магнитной системы, но, как правило, строится на более грубой сетке, чем 2D-модель);

2) нельзя рассчитывать основной поток и поле рассеяния на одной полевой модели, так как результаты расчета поля рассеяния уходят в область погрешности метода конечных элементов;

3) в модели переходных режимов трансформатора, построенной на основе модели магнитного поля, индуктивность поля рассеяния должна учитываться как самостоятельная величина, полученная не на основе текущего расчета магнитного поля, а какими-то сторонними методами.

В числе прочего, это говорит и о том, что модель трансформатора, построенная на основе магнитной цепи, может дать ре-

зультаты, мало отличающиеся по точности от результатов, полученных на полевых моделях.

Дело в том, что магнитное поле в элементах магнитопровода оказывается практически однородным, особенно при использовании анизотропной электротехнической стали, что позволяет представить магнитопровод совокупностью нелинейных магнитных сопротивлений. А поле рассеяния, как было отмечено, все равно приходится учитывать особым образом с использованием понятия индуктивности рассеяния, которая является константой и может быть вычислена за пределами цикла имитации режимов работы трансформатора.

Магнитная цепь трансформатора без учета потоков рассеяния показана на рис. 2.

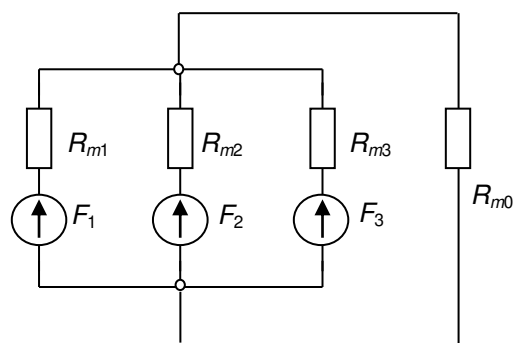


Рис. 2. Магнитная цепь трансформатора

Магнитные сопротивления ветвей схемы замещения рассчитываются по формулам:

$$R_{mk} = \nu(B_k) \frac{1}{S} \begin{cases} \ell_s + 2\ell_a & \text{при } k = 1, 3 \\ \ell_s & \text{при } k = 2 \end{cases} + \frac{\delta}{2\sqrt{2} \cdot \mu_0 S}; \quad (7)$$

$$R_{m0} = \frac{\ell_0}{\mu_0 S_0}; \quad (8)$$

$$F_k = i_{0kr} W_1, \quad (9)$$

где  $k$  – номер стержня;  $R_{mk}$  – магнитное сопротивление  $k$ -й ветви магнитной цепи, соответствующей  $k$ -му стержню;  $\nu(B)$  – зависимость удельного магнитного сопротивления стали от индукции;  $\ell_s, \ell_a$  – длина средней линии магнитного поля в стержне и в примыкающем к нему участке ярма;  $S$  – активное сечение стержня и ярма;  $\delta$  – расчетное значение технологического зазора между стержнем и ярмом;  $R_{m0}$  – магнитное сопротивление нулевой последовательности;  $\ell_0, S_0$  – длина средней линии и сечение магнитного поля нулевой последователь-

ности;  $F_k$  – намагничивающая сила первичной обмотки на  $k$ -м стержне;  $W_1$  – число витков в первичной обмотке.

Система уравнений для данной магнитной цепи по методу контурных токов имеет вид

$$\begin{Bmatrix} i_{0r1} \\ i_{0r2} \\ i_{0r3} \end{Bmatrix} = \frac{1}{W_1} \begin{bmatrix} R_{m1} + R_{m0} & R_{m0} & R_{m0} \\ R_{m0} & R_{m2} + R_{m0} & R_{m0} \\ R_{m0} & R_{m0} & R_{m3} + R_{m0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix}. \quad (10)$$

Система уравнений (10) позволяет построить модель трехфазного трансформатора в виде, представленном на рис. 3.

Данная модель состоит из трех моделей однофазного трансформатора вида рис. 1. Однако это не является трансформаторной группой, так как намагничивающие токи фаз рассчитываются с учетом взаимного влияния магнитных полей трех фаз, осуществляемого через единую магнитную систему.

Для расчета намагничивающих токов измеренные с помощью датчиков  $eA$ ,  $eB$  и  $eC$  напряжения на ветвях намагничивания объединяются в единый вектор

$$\{u_m\} = \frac{d}{dt} \{\Psi\}, \quad (11)$$

который подается на интегратор  $1/s$ , на выходе которого формируется вектор пото-

косцеплений первичных обмоток трансформатора  $\{\Psi\}$ .

Далее вычисляется вектор магнитных потоков в ветвях магнитной цепи

$$\{\Phi\} = \frac{1}{W_1} \{\Psi\} \quad (12)$$

и вектор значений магнитной индукции

$$\{B\} = \frac{1}{S} \{\Phi\}, \quad (13)$$

который подается на табличную функцию кривой намагничивания, заданную в форме  $v(B)$ .

После этого по (7) вычисляются магнитные сопротивления ветвей магнитной цепи, из которых формируется матрица магнитных сопротивлений, которая, в соответствии с (10), умножается на вектор магнитных потоков. Полученные таким образом значения намагничивающих токов подаются на соответствующие управляемые источники тока в ветвях намагничивания фаз трансформатора.

Во всем остальном схема каждой фазы на рис. 3 не отличается от схемы на рис. 1. Данная схема оформлена в виде блока подсистемы MatLab Simulink SimPowerSystem. Схема включения данного блока модели трансформатора в сеть при соединении обмоток  $\Delta/Y$  показана на рис. 4.

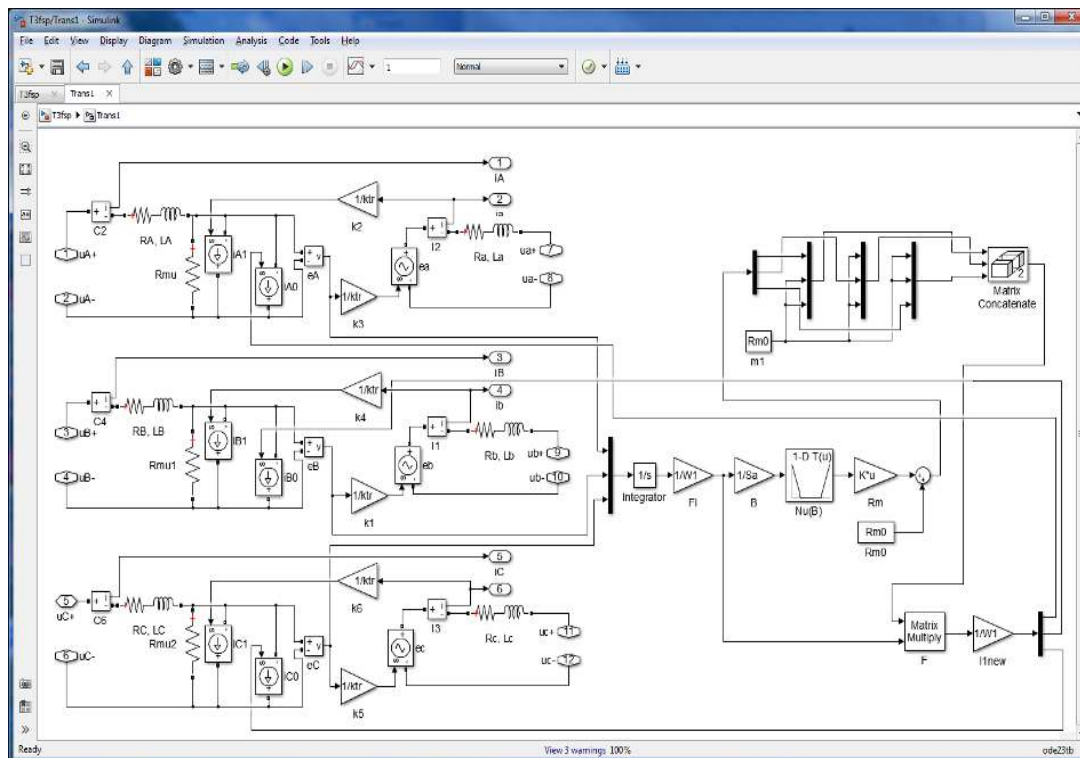


Рис. 3. Динамическая модель трехфазного трансформатора в MatLab Simulink SimPowerSystem

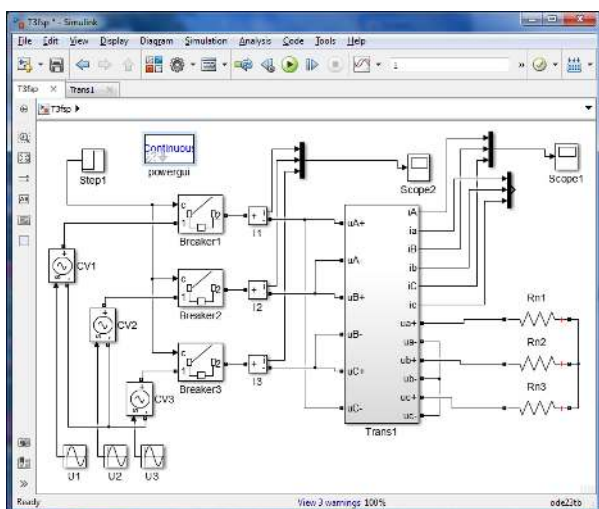


Рис. 4. Схема включения блока модели трансформатора в сеть в MatLab Simulink SimPowerSystem

**Результаты исследований.** Результаты расчета переходных режимов в трансформаторе с помощью разработанной модели приведены на рис. 5–10.

Расчет модели при включении трансформатора на нагрузку (рис. 5, 6) обычно не вызывает особых проблем в плане устойчивости расчетного процесса.

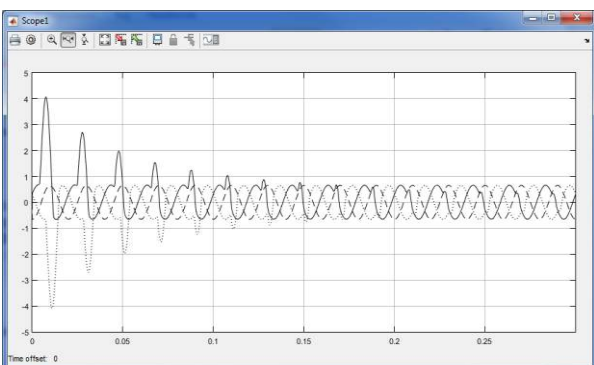


Рис. 5. Кривые фазных токов в первичной обмотке при включении на нагрузку

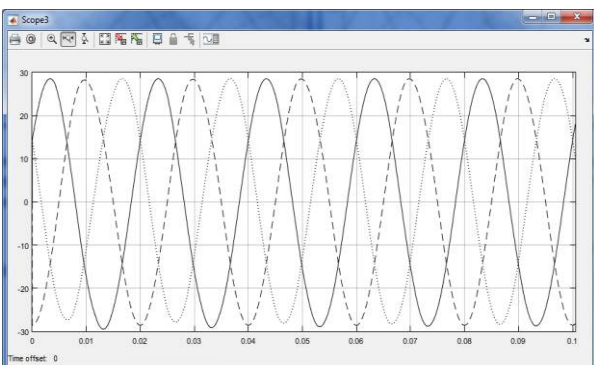


Рис. 6. Кривые фазных токов во вторичной обмотке при включении на нагрузку

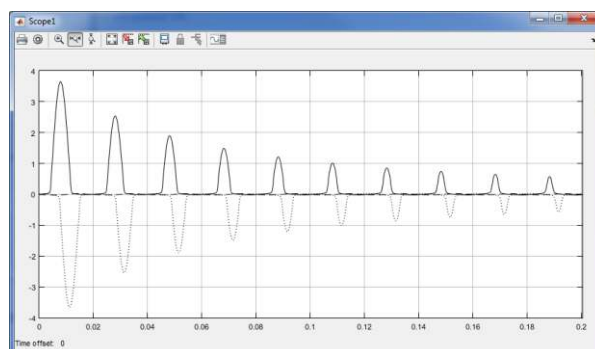


Рис. 7. Кривые фазных токов в первичной обмотке при включении на ХХ

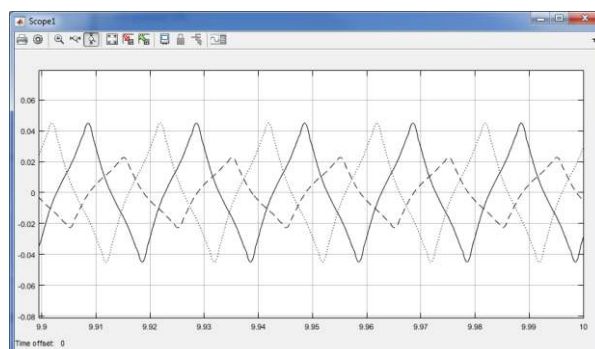


Рис. 8. Установившиеся фазные токи ХХ



Рис. 9. Кривые линейных токов в первичной обмотке при включении на ХХ

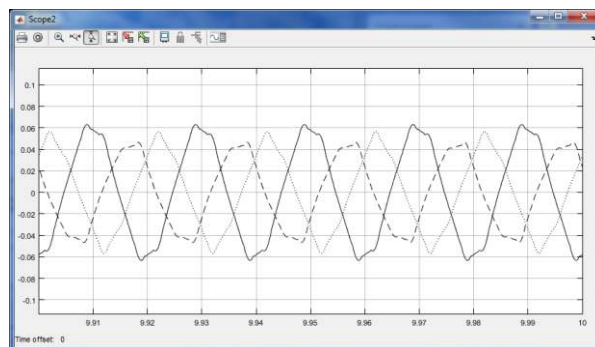


Рис. 10. Установившиеся линейные токи ХХ

Обычно проблемы возникают при расчете режима холостого хода (ХХ), осо-

бенно если трансформатор выполнен с насыщенной магнитной системой. Именно в этом случае наблюдаются существенные броски тока при включении на ХХ (рис. 7, 9), а установившийся ток ХХ несинусоидален (рис. 8, 10).

Разработанная модель трансформатора не зависит от того, по какой схеме включены обмотки. В частности, на рис. 9, 10 приведены кривые линейных первичных токов, которые отличаются по форме от фазных (рис. 7, 8).

Разработанная модель может имитировать работу трансформатора в различных режимах, в том числе несимметричных и аварийных. Например, на рис. 11, 12 приведены кривые токов в первичных обмотках трансформатора при включении на различные короткие замыкания (КЗ). Даже если сам трансформатор является несимметричным (различные магнитные сопротивления в ветвях магнитной цепи), то это также отразится в кривых переходных процессов.

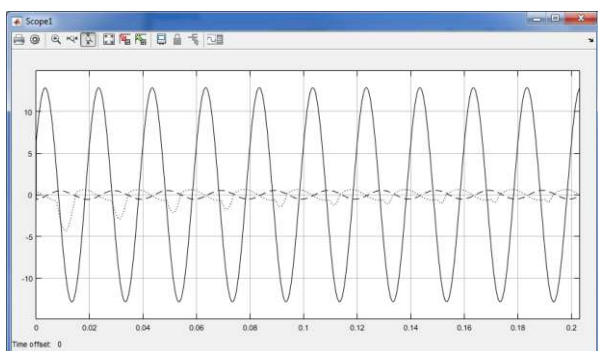


Рис. 11. Ток в первичной обмотке при включении на КЗ в фазе А

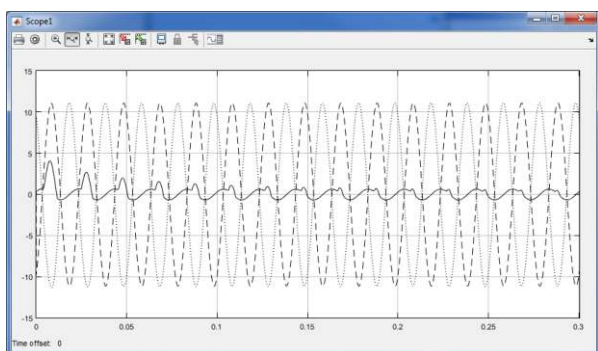


Рис. 12. Ток в первичной обмотке при включении на КЗ между фазами В и С

Следует отметить также, что, в отличие от моделей, построенных на основе матриц индуктивностей, разработанная

модель ведет себя более устойчиво. Отсутствие операции обращения матрицы индуктивностей приводит к тому, что скорость расчета оказывается достаточно высокой.

**Выводы.** Разработанная нелинейная модель трехфазного трехстержневого трансформатора позволяет учитывать взаимное влияние друг на друга обмоток, расположенных на разных стержнях магнитной системы. Данная модель не требует вычисления и обращения матриц индуктивности, что уменьшает погрешность и время расчета, а также повышает устойчивость расчетного процесса.

Данная модель позволяет рассчитывать различные режимы работы трансформатора, том числе несимметричные. Модель учитывает также несимметрию самого трансформатора. Поэтому предполагается использовать ее в качестве прототипа для разработки моделей специальных трансформаторов, в том числе преобразовательных. Разработанные модели могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов, в том числе специальных, повышая точность поверочного расчета и выводя его на уровень имитационного моделирования, а также для построения цифровых двойников силовых трансформаторов, позволяя учитывать влияние на работу энергосетей особенностей конструкции трансформаторного оборудования.

#### Список литературы

1. **Калявин А.** Моделируем электромагнитное поле в обновленном ANSYS16 // САПР и графика. – 2015. – № 3. – URL: <https://sapr.ru/article/24825>
2. **Междисциплинарный** расчет трехфазного трансформатора // ANSYS. Всестороннее инженерное моделирование нового поколения. – URL: <https://cae-expert.ru/projects/mezhdisciplinarnyy-raschyot-trehfaznogo-transformatora>
3. **Математическая** модель трансформатора при его диагностике коротким импульсом / Ю.Н. Исаев, В.А. Колчанова, Г.А. Елгина, А.В. Лавринович // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://science-ducation.ru/ru/article/view?id=10526>
4. **Дубицкий С., Поднос В.** ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей // CADmaster. – 2001. – № 1. – С. 17–21. – URL: <http://www.cadmaster.ru/maga->



zin/articles/cm\_06\_elcut\_for\_2d\_physical\_field\_simulation.html

5. Куртыгин Д.А., Птицына Е.В., Сивявский М.Л. Моделирование в программной среде ELCUT трансформаторов тока нулевой последовательности // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2016. – № 2. – С. 105–110.

6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1994. – 318 с.

7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

8. Martinez J.A., Mork V.A. Transformer modeling for low- and mid-frequency transients – A review // *IEEE Trans. Power Del.* – 2005. – № 2.

9. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора // *Известия Томского политехнического университета. Энергетика*. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 97–100.

10. Евдокунин Г., Дмитриев М. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы // *Новости электротехники*. – 2008. – № 5(53). – С. 2–7.

11. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.

12. Мартынов В.А., Голубев А.Н., Евдаков А.Е. Анализ динамических режимов работы трехфазных трехстержневых трансформаторов в пакете MATLAB // *Вестник ИГЭУ*. – 2016. – Вып. 4. – С. 11–18.

13. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали / А.И. Тихонов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный, Д.Е. Дрязгов // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – Вып. 2. – С. 43–51.

14. Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н. Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // *Вестник ИГЭУ*. – 2014. – Вып. 1. – С. 55–61.

15. Тихонов А.И., Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов // *Вестник ИГЭУ*. – 2015. – Вып. 3. – С. 38–43.

## References

1. Kalyavin, A. Modeliruem elektromagnitnoe pole v obnovlennom ANSYS1 [Modelling of the electromagnetic field in the updated ANSYS16]. *SAPR i grafika*, 2015, no. 3. Available at: <https://sapr.ru/article/24825>

2. Mezhdistsiplinarnyy raschet trekhfaznogo transformatora [Interdisciplinary calculation of a three-phase transformer]. *ANSYS. Vsestoronnee inzhenernoe modelirovanie novogo pokoleniya* [ANSYS. Comprehensive engineering modelling of the new generation]. Available at: <https://cae-expert.ru/projects/mezhdistsiplinarnyy-raschyot-trehfaznogo-transformatora>

3. Isaev, Yu.N., Kolchanova, V.A., Elgina, G.A., Lavrinovich, A.V. Matematicheskaya model' transformatora pri ego diagnostike korotkim impul'som [The mathematical model of the transformer in its diagnosis with a short pulse]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=10526>

4. Dubitskiy, S., Podnos, V. ELCUT – inzhenernaya sistema modelirovaniya dvukhmernykh fizicheskikh poley [ELCUT – engineering system for modelling two-dimensional physical fields]. *CAD-master*, 2001, no.1, pp. 17–21. Available at: [http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_06\\_elcut\\_for\\_2d\\_physical\\_field\\_simulation.html](http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_06_elcut_for_2d_physical_field_simulation.html)

5. Kurtygin, D.A., Ptitsyna, E.V., Sinyavskiy, M.L. Modelirovanie v programmnoy srede ELCUT transformatorov toka nulevoy posledovatel'nosti [Modelling in the ELCUT software environment of zero-sequence current transformers]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2016, no. 2, pp. 105–110.

6. Kopylov, I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modelling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1994. 318 p.

7. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DМК Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

8. Martinez, J.A., Mork, V.A. Transformer modeling for low- and mid-frequency transients – A review. *IEEE Trans. Power Del.*, 2005, no. 2.

9. Pustovetov, M.Yu. Matematicheskaya model' trekhfaznogo transformatora [Mathematical model of a three-phase transformer]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Energetika*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 97–100.

10. Evdokunin, G., Dmitriev, M. Transformatory v elektricheskoy seti. Modelirovanie perekhodnykh protsessov s uchedom konfiguratsii magnitnoy sistemy [Transformers in the electrical network. Simulation of transients considering the configuration of the magnetic system]. *Novosti elektrotekhniki*, 2008, no. 5(53), pp. 2–7.

11. Neyman, L.A., Neyman, V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeystviy i nizkочастотных vibratsiy [Modelling of dynamic processes in electromagnetic energy converters for power generation systems and low-frequency vibrations].

*Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

12. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Evdakov, A.E. Analiz dinamiceskikh rezhimov raboty trekhfaznykh trekhsterzhnykh transformatorov v pakete MATLAB [Analysis of the dynamic modes of operation of three-phase three-rod transformers in the MATLAB package]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 11–18.

13. Tikhonov, A.I., Karzhevin, A.A., Podobnyy, A.V., Dryazgov, D.E. Razrabotka i issledovanie dinamicheskoy modeli odnofaznogo transformatora s serdechnikom iz amorfnoy stali [Development and research of a dynamic model of a

single-phase transformer with a core of amorphous steel]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 43–51.

14. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Methods of organizing a numerical study of electrical devices using the library of finite element modelling of the magnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 55–61.

15. Tikhonov, A.I., Paykov, I.A. Analiz modeley dlya elektromagnitnogo rascheta silovykh transformatorov [Analysis of models for electromagnetic calculation of power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 3, pp. 38–43.

---

*Тихонов Андрей Ильич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики, e-mail: aitispu@mail.ru

*Tikhonov Andrey Ilyich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Post-doctoral degree), Head of the Physics Department, e-mail: aitispu@mail.ru

*Стулов Алексей Вадимович,*

ООО «Трансформер», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по техническому развитию, e-mail: alxstl@mail.ru

*Stulov Alexey Vadimovich,*

Transformer LLC, Candidate of Engineering (PhD), Deputy CEO for Technical Development, e-mail: alxstl@mail.ru

*Каржевин Андрей Александрович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, e-mail: drusja95@gmail.com

*Karzhevin Andrey Aleksandrovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: drusja95@gmail.com

*Подобный Александр Викторович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

*Podobny Aleksandr Viktorovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

УДК 621.3.07

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Т.Х. АБУЗЯРОВ, А.С. ПЛЕХОВ, А.Б. ДАРЬЕНКОВ, А.И. ЕРМОЛАЕВ

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: atx888@yandex.ru

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** При проектировании электроприводов на основе бесколлекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами, обладающих пониженным размахом пульсаций электромагнитного момента, возникает задача имитационного исследования новых нестандартных решений. Известные модели бесколлекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами либо основаны на до-