

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЦЕПНЫХ МОДЕЛЕЙ И 2D-МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

¹А.И. Тихонов, ²А.В. Стулов, ¹И.В. Еремин, ¹И.С. Снитко, ¹А.В. Подобный, ¹А.А. Каржевин, ¹А.В. Плаксин

¹ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново
²ООО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск

Актуальность работы связана с одним из приоритетов государственной политики, связанным с цифровизацией экономики, в частности, с разработкой технологий цифровых двойников, позволяющих моделировать работу технических устройств с точностью 95% и выше. Объектом исследования статьи является силовой трансформатор, являющийся одним из основных звеньев всех энергосистем.

В работе были использованы методы теории нелинейных электрических и магнитных цепей, а также конечно-элементные модели магнитного поля. Для программной реализации разрабатываемой технологии использован табличный процессор MS Excel, библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib (авторская разработка), приложение MatLab Simulink SmPowerSystem.

Приведены результаты разработки модели произвольных режимов работы силового трансформатора, которая может быть положена в основу цифрового двойника конкретного устройства. Модель совмещает в себе высокую точность расчетов с высокой скоростью вычислений, позволяющей использовать ее для исследований работы силового трансформатора в режиме имитации эксперимента в реальном времени. Модель строится на основе нелинейной магнитной цепи. Индуктивности рассеяния обмоток и магнитное сопротивление поля нулевой последовательности рассчитываются на основе расчета магнитного поля в 2D-постановке. В качестве результатов моделирования приведены кривые изменения токов в фазах трансформатора. Модель легко настраивается под особенности конструкции конкретного трансформатора. Разработана плата контроллера, с помощью которой можно калибровать модель под реальный трансформатор.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов и при их эксплуатации для имитации их работы в различных режимах, в том числе несимметричных и аварийных.

Разрабатываемая технология ориентирована в первую очередь на сферу малого и среднего бизнеса. Она позволит существенно облегчить процесс принятия решений при проектировании и эксплуатации трансформаторов, особенно в условиях недостатка или отсутствия опытных кадров.

Ключевые слова: цифровой двойник, силовой трансформатор, моделирование электрической цепи, конечно-элементное моделирование магнитного поля, моделирование динамических режимов работы трансформаторов.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Национальной технологической инициативой (НТИ), обозначенной в 2014 г. [1], одним из приоритетов государственной политики является цифровизация экономики. В плане ключевых научно-технических направлений развития цифровой экономики существенное значение уделяется созданию так называемых «цифровых двойников», под которыми понимаются виртуальные прототипы реально функционирующих устройств, позволяющие моделировать работу данных устройств с заявленной точностью 95% и выше. Как правило, в основе цифровых двойников лежат 3D-модели нестационарных физических полей, позволяющие симулировать физические процессы, происходящие в данных устройствах, в том числе при наличии таких особенностей конструкции, которые не отражены в традиционных инженерных методиках расчета. Это позволяет спрогнозировать поведение устройства как на стадии проектирования (например, при поиске

оптимального варианта конструкции), так и в процессе его эксплуатации (например, для оптимизации параметров системы, частью которого является данное устройство).

Так, в качестве основы для реализации технологии создания цифровых двойников позиционирует себя пакет ANSYS [2], являющийся признанным лидером технологий инженерного анализа на основе полевых расчетов. Большую популярность в России приобрел также пакет COMSOL Multiphysics [3]. Особенно интересные возможности открываются при комбинации полевых моделей с цепными, для реализации которых используются имитационные пакеты, среди которых в качестве лидера можно отметить приложение MatLab Simulink. В частности, для решения задач электротехники большую популярность у специалистов, занимающихся моделированием, получило приложение MatLab Simulink SimPowerSystems [5], позволяющее моделировать электрические цепи в режиме имитации эксперимента.

Одной из главных проблем, сдерживающих развитие технологии создания цифровых двойников в России, является проблема дороговизны перечисленных выше программных средств, что делает их практически недоступными, например, для производителей из сферы малого и среднего бизнеса. В то же время в 2000-х годах в России появилось значительное количество относительно небольших предприятий, специализирующихся на мелкосерийном или даже штучном производстве наукоемкой продукции. Такие предприятия появились и в трансформаторостроении.

Эти предприятия особенно нуждаются в технологиях создания цифровых двойников, как минимум, по трем причинам:

1. Штучное и мелкосерийное производство предполагает наличие широкого ассортимента продукции, за которые берется данное предприятие для выживания в условиях конкуренции даже при отсутствии должного опыта

2. Невозможность организации при проектировании детальной научно-исследовательской проработки новых технических решений, особенно если это требует создания опытных образцов продукции.

3. Зачастую данные предприятия испытывают дефицит опытных специалистов, способных на основании своего опыта отсеивать заведомо ошибочные решения.

Таким образом, проблема разработки доступной для малого и среднего бизнеса технологий создания цифровых двойников является актуальной.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Одной из особенностей силовых трансформаторов является то, что его функционирование определяется, главным образом, картиной магнитного поля. Считается, что ввиду специфики конструкции трансформатора данное поле должно рассчитываться в 3D-постановке, что сопряжено с большим временем расчета и дороговизной требуемых для этого программных продуктов. Тем не менее, в теории моделирования [5] отмечается, что одним из главных достоинством любой модели является ее относительная простота, достигаемая путем абстрагирования от несущественных факторов исследуемого явления. Согласно принципу множественности моделей, ни одна конкретная модель не в состоянии однозначно отразить все особенности и для их учета обычно строятся разные модели.

Концепция 3D-моделирования претендует на наибольшую широту охвата множества особенностей моделируемого устройства. Но как выясняется из проведенных исследований, это не совсем справедливо. Например, в силовых трансформаторах поле рассеяния оказывается на 3 – 4 порядка слабее

основного поля в магнитопроводе [6]. Это значит, что при относительно точном расчете магнитного поля в сердечнике, результаты расчета поля рассеяния, полученные в методе конечных элементов, попадают в область погрешности. Поэтому для расчета этих полей желательно использовать разные модели.

Так, выясняется [6], в частности, что поле в магнитопроводе с большой точностью может быть рассчитано на двухмерной плоскопараллельной модели (рис. 1) (приведенная толщина магнитопровода в третьем измерении принимается из условия равенства площади полученного условного прямоугольника площади активного сечения магнитопровода). Для расчета магнитного поля была использована библиотека EMLib, которая способна интегрироваться с математическими пакетами, имеющими встроенные системы программирования (Excel, MatLab, MathCAD и др. [7])

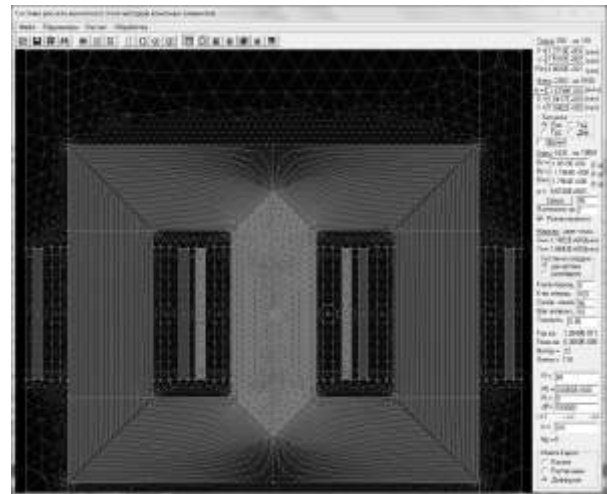


Рис. 1. Конечно-элементная модель для расчета основного магнитного поля

Для учета технологических зазоров в модели предусмотрены немагнитные вставки, толщина которых выбирается из условия достижения минимальной погрешности в методе конечных элементов (треугольные элементы должны быть по возможности равносторонними), а магнитная проницаемость выбирается таким образом, чтобы магнитное сопротивление немагнитной вставки равнялось магнитному сопротивлению расчетного зазора при выбранной схеме шихтовки магнитопровода (в условиях производства эта величина определяется по результатам опытных измерений и серии расчетов магнитного поля по методике, описанной в [8]).

Учитывая малую величину потока рассеяния достаточная для цифровых двойников точность расчета основного потока может быть получена даже при использовании цепной модели магнитной системы, представленной на рис. 2.

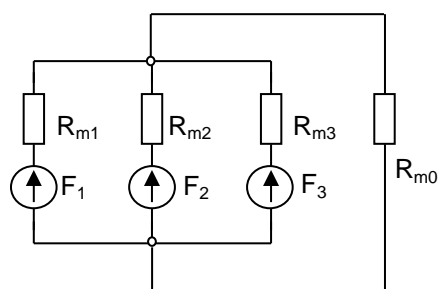


Рис. 2. Магнитная цепь трансформатора

Система уравнений по методу контурных токов в этом случае имеет вид

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

где R_{mk} – магнитные сопротивления ветвей; R_{m0} – магнитное сопротивление поля нулевой последовательности (рассчитывается при одинаковых мгновенных значениях намагничивающих токов во всех фазах первичной обмотки, см. рис. 3); F_k – магнитодвижущие силы обмоток.

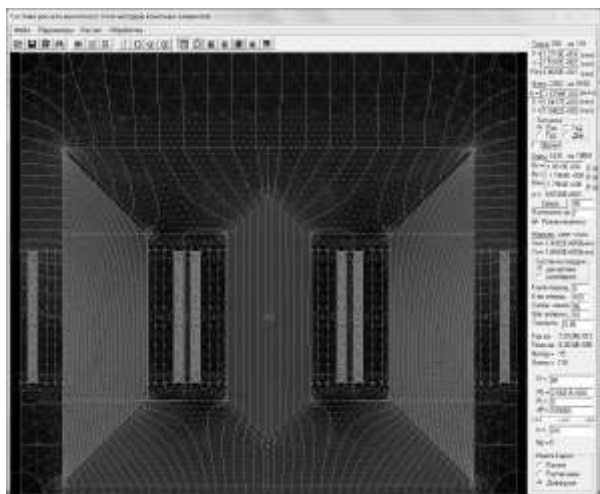


Рис. 3. Конечно-элементная модель для расчета магнитного сопротивления нулевой последовательности

Магнитные сопротивления ветвей зависят от величины магнитной индукции В:

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

где $\nu(B_k)$ – удельное магнитное сопротивление стали; B_k – магнитная индукция в k-й ветви; S – активное

сечение магнитной ветви по железу; δ – расчетное значение технологического зазора; ℓ_s, ℓ_a – длина средней линии стержня и ярма.

Для расчета индуктивности рассеяния обмоток модель на рис. 1 по обозначенным выше причинам оказывается неточной как 2D-, так и в 3D-постановке [6]. Для этих целей используется модель, имитирующая опыт короткого замыкания, представленная на рис. 4 в осесимметричной 2D-постановке с равными, но противоположно направленными намагничивающими силами обмоток.

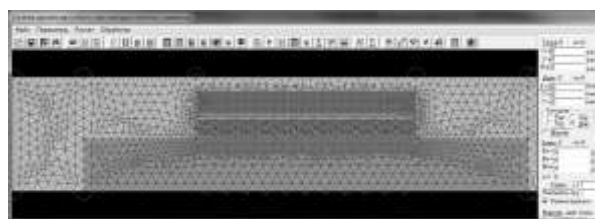


Рис. 4. Конечно-элементная модель для расчета магнитного поля рассеяния

Индуктивности рассеяния обмоток при этом рассчитываются по формуле

$$L_{\sigma k} = \frac{\Psi_{\sigma k} w_k}{F_k}, \quad (2)$$

где $\Psi_{\sigma k}$ – поокосцепление k-й обмотки, полученное из расчета; F_k – намагничивающая сила k-й обмотки; w_k – число витков в k-й обмотке.

В настоящее время ведется разработка программного комплекса, позволяющего учитывать влияние на индуктивности рассеяния фазных обмоток, установленных на соседних стержнях, а также влияние перекосов обмоток при их установке.

Для имитации работы трансформатора в произвольных режимах работы в MatLab Simulink SimPowerSystem была построена имитационная модель (рис. 5). Ядром данной модели является схема идеального однофазного трансформатора, построенная на управляемом источнике тока в первичной цепи и управляемом источнике ЭДС во вторичной ветви [9], дополненная элементами, учитывающими потери в железе (R_{mu}) и наличие магнитопровода с нелинейной характеристикой намагничивания. Магнитопровод представлен моделью магнитной цепи рис. 2 с учетом нелинейности магнитных сопротивлений по (2) и взаимного влияния магнитных потоков стержней по (1). Индуктивности рассеяния обмоток рассчитываются по (3).

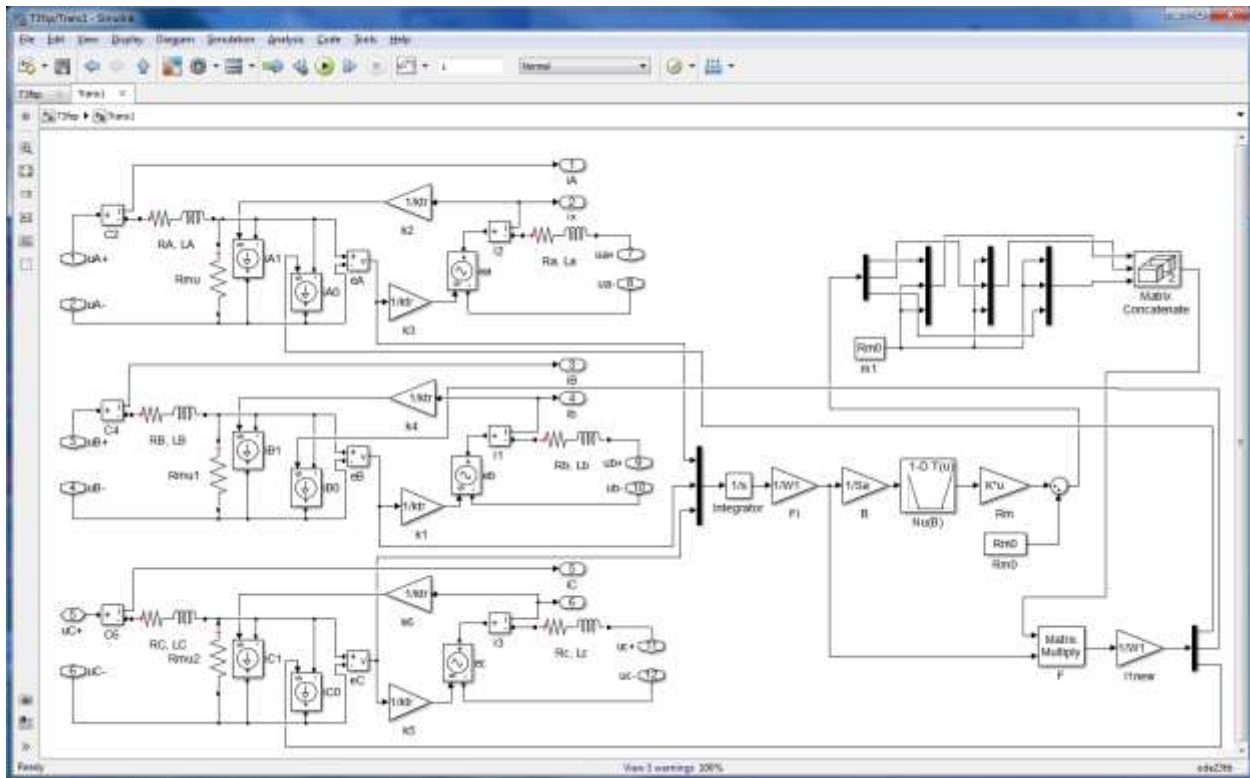


Рис. 5. Содержимое блока моделирования трехфазного трансформатора стержневой конструкции

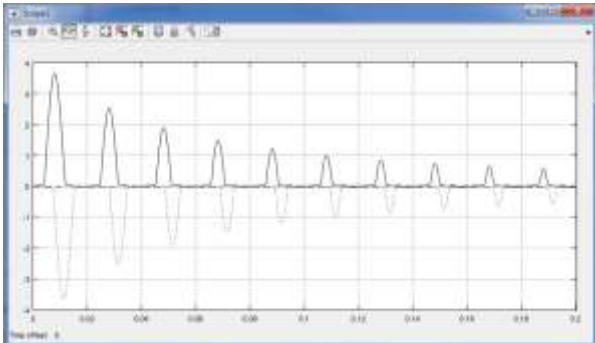


Рис. 6. Токи в первичной обмотке при включении трансформатора на XX

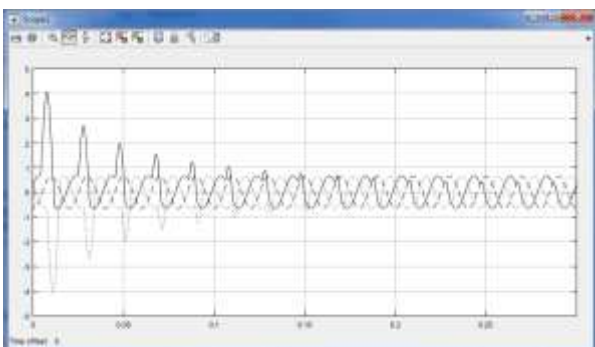


Рис. 7. Токи в первичной обмотке при включении трансформатора на нагрузку

Результаты расчета трансформатора при включении его на холостой ход (XX) представлены на рис. 6, при включении на нагрузку – на рис. 7.

Представленная модель легко настраивается под особенности конструкции конкретного трансформатора, что, собственно, и отличает цифровой двойник от других типов моделей.

Для этих целей на базе микроконтроллера STM32F730R8T6 была разработана плата сбора данных, которая на данный момент имеет следующие характеристики: 32bit, 216MHz, 276кВ ОЗУ, 12bit АЦП, 16 каналов АЦП.

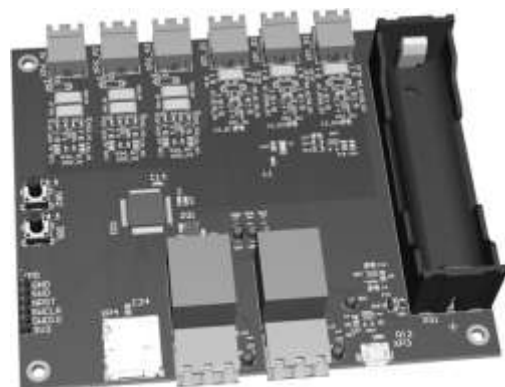


Рис. 8. Плата контроллера для сбора данных с реального трансформатора

Создан первый прототип на 6 измерительных каналов (рис. 8), получены данные при включении трансформатора на XX (время измерений – несколько десятков секунд, частота выборки – не менее 1000 точек за полупериод). Ведется разработка платы 13 измерительных каналов.

Использование полученных результатов позволит выявить особенности конструкции конкретного трансформатора, которые можно будет учесть в модели динамических режимов, такие как несимметрия ветвей магнитной, в том числе в области технологических зазоров, перекос обмоток, отражающийся на результатах расчета индуктивностей рассеяния обмоток, расхождение реальной характеристики намагничивания стали от заявленной по каталогу и пр.

ВЫВОДЫ

Для построения цифрового двойника силового трансформатора была разработана модель динамических режимов его работы, совмещающая в достаточную для заявленных целей точность расчетов с высокой скоростью вычислений, позволяющей использовать данную модель для исследований в режиме имитации эксперимента в реальном времени.

Данная модель строится на основе результатов расчета модели нелинейной магнитной цепи с учетом технологических зазоров и характеристики намагничивания материалов, обращение к которой осуществляется на каждом шаге интегрирования. При этом исключена операция построения и обращения матрицы индуктивностей, что повышает точность расчета. Индуктивности рассеяния обмоток и магнитное сопротивление поля нулевой последовательности рассчитываются на основе расчета магнитного поля в 2D-постановке, что позволяет использовать относительно дешевые программные средства моделирования магнитного поля.

Модель легко настраивается под особенности конструкции конкретного трансформатора, что, собственно, и отличает цифровой двойник от других типов моделей.

Особенность модели состоит в том, что она не зависит от набора элементов во вторичной ветви и схемы их соединения, что позволяет использовать данную модель в качестве автономного блока при создании моделей установок, в которую включен моделируемый трансформатор.

Разработанная модель позволяет исследовать работу трансформатора в произвольных режимах работы, в том числе в несимметричных и аварийных.

Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, региональный

конкурс Ивановской области, проект № 18-43-370012 от 09.06.2018.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti>.
2. Digital Twin [Электронный ресурс] // ANSYS. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>
3. Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes [Электронный ресурс] // COMSOL. – Режим доступа: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Тихонов А.И. Основы теории подобия и моделирования: учеб. пособие / 2-е изд. доп. и перераб. / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 116 с.
6. Тихонов А.И., Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2015, Вып. 3, с. 38-43.
7. Тихонов А.И., Булатов Л.Н. Платформенезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
8. Тихонов А.И., Попов Г.В., Еремин И.В. Особенности методики расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2013, Вып. 4., с. 32-35.
9. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрягзов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2019. – Вып. 2, с. 59 – 70.

Тихонов Андрей Ильич – заведующий кафедрой «Физика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (902) 2410630, e-mail: aitispu@mail.ru.

Стулов Алексей Витальевич – заместитель генерального директора по техническому развитию, ООО «Трансформер», г. Подольск, тел. (917)5801575, e-mail: alxstl@mail.ru

Еремин Илья Витальевич – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (999) 7305530, e-mail: bkmzxxx@yandex.ru.

Снитко Ирина Сергеевна – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (999) 7305530, e-mail: irant-kin@yandex.ru.

Подобный Александр Викторович – аспирант, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (915) 8108109, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Каржевин Андрей Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (961) 2459210, e-mail: drusja95@gmail.com.

Плаксин Алексей Владимирович – магистрант, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», тел. (996) 9190123, e-mail: alesha.plaksin@yandex.ru.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR CREATING DIGITAL TWINS OF POWER TRANSFORMERS BASED ON CHAIN MODELS AND 2D MAGNETIC FIELD MODELS

¹A.I. Tikhonov, ²A.V. Stulov, ¹I.V. Eremin, ¹I.S. Snitko, ¹A.V. Similar, ¹A.A. Karzhevina, ¹A.V. Plaksin

¹FSBEI of HE "Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin", Ivanovo

²OOO Transformer, Moscow Region, Podolsk

The relevance of the work is associated with one of the priorities of state policy related to the digitalization of the economy, in particular, with the development of digital twin technologies that allow simulating the operation of technical devices with an accuracy of 95% and higher. The object of this article is a power transformer, which is one of the main links of all energy systems.

In the work, methods of the theory of nonlinear electric and magnetic circuits, as well as finite element models of the magnetic field were used. For software implementation of the developed technology, the MSExcel table processor, the EMLib library of finite element modeling of the magnetic field (author's development), the MatLab Simulink SmPowerSystem application were used.

The results of the development of a model of arbitrary modes of operation of a power transformer are presented, which can be used as the basis for a digital twin of a specific device. The model combines high accuracy of calculations with high speed of calculations, which allows it to be used to study the operation of a power transformer in real-time simulation of an experiment. The model is based on a nonlinear magnetic circuit. The scattering inductances of the windings and the magnetic resistance of the zero sequence field are calculated based on the calculation of the magnetic field in a 2D formulation. As the simulation results are given the curves of current changes in the phases of the transformer. The model is easily tuned to the design features of a particular transformer. A controller board has been developed with which you can calibrate the model for a real transformer.

The results of the work can be used in the design of power transformers and during their operation to simulate their work in various modes, including unbalanced and emergency.

The developed technology is focused primarily on the sphere of small and medium-sized businesses. One will significantly facilitate the decision-making process in the design and operation of transformers, especially in conditions of lack or absence of experienced personnel.

Index terms: digital double, power transformer, electric circuit simulation, finite-element magnetic field simulation, dynamic transformer operating mode simulation.

REFERENCES

1. National Technological Initiative [Electronic resource] // Agency for Strategic Initiatives. - Access mode: <https://asi.ru/nti>.
2. Digital Twin [Electronic resource] // ANSYS. - Access mode: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>
3. Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes [Electronic resource] // COMSOL. - Access Mode: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>
4. Chernykh I.V. Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink. - M.: DMK Press; St. Petersburg: Peter, 2008. -- 288 p.
5. Tikhonov A.I. Fundamentals of the theory of similarity and modeling: textbook. allowance / 2nd ed. add. and reslave. / FSBEI "Ivanovo State Energy University named after V.I. Lenin." - Ivanovo, 2016. -- 116 p.
6. Tikhonov A.I., Paykov I.A. Analysis of models for the electromagnetic calculation of power transformers. - Ivanovo: "Bulletin of the IGEU", 2015, Vol. 3, p. 38-43.
7. Tikhonov A.I., Bulatov L.N. Platform-independent library of finite element modeling of the magnetic field / Certificate of state registration of a computer program. - M.: Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. - № 2011614852. Application No. 2011613040, priority of 04/28/2011, Registered in the Register of computer programs on 06/22/2011.
8. Tikhonov A.I., Popov G.V., Eremin I.V. Features of the method for calculating the idle speed of a transformer with a core made of amorphous steel. - Ivanovo: "Bulletin of the IGEU", 2013, Vol. 4., p. 32-35.
9. Tikhonov A.I., Karzhevina A.A., Podobny A.V., Dryazgov D.E. Development and research of a dynamic model of a single-phase transformer with an amorphous steel core. - Ivanovo: "Bulletin of the ISEU", 2019. - Issue. 2, p. 59 - 70.

Tikhonov Andrei Ilyich - Head of the Department of Physics, FSBEI HE Ivanovo State Power Engineering University IN AND. Lenin", tel. (902) 2410630, e-mail: aitispu@mail.ru.

Stulov Aleksey Vitalievich - Deputy General Director for Technical Development, Transformer LLC, Podolsk, tel. (917) 5801575, e-mail: alxstl@mail.ru

Ilya Vitalyevich Eremin - Senior Lecturer, Ivanovo State Power Engineering University named after IN AND. Lenin", tel. (999) 7305530, e-mail: bkmzzzz@yandex.ru.

Snitko Irina Sergeevna - Senior Lecturer, Ivanovo State Power Engineering University IN AND. Lenin", tel. (999) 7305530, e-mail: irantkin@yandex.ru.

Similar Alexander Viktorovich - graduate student, FSBEI HE "Ivanovo State Power Engineering University named after IN AND. Lenin", tel. (915) 8108109, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Karzhevina Andrei Aleksandrovich - Postgraduate Student, Ivanovo State Power Engineering University named after IN AND. Lenin ", tel. (961) 2459210, e-mail: drusja95@gmail.com.

Plaksin Aleksey Vladimirovich - undergraduate, Ivanovo State Power Engineering University named after IN AND. Lenin ", tel. (996) 9190123, e-mail: alesha.plaksin@yandex.ru.