

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-28, e-mail: aitispu@mail.ru

Андрей Александрович Каржевин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

Александр Николаевич Голубев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-08

Алексей Вадимович Стулов

ООО «НПК «АВТОПРИБОР»», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, Россия, Владимир, e-mail: alxstl@mail.ru

Имитационная модель силового трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одно из направлений цифровизации промышленности связано с понятием цифровых двойников, позволяющих имитировать работу реальных устройств в различных режимах. В настоящее время в среде MatLab Simulink SimPowerSystem разработаны имитационные модели трехфазного трансформатора стержневой конструкции, которые могут служить основой для создания цифрового двойника реального устройства. Проблема состоит в поиске наиболее универсального метода математического описания трансформатора произвольной конструкции, на основании которого можно создать его имитационную модель. Целью настоящего исследования является разработка имитационной модели трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом и исследование данной модели при работе трансформатора в установившихся и переходных режимах.

Материалы и методы. Используются методы моделирования электрических цепей, построенных на основе теории обыкновенных дифференциальных уравнений, метод имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SimPowerSystem.

Результаты. Оценены особенности конструкции трансформатора с броневым магнитопроводом и основные допущения при создании его имитационной модели. Построена система нелинейных уравнений для нахождения потоков и магнитодвижущей силы, создаваемых обмотками устройства. Разработана имитационная модель трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом на основе полученных уравнений с использованием блока Algebraic Constraint с

¹ Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.

The project is carried out with financial support of Russian Foundation for Basic Research (RFBR), local contest of Ivanovo region № 20-48-370001 dated 19.01.2021.

функцией алгебраического решателя Solver в MatLab Simulink SimPowerSystem. Приведены результаты моделирования динамических процессов в трансформаторе в различных режимах его работы.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в проектных организациях и в условиях производства. Также возможно использование разработанных моделей при эксплуатации силовых трансформаторов для анализа статических и динамических режимов работы участков электрических сетей.

Ключевые слова: цифровые двойники, имитационное моделирование трансформаторов, теория цепей, обыкновенные дифференциальные уравнения

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-28, e-mail: aitispu@mail.ru

Andrey Alexandrovich Karzhev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-05, e-mail: drusja95@gmail.com

Aleksandr Nikolaevich Golubev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-08

Aleksey Vadimovich Stulov

NPK AVTOPRIBOR LLC, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Vice Director for Research, Russia, Vladimir, e-mail: alxstl@mail.ru

Simulation model of three-phase power transformer with twisted shell-type magnetic circuit

Abstract

Background. One of the areas of industry digitalization is associated with the concept of digital twins, which allow simulating the operation of real devices in various modes. At present, simulation models of a three-phase rod-type transformer have been developed in the MatLab Simulink SimPowerSystem environment. The models can serve as the basis to design a digital twin of a real device. The problem is to find the most universal method for mathematical description of a transformer of unspecified design to develop its simulation model. The purpose of this study is to develop a simulation model of a three-phase shell-type transformer core with a twisted magnetic circuit and to study this model when the transformer is operating in steady and transient modes.

Materials and methods. The authors have applied the methods to model electrical circuits based on the theory of ordinary differential equations, a simulation method using the MatLab Simulink SimPowerSystem software package.

Results. The structural features of the transformers with shell-core design and the main assumptions when developing the simulation model have been assessed. A system of nonlinear equations has been developed to find the flows and MMF generated by the windings of the device. A simulation model of a three-phase shell-core transformer with a twisted magnetic core has been developed. It is based on the obtained equations using the Algebraic Constraint block with the Solver function in MatLab Simulink SimPowerSystem. The results of simulation of dynamic processes in the transformer in various modes are presented.

Conclusions. The results of the study can be used to design power transformers in engineering companies and under production conditions. It is also possible to use the developed models in case of power transformer operation to analyze the static and dynamic modes of operation of sections of electrical networks.

Key words: digital twins, transformer simulation, circuit theory, ordinary differential equations

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.4.046-052

Введение. Создание цифровых двойников силовых трансформаторов (ЦД СТ) является одним из перспективных направлений электротехники, находящихся в русле современной экономической политики России, связанным с цифровизацией

экономики². Под ЦД СТ в данном случае понимается компьютерная модель, описы-

² Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti>.

вающая реальное устройство на основе двусторонней информационной связи с ним³. Развитие теории ЦД СТ идет в нескольких направлениях. Первое направление связано с использованием диагностических моделей эксплуатируемого устройства, позволяющих оценивать его исправность и прогнозировать его остаточный ресурс [1, 2]. Второе направление связано с созданием и использованием некоего виртуального объекта, способного адекватно воспроизводить работу реального устройства в произвольных режимах, в том числе нормальных, переходных, несимметричных и аварийных, с учетом особенностей конструкции конкретного устройства и возможных его неисправностей [3, 4, 5].

Использование ЦД СТ при проектировании позволяет сократить затраты на опытные образцы, так как появляется возможность оценивать результаты проектных решений без проведения дорогостоящих испытаний. Одним из начальных этапов создания ЦД является разработка имитационной модели трансформатора. В [4, 5] приведены результаты разработки уточненной имитационной модели трехфазного трансформатора обычной стержневой конструкции, способной стать основанием для создания ЦД СТ. При этом актуальной является задача, являющаяся развитием данных исследований, состоящая в создании имитационных моделей трансформаторов с другими исполнениями магнитной системы. В частности, ниже приведены результаты разработки и исследования имитационной модели бронестержневого трансформатора с витым магнитопроводом (рис. 1). Данная конструкция находит сегодня широкое применение, в первую очередь, в связи с внедрением в производство и эксплуатацию энергоэффективных силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали [6, 7].

Как показывает опыт, достаточная для цифровых двойников точность моделирования произвольных режимов работы трансформаторов может быть получена с использованием цепных моделей, параметры

которых предварительно рассчитываются с использованием полевых моделей.

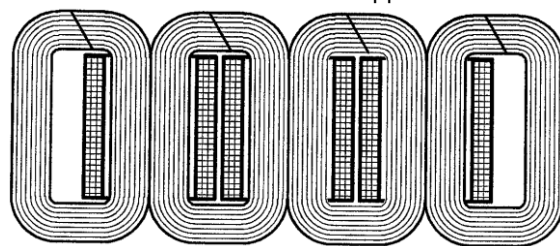


Рис. 1. Схема магнитопровода бронестержневого трансформатора из аморфной стали

Одним из наиболее популярных инструментов моделирования силовых электрических цепей с использованием трансформаторов является пакет MatLab Simulink SimPowerSysytems [8]. Данный пакет позволяет имитировать произвольные режимы работы СТ. Однако собственные модели трансформаторов в данной библиотеке закрыты для дальнейшего развития. В связи с этим была поставлена задача создания открытой имитационной модели СТ обозначенного исполнения.

Одновременно решалась задача разработки наиболее оптимального алгоритма создания имитационных моделей, который можно использовать при проектировании трансформаторов произвольной конструкции.

Методы исследования. Ранее был использован подход, основанный на принципе «идеального трансформатора» [4, 5]. Связь компьютерной модели с настоящим прототипом обеспечивается через задание кривой намагничивания магнитопровода, а также через задание экспериментально снятых параметров обмоток (сопротивлений и индуктивностей рассеяния). Данный подход был использован при создании математической модели нелинейного однофазного трансформатора с потерями, которая легла в основу модели трехфазного трансформатора стержневой конструкции.

Анализ показал, что данный подход весьма сложно распространить на случай трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции с витым магнитопроводом, так как система уравнений, описывающая магнитную цепь данного трансформатора, оказывается сложнее, что приводит к неоправданному усложнению фрагмента модели, отвечающего за расчет токов намагничивания различных фаз.

³ ГОСТ Р 57700.37 – 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021. – Дата утверждения 16.09.2021.

Магнитопровод моделируемого трансформатора (рис. 1) изготовлен из 4 колец двух типоразмеров. Каждое кольцо намотано из электротехнической стали и имеет прямоугольное сечение. Особенностью подобной конструкции при расчете является то, что поток в каждом кольце можно считать отдельно, так как он замкнут по своему контуру, и что потоком нулевой последовательности, вследствие замыкания потоков по внешним кольцам, можно пренебречь.

Для формулировки системы уравнений, описывающих магнитную цепь, используем схему замещения магнитной системы трансформатора, приведенную на рис. 2. Так как конструкция трансформатора подразумевает магнитопровод, состоящий из нескольких отдельных колец, то мы получаем четыре отдельных контура, каждый со своим потоком. При этом катушки, расположенные на сердечниках, заменяются тремя источниками магнитодвижущей силы (МДС).

На рис. 2 приведены следующие обозначения: F_i – МДС, создаваемые обмотками первичной стороны; Φ_j – потоки, проходящие в каждом из колец; R_{mk} – магнитные сопротивления каждого отдельного кольца, вычисляемые по формуле

$$R_{mk} = \nu(B_k) \frac{\ell_k}{S}, \quad (1)$$

где $\nu(B_k)$ – зависимость удельного магнитного сопротивления стали от магнитной индукции в k -й ветви; S – активное сечение магнитопровода; ℓ_k – длина средней линии магнитного поля кольца.

Система уравнений, описывающая магнитную цепь трансформатора, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\Psi_1}{w_1} - \Phi_2 + \Phi_1 &= 0, \\ \frac{\Psi_2}{w_1} - \Phi_3 + \Phi_2 &= 0, \\ \frac{\Psi_3}{w_1} - \Phi_4 + \Phi_3 &= 0, \\ F_3 - \Phi_4 R_{m4} &= 0, \\ F_1 + \Phi_1 R_{m1} &= 0, \\ F_1 - F_2 - \Phi_2 R_{m2} &= 0, \\ F_2 - F_3 - \Phi_3 R_{m3} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где Ψ_i – потокосцепление i -й обмотки; w_1 – количество витков в первичной обмотке трансформатора.

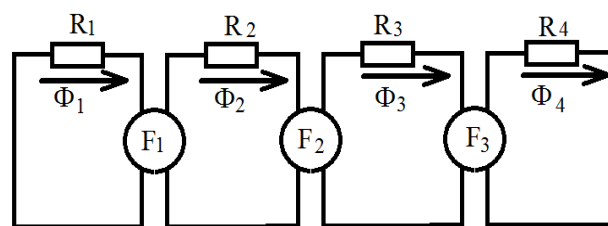


Рис. 2. Схема замещения магнитной системы бронестержневого трансформатора с витым сердечником

Всего система содержит 7 нелинейных уравнений, решение которых позволяет получить 4 магнитных потока в каждом кольце и 3 МДС, создаваемые первичными фазными обмотками. По найденным МДС обмоток можно найти намагничивающие токи трех фаз:

$$i_{ork} = \frac{F_k}{w_1}, \quad (3)$$

что, собственно, и является целью решения системы уравнений (2) на каждом шаге интегрирования по времени имитационной модели трансформатора.

Приведем данную систему уравнений к матричному виду:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_{m4} & 0 & 0 & 1 \\ R_{m1} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -R_{m2} & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{m3} & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Psi_1}{w_1} \\ \frac{\Psi_2}{w_1} \\ \frac{\Psi_3}{w_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

или

$$[R]\{X\} + \{F\} = \{0\}. \quad (5)$$

Решение данной системы уравнений осуществляется с помощью графического моделирования в пакете MATLAB Simulink SimPowerSystems. Алгоритм решения представлен на рис. 3.

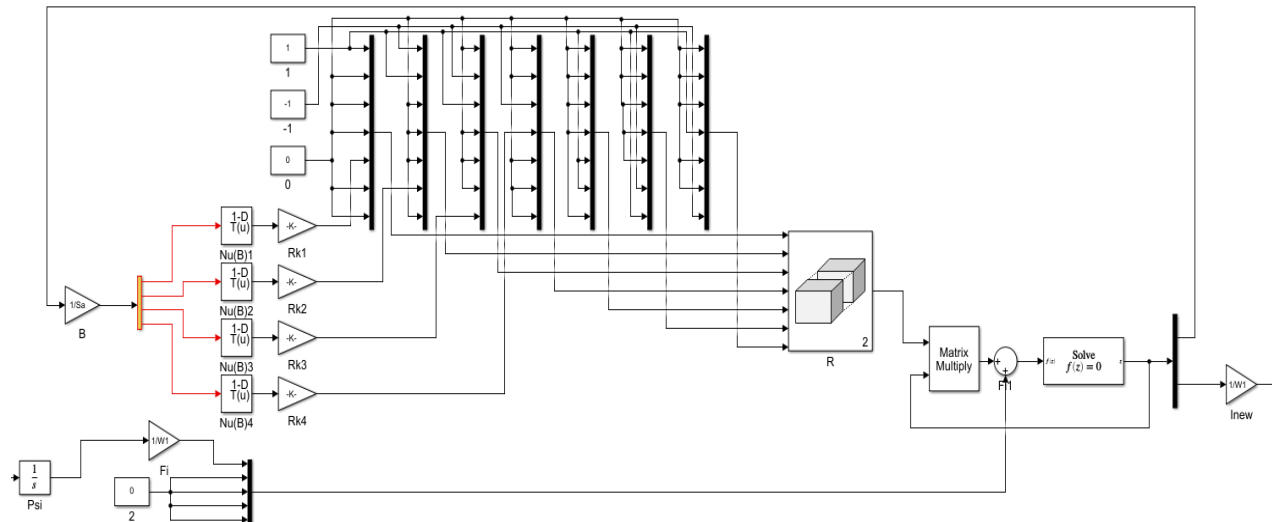


Рис. 3. Моделирование системы нелинейных уравнений в MATLAB Simulink SimPowerSystems

Поэлементно формируем основную нелинейную матрицу $[R]$, которую затем умножаем на вектор неизвестных $\{X\}$, после чего прибавляем матрицу $\{F\}$, элементы которой рассчитываются путем интегрирования значений напряжений на ветвях намагничивания соответствующих стержней цепной части модели трансформатора (полная модель трансформатора представлена на рис. 4).

Для решения систем нелинейных уравнений в MATLAB Simulink используется блок Algebraic Constraint с функцией алгебраического решателя Solver. На выходе этого блока мы получаем вектор-столбец с искомыми величинами. Найденные при этом магнитные потоки в кольцах умножаются на соответствующие магнитные со-

противления и подаются в матрицу $[R]$, а из расчета МДС мы получаем токи намагничивания, которые подаются в схему замещения стержней трансформатора.

Следует отметить, что из-за использования алгебраического решателя скорость интегрирования модели снижается по сравнению с аналогичными моделями без использования блока Solver. Однако достоинством данного подхода является отсутствие необходимости как-либо упрощать или самостоятельно решать полученные уравнения.

Результаты исследований. На рис. 5 приведены кривые изменения токов первичных обмоток при включении трансформатора на холостой ход (а) и в установившемся режиме (б).

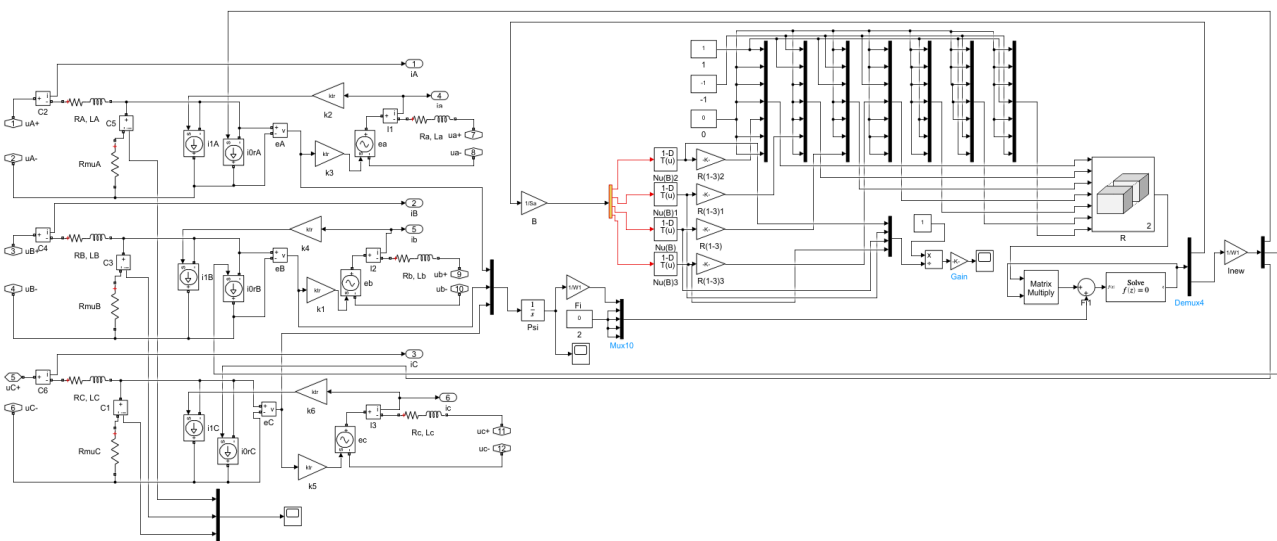
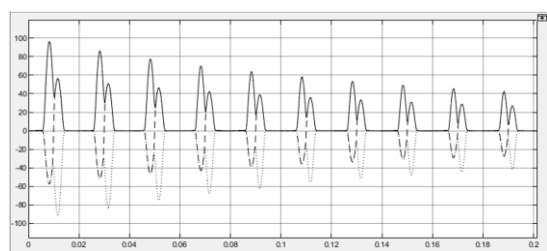
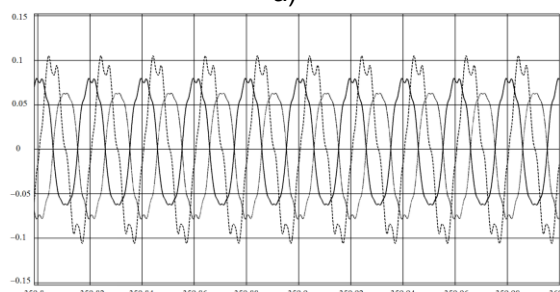


Рис. 4. Имитационная модель трехфазного трансформатора бронестержневой конструкции



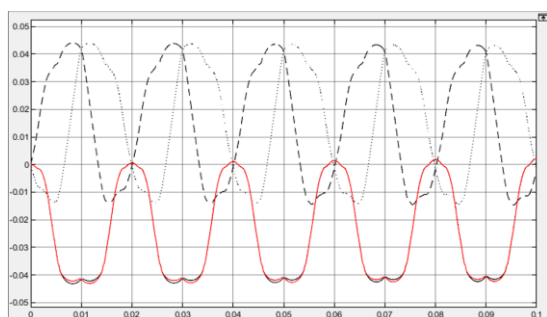
а)



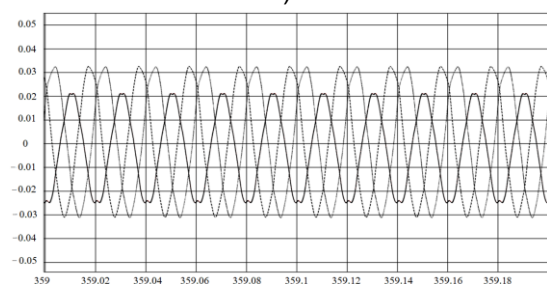
б)

Рис. 5. Кривые изменения токов первичных обмоток при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б)

На рис. 6 показаны кривые изменения потоков в кольцах магнитопровода при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б).



а)



б)

Рис. 6. Кривые изменения потоков в отдельных кольцах магнитопровода при включении трансформатора на холостой ход (а) и при установившемся режиме (б)

Анализ полученных кривых показывает, что магнитные потоки в крайних кольцах (нижние кривые на рис. 6, а и совпавшие кривые с меньшей амплитудой на рис. 6, б) практически полностью совпадают по фазе

и амплитуде, что является интересным наблюдением и показывает, что суммарный поток равномерно распределяется по магнитной системе трансформатора.

На рис. 7 приведены кривые изменения потоков в стержнях трансформатора, создаваемых обмотками первичной стороны при установившемся режиме.

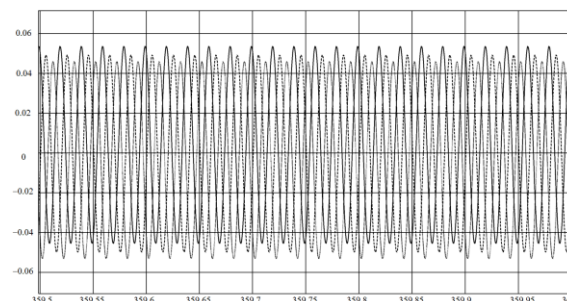


Рис. 7. Кривые изменения потоков в стержнях трансформатора в установившемся режиме

На рис. 8 приведены кривые изменения тока в первичных обмотках трансформатора при включении его на нагрузку. В первые секунды на эти кривые влияет постепенно уменьшающийся ток холостого хода. В установившемся режиме фазные токи становятся практически синусоидальными (на рис. 8 не показаны).

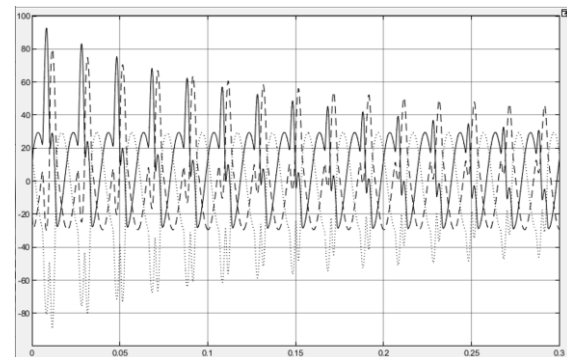


Рис. 8. Кривые изменения токов в первичных фазных обмотках при включении трансформатора на активную нагрузку

Выводы. Реализация имитационных моделей силовых трансформаторов зависит от особенностей конструкции магнитной системы. Не существует единой технологии, позволяющей строить модели произвольных, особенно нестандартных, вариантов конструкции.

В исследовании приведен подход, позволяющий уменьшить зависимость от исполнения магнитной системы при построении имитационной модели трансформатора. С использованием данного подхода появляется более универсальный способ создания имитирующих моделей

трансформатора. При этом упрощается способ математического описания физических процессов, происходящих внутри устройства, важно лишь правильно изобразить схему замещения магнитной цепи трансформатора. В качестве недостатка данного подхода можно отметить замедление работы модели по сравнению с традиционными имитационными моделями.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в проектных организациях и на предприятиях трансформаторостроения.

Список литературы

1. **Дарьян Л.А., Которович Л.Н.** Цифровые двойники электроэнергетического оборудования – основные принципы и технические требования // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2020. – № 5(62). – С. 45–57.
2. **Дарьян Л.А., Которович Л.Н.** Цифровые двойники электроэнергетического оборудования. Образы и экспертизы // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2021. – № 1(64). – С. 124–129.
3. **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.
4. **Разработка** нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный // *Вестник ИГЭУ*. – 2020. – Вып. 1. – С. 22–31.
5. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитко, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, В.Е. Мизонов // *Вестник ИГЭУ*. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.
6. **Долинина Ю.** Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем // *Электротехнический рынок*. – 2012. – № 5–6. – С. 47–48. – Режим доступа: http://transformator.ru/press_center/the_press/2012/silovye-amorfnye-transformatory-budushchee-v-nastoyashchem
7. **Внедрение** аморфных трансформаторов в сеть. Переход на напряжение 20 кВ / И.Ф. Ахунянов, Ф.М. Улыбин, Ш.Г. Исмагилов, Н.К. Потапчук // *Novainfo*. – 2019. – № 106. – С. 12–17. – Режим доступа: <https://novainfo.ru/article/17070>
8. **Черных И.В.** Моделирование электро-технических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Dar'yan, L.A., Kontorovich, L.N. Tsifrovye dvoyniki elektroenergeticheskogo oborudovaniya – osnovnye printsipy i tekhnicheskie trebovaniya [Digital twins of electric power equipment – basic principles and technical requirements]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2020, no. 5(62), pp. 45–57.
2. Dar'yan, L.A., Kontorovich, L.N. Tsifrovye dvoyniki elektroenergeticheskogo oborudovaniya. Obrazy i ekspertizy [Digital twins of electric power equipment. Images and expertise]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 1(64), pp. 124–129.
3. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Evdakov, A.E. Analiz dinamicheskikh rezhimov raboty trekhfaznykh trekhstержnevyykh 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.
4. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhevin, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [Development of a nonlinear model of a three-phase transformer to study the influence of the asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.
5. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of a model of transient modes, taking into account the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 4, pp. 47–56.
6. Dolinina, Yu. Silovye «amorfnye» transformatory. Budushchee v nastoyashchem [Power “amorphous” transformers. The future is in the present]. *Elektrotekhnicheskiiy ryok*, 2012, no. 5–6, pp. 47–48. Available at: http://transformator.ru/press_center/the_press/2012/silovye-amorfnye-transformatory-budushchee-v-nastoyashchem.
7. Akhunyaev, I.F., Ulybin, F.M., Ismagilov, Sh.G., Potapchuk, N.K. Vnedrenie amorfnykh transformatorov v set'. Perekhod na napryazhenie 20 kV [Introduction of amorphous transformers into the network. Transition to voltage 20 kV]. *Novainfo*, 2019, no. 106, pp. 12–17. Available at: <https://novainfo.ru/article/17070>.
8. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.