
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, e-mail: aitispu@mail.ru

Александр Викторович Подобный

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: pav@talan.tel

Ирина Сергеевна Снитько

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Алексей Вадимович Стулов

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

Андрей Александрович Каржевин

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

Метод коррекции имитационной модели однофазного трансформатора с использованием осциллограмм тока холостого хода¹

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 для этого используются имитационные пакеты, например MatLab Simulink, или системы моделирования физических полей, например ANSYS Maxwell. Проблема состоит в том, что, несмотря на декларируемую точность, практически ни одна модель технического устройства не способна демонстрировать точное совпадение результатов моделирования с результатами эксперимента, особенно в переходных режимах, что вызвано разбросом характеристик материалов и сложно-

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.

стью учета технологических факторов. Целью настоящего исследования является разработка способа коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, после которой данная модель способна обеспечить 95 %-ю точность совпадения мгновенных значений токов в обмотках при моделировании работы трансформатора как в установившихся, так и в переходных режимах.

Материалы и методы. Используются методы моделирования электрических цепей, метод имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SimPowerSystem, а также экспериментальные методы регистрации осциллограмм токов и напряжений.

Результаты. Проведено исследование возможности точного моделирования переходных и установившихся процессов в однофазном трансформаторе с учетом нелинейности магнитных свойств электротехнической стали и взаимного влияния магнитных потоков обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, с применением для коррекции модели разработанного многоканального быстродействующего регистратора. Разработана методика коррекции имитационной модели однофазного трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм напряжения и тока холостого хода.

Выводы. Применение предложенной методики коррекции кривой намагничивания трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм реального трансформатора, а также расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания схемы замещения трансформатора по данной осциллограмме позволяют получить практически идеальное совпадение кривой тока холостого хода, полученной при моделировании, с экспериментальной кривой. Предложенная методика построения имитационной модели дает более точные результаты моделирования переходных режимов в трансформаторах по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, цифровые двойники, теория цепей, обыкновенные дифференциальные уравнения, имитационные модели.

Andrey Ilyich Tikhonov

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

Alexander Viktorovich Podobnyi

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, Russia, Ivanovo, e-mail: pav@talan.tel

Irina Sergeevna Snitko

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Aleksey Vadimovich Stulov

LLC "NPK AVTOPRIBOR", Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Vice Director for Technological Development, e-mail: alxstl@mail.ru

Andrey Alexandrovich Karzhevin

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

Method to revise a simulation model of single-phase transformer using no-load current waveforms

Abstract

Background. One of the areas of industrial digitalization is associated with the concept of digital twins, which allows simulating the operation of real devices in various modes. Currently, simulation packages such as MatLab Simulink, or physical field modeling systems, such as ANSYS Maxwell are applied. The problem is that, despite the declared accuracy, practically no model of a technical device can demonstrate a point-to-point correspondence of the simulation results and the experimental results, especially under transient conditions. It is caused by variations of material characteristics and difficulty to consider technological factors. The purpose of this article is to develop a method to revise the simulation model of a single-phase transformer. So, this model can provide 95 % accuracy of the coincidence of the instantaneous values of currents in the windings when simulating the operation of the transformer both in steady state and in transient modes.

Materials and methods. The authors have used the methods to model electrical circuits, simulation modeling using the MatLab Simulink SimPowerSystem package, experimental methods to record current and voltage oscillograms.

Results. The authors have studied the possibility of accurate modeling of transient and steady processes in a single-phase transformer, considering the nonlinearity of the magnetic properties of electrical steel and the

mutual influence of magnetic fluxes of windings that close outside the magnetic core. To revise the model, a multichannel high-speed recorder developed by the authors has been used. A technique to revise a simulation model of a single-phase transformer using experimental oscillograms of voltage and no-load current has been developed.

Conclusions. Application of the proposed method to revise the transformer magnetization curve using experimental oscillograms of a real transformer, as well as calculating the resistance of the parallel magnetization branch of the equivalent circuit of the transformer based on the oscillogram, makes it possible to obtain an almost point-to-point correspondence of the no-load current curve obtained when modeling with the experimental curve. The proposed technique to develop a simulation model gives more accurate results of modeling transient modes of transformers in comparison with analogues.

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

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.038-046

Введение. Одно из направлений цифровизации промышленности связано с понятием цифровых двойников (ЦД), под которыми понимаются виртуальные копии реальных устройств, с помощью которых можно имитировать их работу в различных режимах. В соответствии с ГОСТ Р 57700.37², различают несколько видов ЦД технических устройств, среди которых можно выделить:

1) цифровой прототип изделия, который может быть представлен функциональной моделью, используемой на стадии проектирования класса однотипных устройств для имитации работы не существующего пока еще устройства;

2) цифровой двойник экземпляра устройства, используемый для имитации работы конкретного устройства в целях прогнозирования последствий принятия тех или иных решений по выбору режимов его эксплуатации.

В последнем случае к ЦД предъявляются повышенные требования в плане совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными.

Особенность проблемы состоит в том, что, несмотря на декларируемую точность, практически ни одна модель технического устройства не способна демонстрировать точное совпадение результатов моделирования с результатами эксперимента. Основная причина этого состоит в невозможности точного описания характеристик материалов, из которых изготовлено устрой-

ство. Как правило, в данных характеристиках существует значительный разброс. Например, кривая намагничивания электротехнической стали, из которой изготавливается трансформатор, даже в пределах одной партии поставки может иметь разброс, укладываемый в 20 %-й коридор. Говорить при этом о 95 %-й точности моделирования невозможно даже при наличии идеально точного модельного описания физических процессов в данном устройстве.

Следует отметить также, что на характеристики изготовленного устройства большое влияние оказывает множество факторов технологического характера. Поэтому, даже если нам известна точная кривая намагничивания данной конкретной партии электротехнической стали, после ее раскрытия, а также в процессе сборки трансформатора ее характеристики могут существенно измениться. Причем зачастую эти изменения носят случайный характер.

Тем не менее проблема повышения точности имитационных моделей трансформатора имеет решение. Особенно если речь идет не о цифровом прототипе проектируемого устройства, а о цифровом двойнике конкретного экземпляра устройства.

Ниже предлагается один из способов коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, после которой данная модель способна обеспечить 95 %-ю точность совпадения мгновенных значений токов в обмотках при моделировании работы трансформатора как в установившихся, так и в переходных режимах.

Методы исследования. В [2] рассмотрена имитационная модель однофазного трансформатора, реализованная в среде MatLab Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystem [3] (рис. 1).

² 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.

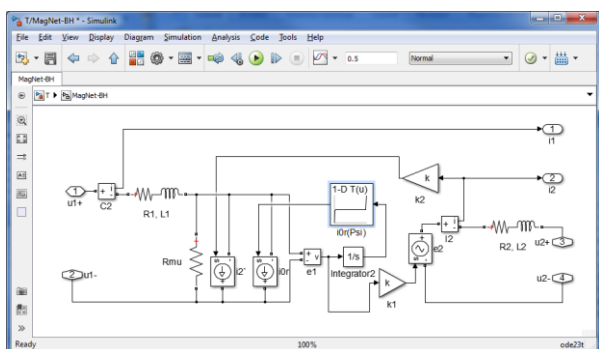


Рис. 1. Модель реального однофазного нелинейного трансформатора

В основе данной модели лежит принцип идеального трансформатора [4], построенного с использованием управляемого источника тока в первичной обмотке и управляемого источника ЭДС во вторичной. Алгоритм функционирования идеального трансформатора сводится к условиям:

$$e_2(t) = k e_1(t), \tag{1}$$

$$i_1(t) = k i_2(t),$$

где e_1, e_2, i_1, i_2 – соответственно мгновенные ЭДС и токи в первичной и вторичной обмотках; k – коэффициент трансформации.

Данная модель дополняется сопротивлениями R_1, R_2 и индуктивностями рассеяния L_1, L_2 первичной и вторичной обмоток, а также ветвью намагничивания с параллельным соединением активного сопротивления R_{μ} , соответствующего магнитным потерям в сердечнике трансформатора, и нелинейной индуктивности L_{μ} , имитируемой управляемым источником намагничивающего тока i_{0r} , мгновенные значения которого вычисляются по кривой намагничивания трансформатора, заданной в форме $i_{0r}(\Psi_1)$, где Ψ_1 – потокосцепление первичной обмотки, вычисляемое по формуле

$$\Psi_1(t) = -\int_0^t e_1(t) dt. \tag{2}$$

Именно точность расчета кривой $i_{0r}(\Psi_1)$ и величины сопротивления R_{μ} определяет точность расчета мгновенных значений тока холостого хода (ХХ) трансформатора в установившихся режимах. Как уже отмечалось, рассчитать эти параметры с должной точностью на этапе проектирования трансформатора практически невозможно по причинам технологического характера.

Следует отметить, что точный расчет кривой тока ХХ невозможен без учета яв-

ления магнитного гистерезиса. Анализ работ [4, 5] говорит о сложности данной проблемы, особенно если в условии задачи входит необходимость учета остаточной намагниченности электротехнической стали в момент включения трансформатора (особенно остро данная проблема встает при имитационном моделировании трансформатора с сердечником из аморфной стали, в которой остаточная намагниченность может быть существенной). Поэтому проблему в любом случае необходимо упрощать, иначе задача становится практически нерешаемой.

В качестве гипотезы примем, что гистерезисные явления на заданной частоте питающего напряжения достаточно точно учитываются сопротивлением R_{μ} . Как будет показано ниже, остаточную намагниченность стали при этом учесть не удастся, однако влияние магнитного гистерезиса в установившемся режиме удастся учесть с большой точностью.

Для построения кривой намагничивания конкретного экземпляра трансформатора был разработан 12-канальный быстродействующий регистратор, способный регистрировать мгновенные значения токов и напряжений с частотой до 100 кГц по каждому каналу. Разрядность каналов составляет 12 бит. Регистратор может использоваться для фиксации осциллограмм токов и напряжений во всех обмотках как однофазного, так и трехфазного трансформатора (рис. 2).

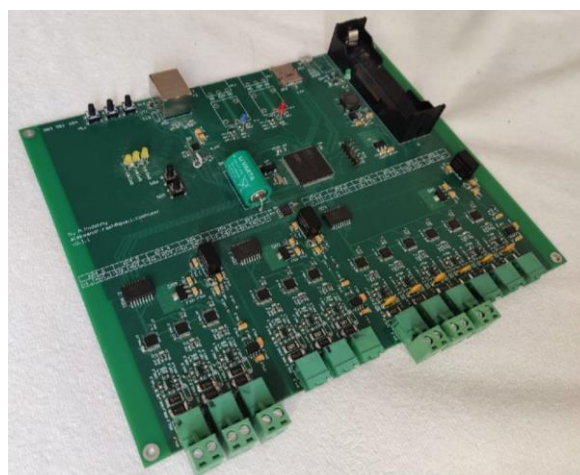


Рис. 2. Печатная плата 12-канального регистратора для регистрации осциллограмм напряжений и токов в обмотках трансформатора

Осциллограммы выгружаются на персональный компьютер для последующего

анализа. Алгоритм построения кривой намагничивания и расчета сопротивления R_{Σ} приводится ниже на примере результатов исследования однофазного трансформатора.

Как показывает анализ, точность имитационной модели однофазного трансформатора (рис. 1) существенно зависит от величины тока нагрузки. Дело в том, что индуктивности рассеяния L_1 и L_2 в первичной и вторичной обмотках рассчитываются обычно из опыта короткого замыкания (КЗ) трансформатора. А так как первичная и вторичная обмотки трансформатора обычно выполняются концентрическими, то в опыте КЗ их магнитные поля, замыкающиеся за пределами магнитопровода, направлены навстречу друг другу, существенно ослабляясь. Поэтому, например, индуктивность L_1 , вычисляемая из опыта КЗ, оказывается на порядки меньше значения, которое фиксируется в опыте ХХ при отсутствии тока во вторичной обмотке. При моделировании переходных режимов в трансформаторе этой ошибкой пренебрегать нельзя.

Строго говоря, согласно [7], индуктивности рассеяния обмоток должны рассчитываться по формулам:

$$L_1 = L_{11} - L_{12} k; \quad (3)$$

$$L_2 = L_{22} - \frac{L_{21}}{k}, \quad (4)$$

где L_{11} , L_{22} – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора, обусловленные магнитными полями, замыкающимися за пределами магнитопровода, рассчитываемые из условия отсутствия токов в противоположных обмотках; L_{12} , L_{21} – взаимные индуктивности обмоток, обусловленные магнитными полями, замыкающимися за пределами магнитопровода.

С учетом сказанного имитационная модель однофазного трансформатора принимает вид, рекомендуемый в [8] (рис. 3). Вместо индуктивностей рассеяния здесь присутствуют управляемые источники тока, на управляющие входы которых подаются токи i_1 и i_2 , рассчитываемые с использованием матрицы индуктивностей $[L]$, обусловленной полями обмоток, замыкающимися за пределами магнитопровода (балластные сопротивления, включенные параллельно с данными источниками тока, служат для устранения конфликта при использовании методов численного интегрирования). При этом

$$\begin{Bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{Bmatrix} = -[L]^{-1} \begin{Bmatrix} \Psi_{\sigma 1} \\ \Psi_{\sigma 2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \int_0^t \begin{Bmatrix} e_{\sigma 1} \\ e_{\sigma 2} \end{Bmatrix} dt, \quad (5)$$

где $\Psi_{\sigma 1}$, $\Psi_{\sigma 2}$ – потокосцепления первичной и вторичной обмоток с магнитным полем за пределами магнитопровода; $e_{\sigma 1}$, $e_{\sigma 2}$ – ЭДС, наводимые этими полями в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

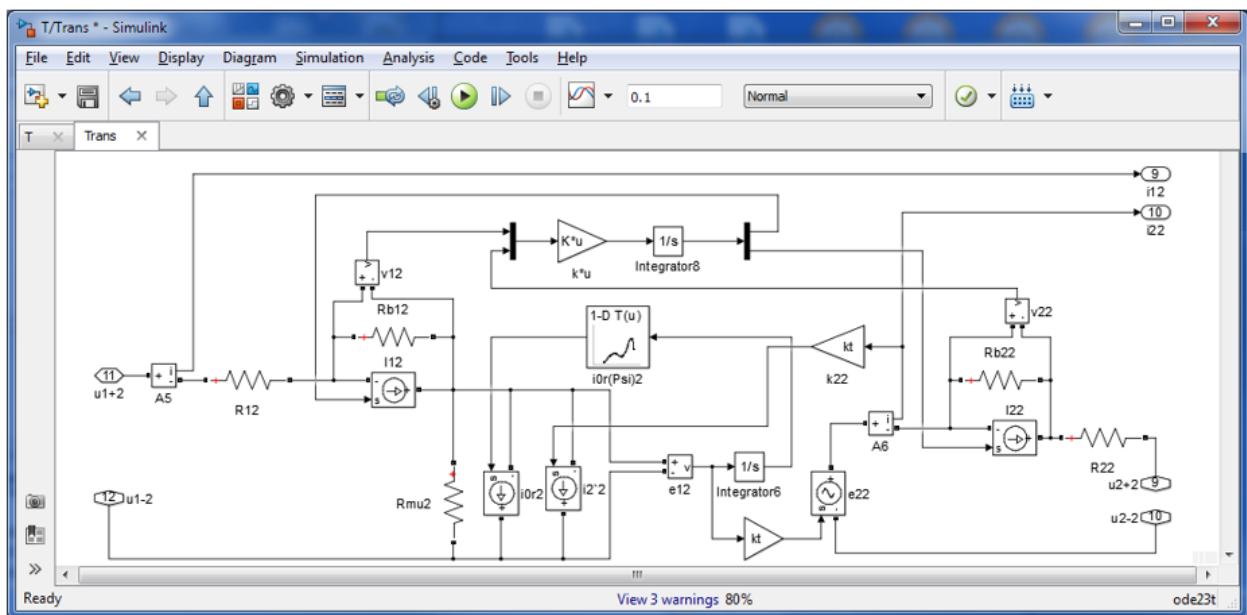


Рис. 3. Модель однофазного нелинейного трансформатора с использованием взаимного влияния магнитных полей обмоток за пределами магнитопровода

Для расчета элементов матрицы [L] использована технология, описанная в [9], опирающаяся на расчет магнитных полей отдельных обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода. Расчет осуществлялся методом конечных элементов в осесимметричной постановке с использованием библиотеки EMLib (авторская разработка).

Результаты исследований. В качестве объекта исследования был выбран однофазный радиотрансформатор ОСМ1-0,063ЗУ3 (рис. 4). Несмотря на малую мощность выбранного объекта, все приведенные алгоритмы могут быть применены и к однофазным силовым трансформаторам большой мощности.



Рис. 4. Объект исследования (ОСМ1-0,063ЗУ3)

Осциллограмма напряжения и установившегося тока ХХ данного трансформатора на одном периоде, снятая с использованием разработанного регистратора (см. рис. 2) и отфильтрованная от высокочастотных шумов, представлена на рис. 5.

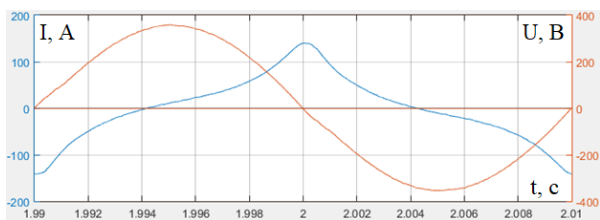


Рис. 5. Осциллограмма напряжения и тока ХХ исследуемого объекта

По данной осциллограмме рассчитывается мощность магнитных потерь по формуле

$$P_0 = \int_0^T u(t) i(t) dt \approx \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n u_k i_k \Delta t_k, \quad (6)$$

где T – период; n – количество точек на периоде; u_k, i_k – мгновенные значения напряжения и тока ХХ на k -м интервале времени Δt_k .

Расчет сопротивления ветви намагничивания осуществляется по формуле

$$R_\mu = \frac{U_1^2}{P_0} - R_1, \quad (7)$$

где U_1 – действующее значение приложенного напряжения; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки.

Кривая намагничивания трансформатора независимо от его мощности строится на основе осциллограммы по формуле

$$\Psi(t) = \int_0^t \left[u(t) - R_1 i(t) - L_{11} \frac{di(t)}{dt} \right] dt \approx \sum_{k=1}^n [u_k - R_1 i_k] \Delta t_k - L_{11} \Delta i_k, \quad (8)$$

где Δi_k – приращение тока на k -м интервале времени.

Полученная кривая, имеющая форму кривой магнитного гистерезиса, представлена на рис. 6.

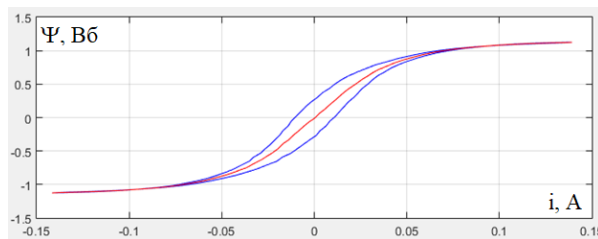


Рис. 6. Кривая намагничивания трансформатора

На основе данной кривой строится основная кривая намагничивания по формуле

$$\Psi_k \approx \frac{\Psi_{k+} + \Psi_{k-}}{2}, \quad (9)$$

где Ψ_{k+}, Ψ_{k-} – потокосцепления на восходящей и нисходящей ветвях кривой магнитного гистерезиса при одинаковых значениях тока.

Основная кривая намагничивания, представленная в табличной форме, указывается в блоке кривой намагничивания в модели, представленной на рис. 3.

Для получения более точного результата в качестве питающего напряжения, подаваемого на первичную обмотку в модели, использовался управляемый источник ЭДС, на управляющий вход которого подавалась реальная осциллограмма напряжения на периоде, которая несколько отличается от идеальной синусоиды (см. рис. 5).

Результат расчета тока ХХ в сравнении с реальной осциллограммой представлен на рис. 7.

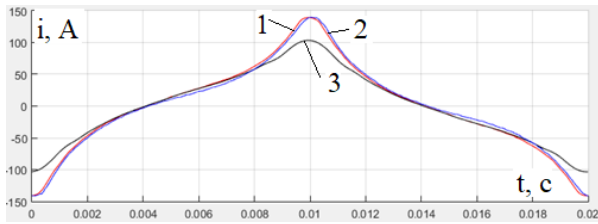


Рис. 7. Кривые установившегося тока ХХ трансформатора: 1 – расчетная кривая; 2 – реальная осциллограмма; 3 – расчетная кривая, полученная при подстановке в модель кривой намагничивания, снятой классическим способом

Кривые 1 и 2 на рис. 7, полученные соответственно расчетным и экспериментальным путем, практически совпали, что говорит о высокой точности моделирования. Причем совпадение произошло с учетом несимметрии этих кривых относительно точки максимума, вызванной наличием магнитного гистерезиса, что говорит о том, что магнитный гистерезис в данном случае учитывается также с большой точностью, несмотря на простоту модели. Помимо точного расчета по осциллограмме основной кривой намагничивания конкретного экземпляра трансформатора необходим точный расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания R_{Σ} .

Следует обратить внимание на кривую 3, представленную на рис. 7. Данная кривая получена на модели с кривой намагничивания, снятой по результатам опыта ХХ при разных напряжениях на первичной обмотке. Опыт ХХ проводился по классической методике, т. е. путем фиксации действующих значений напряжения и тока ХХ с последующим пересчетом по формуле

$$\Psi(U_1) = \frac{|\dot{U}_1 - iZ|}{4,44 \cdot f}, \quad (10)$$

где \dot{U}_1, i – комплексные значения напряжения и тока ХХ; Z – комплексное сопротивление первичной обмотки; f – частота сети.

При такой постановке задачи в расчетной и экспериментальной кривых тока ХХ присутствуют существенные отличия (кривые 1 и 3 на рис. 7), что вызвано в первую очередь неприемлемым в данном

случае допущением о синусоидальности тока ХХ.

Следует также отметить различия между решениями, полученными в переходных режимах на моделях, представленных на рис. 1 и рис. 3. При включении трансформатора на ХХ при повышенном напряжении (насыщенный магнитопровод, нулевая начальная фаза напряжения на первичной обмотке) в кривых первичного тока присутствуют явные различия (рис. 8).

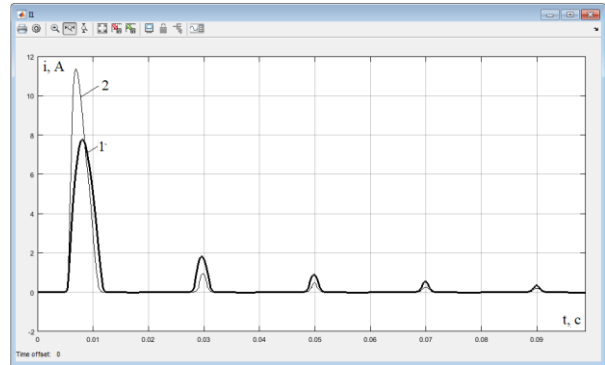


Рис. 8. Кривые первичного тока при включении трансформатора на ХХ: 1 – расчет на модели с учетом взаимного влияния магнитных полей обмоток за пределами магнитопровода; 2 – расчет на модели без учета взаимного влияния

Как и ожидалось, в обоих случаях наблюдаются значительные броски тока на первом полупериоде, которые со времени затухают, после чего в установившемся режиме кривая тока принимает форму, представленную на рис. 7. Однако в случае, когда не учитывается взаимное влияние магнитных полей обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, бросок тока оказывается больше, чем в случае учета данного фактора. Отличие составляет около 30 %. Это говорит о некорректности традиционного способа учета данного явления с использованием индуктивностей рассеяния.

В установившемся режиме кривые тока ХХ, полученные на двух моделях, полностью совпадают, что объясняется тем, что в установившемся режиме поток рассеяния первичной обмотки пренебрежительно мал и практически не влияет на ток ХХ.

Как показано в [8], аналогичный результат (несовпадение кривых первичного тока при включении трансформатора и совпадение данных кривых в установившемся режиме) получается и при включении трансформатора на нагрузку. Объясняется

это тем, что в установившемся режиме полностью выполняются требования симметрии намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток, что соответствует условиям опыта КЗ, на основе которого вычисляются индуктивности рассеяния. В переходных режимах это условие не выполняется в модели, представленной на рис. 1, но полностью учитывается в предлагаемой нами модели, приведенной на рис. 3.

Выводы. Проведенное исследование возможности точного моделирования переходных и установившихся процессов в однофазном трансформаторе с учетом нелинейности магнитных свойств электротехнической стали и взаимного влияния магнитных потоков обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, показало, что применение предложенной методики коррекции кривой намагничивания трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм реального трансформатора, а также расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания схемы замещения трансформатора по данной осциллограмме позволяют получить практически идеальное совпадение кривой тока ХХ, полученной при моделировании, с экспериментальной кривой.

Однако данное совпадение достигается только в установившемся режиме ХХ. Для построения уточненной модели было применено решение, предложенное в [8], что позволило выйти на модели, позволяющие получить высокую точность совпадения результатов с экспериментом как в установившихся, так и в переходных режимах.

Дальнейшее развитие данных исследований видится в разработке методики эксперимента, позволяющей рассчитать точное значение элементов матрицы индуктивностей, учитывающей взаимное влияние магнитных полей обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода (в данном исследовании использовались величины, полученные из расчета магнитного поля), что позволит, по мнению авторов, выйти на полное совпадение расчетных и экспериментальных кривых в любых переходных режимах.

Список литературы

1. **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. 59–70.

2. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

3. **Попов В.П.** Теория электрических цепей. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ч. 1. – М.: Юрайт, 2020. – 378 с.

4. **Принципы** моделирования переходных процессов в трансформаторе с учетом топологии свойств магнитопровода / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз, Е.Ю. Мороз и др. // Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 16–24.

5. **Зирка С.Е., Мороз Ю.И.** Моделирование трехфазного трансформатора как системы с сосредоточенно-распределенными параметрами // Техн. электродинамика. – 2014. – № 3. – С. 28–32.

6. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.

7. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитыко, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.

8. **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. – № 1. – С. 55–61.

References

1. 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 study of a dynamic model of a single-phase transformer with an amorphous steel core]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 59–70.

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

3. Popov, V.P. *Teoriya elektricheskikh tsepey. Ch. 1* [Theory of electrical circuits Part 1]. Moscow: Yurayt, 2020. 378 p.

4. Zirka, S.E., Moroz, Yu.I., Moroz, E.Yu., Evdokunin, G.A., Dmitriev, M.V., Arturi, Ts.M. Printsipy modelirovaniya perekhodnykh protsessov v transformatore s uchetom topologii svoystv magnetoprovoada [Principles of modeling transient processes in a transformer, taking into account the topology of the properties of the magnetic circuit]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 1, pp. 16–24.

5. Zirka, S.E., Moroz, Yu.I. Modelirovanie trekhfaznogo transformatora kak sistemy s sosredotochenno-raspredelelennymi parametrami [Modeling of a three-phase transformer as a system with concentrated-distributed parameters]. *Tech. electrodynamics*, 2014, no. 3, pp. 28–32.

6. Leytes, L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow: Energiya, 1981. 392 p.

7. 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.

8. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Methodology for the organization of numerical research of electrical devices using the library of finite element modeling of the magnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 1, pp. 55–61.