

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ¹

А.И. ТИХОНОВ, А.А. КАРЖЕВИН, А.В. ПОДОБНЫЙ, Д.Е. ДРЯЗГОВ
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: aitispu@mail.ru, drusja95@gmail.com, aleksandr.rash@mail.ru, crus943@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Использование аморфных ферромагнитных сплавов в трансформаторостроении позволяет снизить потери холостого хода в 4 и более раз. В то же время кривая намагничивания аморфной стали имеет форму, близкую к прямоугольной, что существенно искажает форму кривой тока холостого хода. При этом растут броски тока при включении насыщенного трансформатора. В периодической литературе отсутствуют публикации, посвященные этому вопросу. Целью данного исследования является разработка динамической модели и исследование динамики однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали (ТАС), работающего на произвольную внешнюю нагрузку.

Материалы и методы: Для расчета электрической цепи использован одношаговый метод на основе модифицированной формулы Розенброка 2-го порядка, для расчета параметров цепи – метод конечных элементов.

Результаты: Разработаны динамические модели однофазного трансформатора, реализованные средствами MatLab Simulink SimPowerSystem, основанные на использовании управляемых источников тока и ЭДС. Данные модели позволили учесть влияние на работу насыщенного трансформатора практически прямоугольной формы кривой намагничивания аморфной стали, из которой изготовлен сердечник. Установлено, что бросок тока при включении насыщенного трансформатора с сердечником из аморфной стали может в десятки раз превышать номинальный ток. Выявлено существенное искажение кривой тока на первых периодах даже при включении трансформатора на номинальную нагрузку.

Выводы: Разработанные модели могут быть использованы при исследовании работы трансформатора на произвольную схему нагрузки. Данные модели открыты для развития. Установлено существенное влияние на работу трансформатора с сердечником из аморфной стали формы кривой намагничивания аморфной стали.

Ключевые слова: динамическая модель однофазного трансформатора, магнитопроводы из аморфной стали, имитационное моделирование трансформаторов

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

DEVELOPMENT AND STUDY OF A DYNAMIC MODEL OF SINGLE-PHASE AMORPHOUS STEEL CORE TRANSFORMER

A.I. TIKHONOV, A.A. KARZHEVIN, A.V. PODOBNY, D.E. DRYAZGOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

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

Abstract

Background: The use of amorphous ferromagnetic alloys in transformer construction allows reducing no-load losses by 4 times or more. At the same time, the magnetization curve of amorphous steel has a shape that is close to a rectangle, which significantly distorts the shape of the no-load current curve. This is accompanied by inrush current increases when a saturated transformer is turned on. However, there are no publications devoted to this issue in the periodicals. The purpose of this work is to develop a dynamic model and study the dynamics of an amorphous steel core single-phase transformer (TAS) operating at an arbitrary external load.

Materials and methods: The calculation of the electrical circuit was made by a one-step method based on a modified 2nd-order Rosenbrock formula, and the circuit parameters were calculated by the finite element method.

Results: We have developed dynamic models of the single-phase transformer based on the use of controlled current sources and EMF and implemented in the MatLab Simulink SimPowerSystem. These models allowed us to take into account the effect produced by the practically rectangular shape of the magnetization curve of the amorphous steel used to make the core on the operation of a saturated transformer. It has been established that the inrush current occurring when a saturated TAS is switched on can exceed the rated current tenfold. A significant distortion of the current curve has been detected in the first periods even when the transformer operates at nominal load.

Conclusions: The developed models can be used to study the operation of a transformer at an arbitrary load. These models can be developed further. It has been found that a significant effect on the transformer operation is produced by the shape of the amorphous steel magnetization curve.

Key words: dynamic model of a single-phase transformer, amorphous steel magnetic cores, transformer simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.043-051

Введение. Одним из перспективных направлений развития современного трансформаторостроения является направление, связанное с использованием аморфных ферромагнитных сплавов для изготовления магнитопроводов. Ввиду малых магнитных потерь, характерных для этих материалов, в том числе на высоких частотах, а также ввиду их относительной дороговизны, относительно низкой индукции насыщения и т.п. [1, 2], наиболее перспективным является использование аморфных сталей в высокочастотных трансформаторах, в частности в радиотрансформаторах, трансформаторах зарядных устройств аккумуляторов электро-транспорта и т.п. Однако и в силовом трансформаторостроении в настоящее время аморфные стали используются все более интенсивно [3].

Как известно, аморфная сталь обладает узкой кривой намагничивания, имеющей практически прямоугольную форму. Это способствует росту искажений в кривой тока холостого хода, которые нагру-

жают электрическую сеть высшими гармониками.

В связи с этим возникает вопрос о влиянии аморфной стали на гармонический состав электрической сети. Кроме того, при проектировании трансформаторов на основе аморфной стали (ТАС) важно иметь информацию о характере переходных процессов, например при моделировании работы трансформатора в составе преобразовательной установки. Поэтому актуальной является задача моделирования динамических и установившихся режимов ТАС с учетом особенностей магнитных характеристик аморфной стали. Особенно интересно оценить работу данных трансформаторов при повышенных частотах. В частности, ниже ставится задача смоделировать работу однофазного ТАС с переходом в перспективе на модели трехфазных трансформаторов с многостержневой магнитной системой.

В плане исследования моделирования влияния на сеть параметров магнитной системы однофазного трансформатора инте-

ресны, в частности, работы [4] и [5], в которых предложены оригинальные схемы замещения нелинейной магнитной цепи. При этом в основном для подобного моделирования в настоящее время используются имитационные пакеты, наиболее популярным из которых является MatLab Simulink с внедренной в него библиотекой моделирования электрических цепей SimPowerSystem [6]. Так, в [7] предлагается оригинальный подход к созданию модели трехфазного трансформатора с помощью нелинейных индуктивностей SimPowerSystem.

Однако в основном при исследовании динамики трансформаторов используется встроенная в SimPowerSystem модель, которая оказывается закрытой от пользователя, что делает невозможной ее развитие на случай специальных трансформаторов.

Поэтому было решено разработать собственную модель, которая может быть в дальнейшем модифицирована произвольным образом, в частности, для моделирования преобразовательных трансформаторов. Так как данная модель может быть в дальнейшем использована для исследования устройств нетиповой конструкции, желательно изначально заложить в технологию моделирования возможность использования облегченных пакетов расчета физических полей. В частности, делается акцент на использовании пакета ELCUT [8]. При этом моделирование динамических режимов трансформатора в полевой постановке строится на основе технологии, изложенной в [9].

Методы исследования. Имеется множество подходов к моделированию динамических режимов в трансформаторах. Обычно они строятся на основе преобразования системы уравнений динамики трансформатора

$$\frac{d}{dt}\{\Psi\} = \{u\} - [R]\{i\} \quad (1)$$

к виду

$$\frac{d}{dt}\{i\} = [L]^{-1}(\{u\} - [R]\{i\}), \quad (2)$$

где $\{\Psi\}$ – вектор потокосцеплений обмоток; $\{u\}$ – вектор мгновенных напряжений на обмотках; $[R]$ – диагональная матрица сопротивлений; $\{i\}$ – вектор мгновенных токов; $[L]$ – квадратная матрица индуктивностей, элементы которой могут быть рас-

считаны как из расчет магнитной цепи, так и в результате полевых расчетов:

$$L_{kj} = \left. \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_j} \right|_{\mu=\text{const}} \approx \frac{\Delta \Psi_k}{\Delta i_j} \Bigg|_{\mu=\text{const}} = \frac{\Psi_k(i_1, \dots, i_j, \dots, i_n) \Big|_{\mu=\text{var}} - \Psi_k(i_1, \dots, i_j + \Delta i_j, \dots, i_n) \Big|_{\mu=\text{const}}}{\Delta i_j} \quad (3)$$

Здесь $\Psi_k(i_1, \dots, i_j, \dots, i_n) \Big|_{\mu=\text{var}}$ – потокосцепление k -й обмотки, определенное при текущих мгновенных значениях токов в обмотках в нелинейной постановке задачи расчета магнитной цепи или магнитного поля; $\Psi_k(i_1, \dots, i_j + \Delta i_j, \dots, i_n) \Big|_{\mu=\text{const}}$ – потокосцепление k -й обмотки, определенное при тех же значениях токов в обмотках, но с приращением Δi_j тока j -й обмотки в линейной постановке полевой или цепной задачи.

В то же время технология моделирования нелинейных трансформаторов в MatLab Simulink SimPowerSystem строится на использовании так называемой модели идеального трансформатора, представленного управляемым источником тока первичной цепи $i_1 = i_2 \cdot k$ и управляемой ЭДС вторичной цепи $e_2 = e_1 \cdot k$, где k – коэффициент трансформации; i_2 , e_1 – ток вторичной и ЭДС первичной ветви соответственно. Для однофазного идеального трансформатора такая модель имеет вид, представленный на рис. 1.

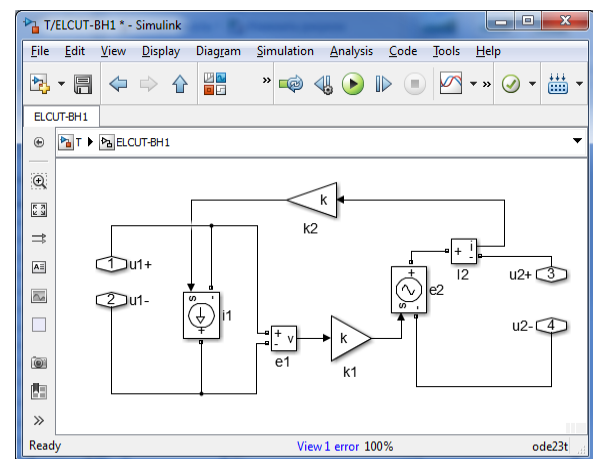


Рис. 1. Модель идеального трансформатора

В отличие от традиционной Т-образной схемы замещения, вторичная цепь здесь представлена не приведенными, а реальными параметрами, что устраняет проблему стыковки данной модели с моделью вторичной цепи.

Версия модели реального однофазного нелинейного трансформатора, построенная на основе модели идеального трансформатора, представлена на рис. 2.

В первичную и вторичную ветви здесь включены активные сопротивления R_1, R_2 и индуктивности рассеяния обмоток L_1, L_2 , определяемые из опыта короткого замыкания или по паспортным данным трансформатора по формулам:

$$R_1 \approx \frac{P_k}{2I_k^2}; \quad R_2 \approx k^2 R_1;$$

$$L_1 \approx \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U_1 U_k}{2I_1 \cdot 100}\right)^2 - R_1^2}; \quad L_2 \approx k^2 L_1, \quad (4)$$

где P_k – потери короткого замыкания, Вт; U_k – напряжение короткого замыкания, %; f – частота сети, Гц; I_1 – номинальное действующее значение первичного тока, А (при наличии детального проекта данные величины могут быть рассчитаны точнее).

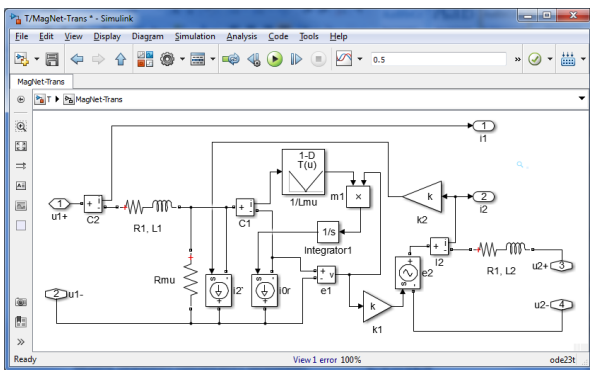


Рис. 2. Модель реального однофазного нелинейного трансформатора

Ветвь намагничивания трансформатора представлена сопротивлением намагничивания R_μ и двумя источниками i_0 и $i_2' = i_2 \cdot k$. Параллельное соединение сопротивлений R_μ более соответствует физике процессов в трансформаторе, по сравнению с последовательным соединением, которое, в свою очередь, более удобно с точки зрения экспериментального определения данного параметра. С достаточной степенью точности данное сопротивление может быть определено по формуле

$$R_\mu = \frac{R_m^2 + X_m^2}{R_m}, \quad (5)$$

где

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad I_0 = I_1 \frac{i_0}{100}; \quad (6)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}; \quad Z_m = \frac{U_1}{I_0};$$

где P_0 – потери холостого хода, Вт; i_0 – ток холостого хода, %; U_1 – номинальное действующее значение первичного напряжения, В.

Ток, задаваемый в управляемом источнике реактивного тока намагничивания i_{0r} , рассчитывается по формуле

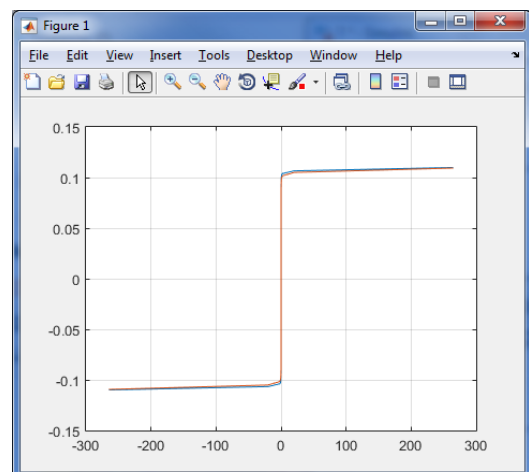
$$i_{0r} = \frac{1}{L_\mu} \int_0^t e_1 dt, \quad (7)$$

где величина $1/L_\mu$ определяется по табличной кривой в зависимости от текущего значения тока i_{0r} .

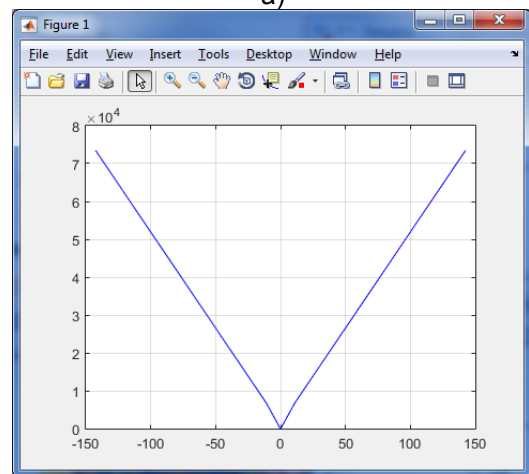
В свою очередь данная кривая рассчитывается по кривой намагничивания трансформатора, заданной в форме $\Psi(i_{0r})$, по формуле

$$V_\mu(i_{0r}) = \frac{1}{L_\mu(i_{0r})} = \frac{\partial i_{0r}}{\partial \Psi_1} \approx \frac{\Delta i_{0r}}{\Delta \Psi_1}. \quad (8)$$

Внешний вид кривых $\Psi(i_{0r})$ и $V_\mu(i_{0r})$ для высокочастотного (6000 Гц) ТАС мощностью 100 кВА [8] представлен на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид кривых $\Psi(i_{0r})$ (а) и $V_\mu(i_{0r})$ (б)

Кривая $\Psi(i_{0r})$ для исследуемого трансформатора может быть построена

как на основе расчета магнитной цепи, так и на основе расчета магнитного поля методом конечных элементов. Магнитная цепь рассчитывается по формуле

$$\Psi_1(i_{0r}) = w_1 \Phi(i_{0r}) = \frac{w_1^2 i_{0r}}{\sum_{i=1}^N \left[v_i \left(\frac{\Phi(i_{0r})}{S_i} \right) \frac{\ell_i}{S_i} \right]}, \quad (9)$$

где w_1 – число витков в первичной обмотке; $\Phi(i_{0r})$ – магнитный поток в сердечнике при заданном значении намагничивающего тока i_{0r} ; N – количество однородных участков магнитопровода; $v_i \left(\frac{\Phi(i_{0r})}{S_i} \right)$ –

удельное магнитное сопротивление стали на i -м участке магнитопровода, рассчитанное по кривой намагничивания для индукции $B_i = \frac{\Phi(i_{0r})}{S_i}$; ℓ_i, S_i – длина и активное

сечение i -го участка магнитопровода соответственно.

Магнитная цепь рассчитывается в нелинейной постановке с итерационным уточнением значений v_i для каждого значения тока i_{0r} .

Для оценки точности расчета магнитной цепи расчет кривой $\Psi(i_{0r})$ можно проверить на полевой модели. Для этого была разработана подсистема генерации и исследования конечно-элементной модели трансформатора с сердечником из аморфной стали бронестержневой конструкции, построенной из типовых кольцевых элементов (рис. 4).

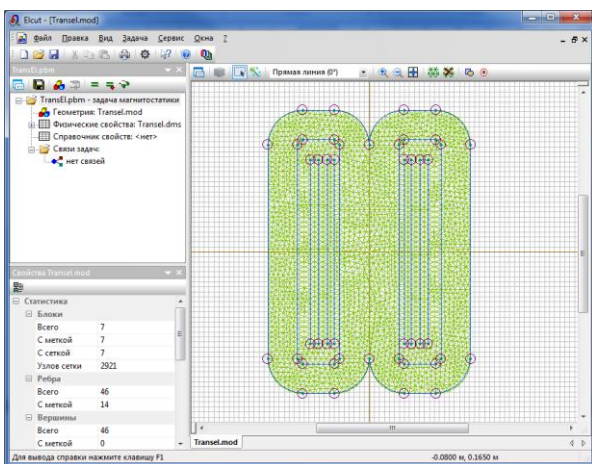


Рис. 4. Конечно-элементная модель ТАС в ELCUT

Данная подсистема интегрирована в САПР однофазных ТАС [10], функционирующую в среде MSExcел, и представляет собой набор макросов VBA, осуществля-

ющих автоматическую генерацию конечно-элементной модели в среде ELCUT и серию расчетов магнитного поля для построения кривой намагничивания трансформатора. Для этого был использован инструмент ActiveField, осуществляющий интерфейс между MSExcел и ELCUT [8]. По полученной с помощью ELCUT кривой $\Psi(i_{0r})$, так же как и в случае расчета магнитной цепи, рассчитывается кривая $V_\mu(i_{0r})$, поставляемая в модель, представленную на рис. 2.

Модель однофазного трансформатора может быть построена и непосредственно по кривой $\Psi(i_{0r})$ без приведения ее к форме $V_\mu(i_{0r})$ (рис. 5).

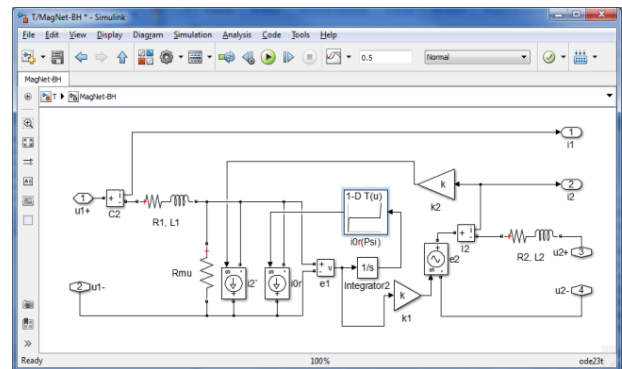


Рис. 5. Модель реального однофазного нелинейного трансформатора на основе кривой $i_{0r}(\Psi_1)$

Кривая намагничивания в этом случае приводится к виду $i_{0r}(\Psi_1)$. Потокосцепление, подаваемое на вход данного звена, определяется по формуле

$$\Psi_1 = \int_0^t e_1 dt \quad (10)$$

по величине ЭДС e_1 , снимаемой с источника тока i_{0r} , управляемого сигналом с выхода звена $i_{0r}(\Psi_1)$. Данная схема проста, надежна и требует меньших подготовительных расчетов.

Результаты исследований. Анализ результатов моделирования проводился на двух вариантах ТАС. В первом варианте мощность трансформатора составляла 1000 ВА, частота сети 50 Гц, магнитная индукция при номинальном напряжении 1,5 Тл. Аморфная сталь китайского производства на основе соединения $Fe_{80}Si_9B_{11}$ практически насыщается уже при $B = 1,4-1,6$ Тл (рис. 6) (так как исходная кривая намагничивания плохо аппроксимировалась кубическими сплайнами, то некоторые ее опорные точки пришлось не-

сколько сдвинуть по отношению к значениям, которые были приведены в технических условиях).

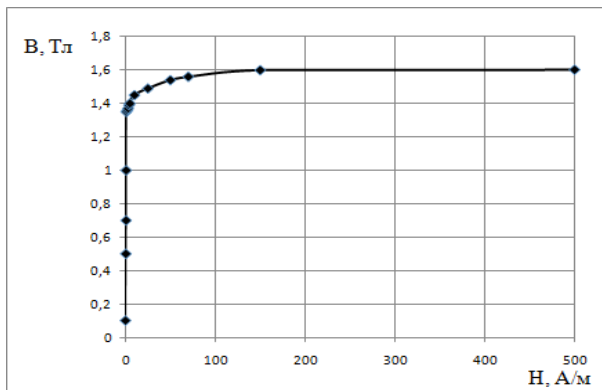


Рис. 6. Кривая намагничивания аморфной стали

Так как кривая намагничивания имеет форму, близкую к прямоугольной, то магнитная цепь трансформатора близка к полному насыщению. Особенно интересным является режим пуска такого трансформатора на холостом ходу (ХХ) при прохождении кривой питающего напряжения через ноль. В частности, на рис. 7 приведены кривые изменения тока первичной обмотки для этого случая, где две кривые (тонкие) соответствуют схеме, представленной на рис. 2, две другие кривые (жирные) – схеме на рис. 5. Сплошные линии соответствуют моделям, кривые намагничивания которых получены из расчета магнитной цепи трансформатора. Пунктирные линии соответствуют моделям, рассчитанным с помощью ELCUT.

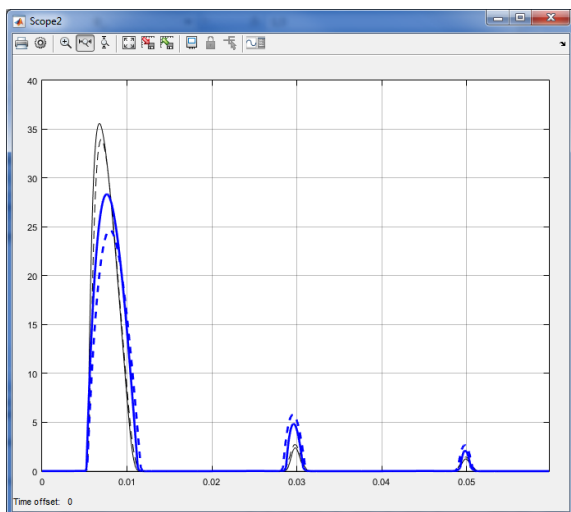


Рис. 7. Кривые пуска насыщенного трансформатора на холостом ходу (увеличено)

Анализ кривых намагничивания, полученных на цепной и полевой моделях (рис. 3,а), показывает, что эти кривые практически совпали, что говорит о высокой точности цепной модели. Однако при моделировании динамики на первом полупериоде чувствуются различия, особенно в модели, представленной на рис. 5. При этом следует помнить, что, так как величина ударного тока в несколько раз превышает амплитудное значение номинального тока, возрастают требования к точности расчета этой величины при проектировании таких трансформаторов.

Различия в результатах работы разных моделей демонстрируют также и кривые установившегося тока ХХ (рис. 8). Однако эти различия касаются, в первую очередь, лишь влияния на сеть высших гармоник, которое существенно ниже в моделях, построенных по схеме рис. 5.

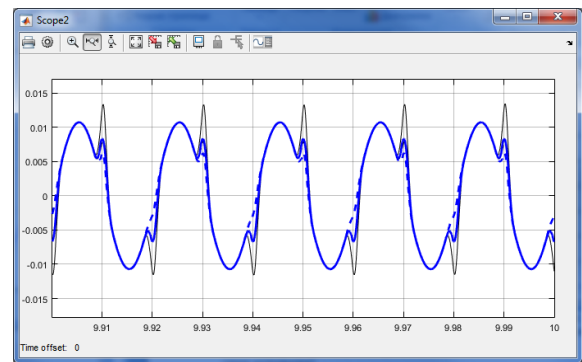


Рис. 8. Кривые установившегося тока холостого хода насыщенного трансформатора

При моделировании пуска трансформатора под нагрузкой (рис. 9, 10) различия в разных моделях также видны в основном только на первых периодах. В установившемся режиме все четыре кривые полностью совпадают.

Второй вариант трансформатора заимствован из [10]. Это высокочастотный трансформатор для зарядной станции автотранспорта мощностью 100 кВА, частота сети 6000 Гц. Магнитная индукция при номинальном напряжении составляет 0,5 Тл. Более высокие значения индукции при таких частотах недопустимы ввиду существенного роста потерь в стали. При этом трансформатор оказывается практически ненасыщенным, что отражается в кривых как при пуске на ХХ, так и под нагрузкой. Так, на рис. 11, 12 все четыре кривые практически полностью совпали.

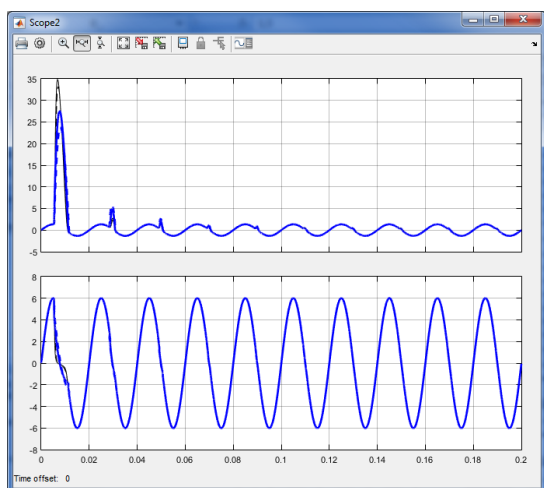


Рис. 9. Кривые пуска насыщенного трансформатора под нагрузкой (вверху – ток первичной обмотки, внизу – вторичной)

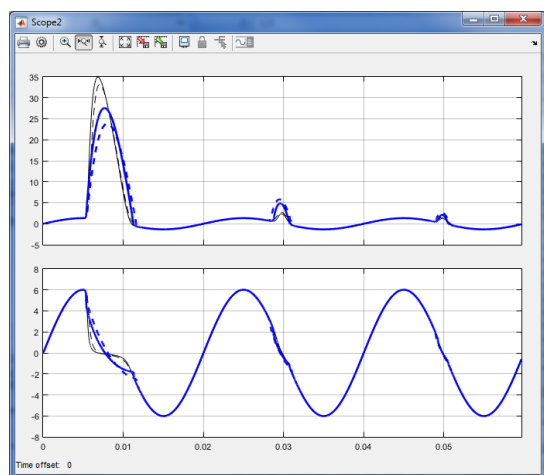


Рис. 10. Кривые пуска насыщенного трансформатора под нагрузкой (увеличено)

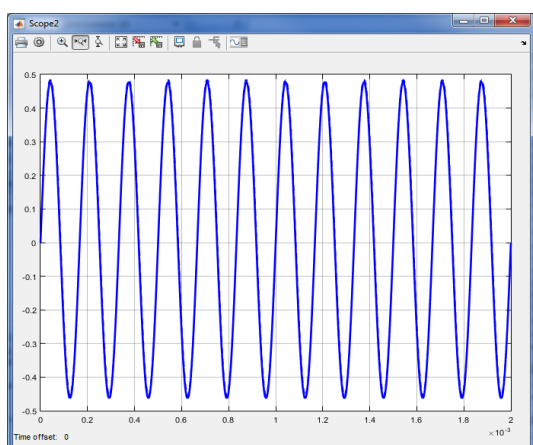


Рис. 11. Кривые пуска высокочастотного трансформатора на холостом ходу

Выводы. Рассмотрены два варианта модели однофазного трансформатора с кривой намагничивания, заданной в форме $\Psi(i_{or})$ и $V_{\mu}(i_{or})$. Расчет кривых намагничивания

трансформаторов может осуществляться как на основе теории магнитных цепей, так и на основе полевых расчетов. Полевые модели более точны, однако цепные модели более просты.

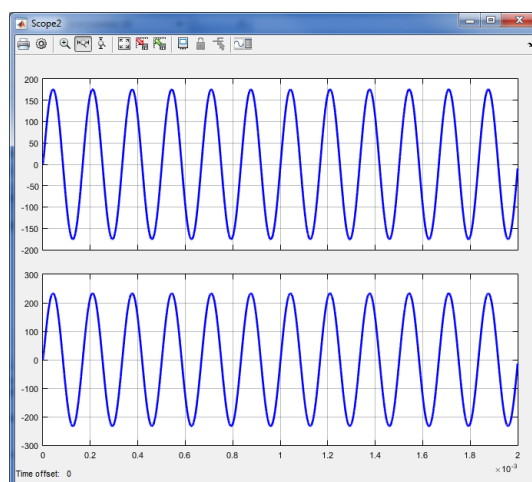


Рис. 12. Кривые пуска высокочастотного трансформатора под нагрузкой

Различие в результатах расчета здесь проявляются в первую очередь при моделировании режима холостого хода в сильно насыщенных трансформаторах. Так как аморфная сталь используется в настоящее время в основном в высокочастотных трансформаторах, в которых магнитная индукция искусственно занижается для уменьшения магнитных потерь, то моделирование динамики трансформатора в этом случае дает практически точный результат как на полевых, так и на цепных моделях. Однако в последнее время все чаще аморфная сталь используется для создания магнитопроводов силовых трансформаторов, работающих на колене кривой намагничивания. Как показали исследования, в этом случае бросок тока при включении трансформатора может в десятки раз превышать номинальный ток, а кривая тока приобретает существенное искажение на первых периодах даже при включении трансформатора на номинальную нагрузку, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ТАС.

Список литературы

1. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. – 384 с.

2. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / под ред. Ц. Масумото; пер. с япон. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.

3. Eliasson A., Elvfing H., Ramanan V.R. Amorphous metal core material shows economic and environmental benefits when pre-existing transformers are to be replaced within vattenfall group's distribution network // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). – Gothenburg, Oct. 2010. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Amorphous-Metal-core-material-shows-economic-and-to-Eliasson-Elvfing/3b5b7e644ebc37e1c2137020ffd4e0b7841d5af0>

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

5. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов в однофазном трансформаторе напряжения / А.В. Кружаев, И.А. Елагин, М.А. Павлейно и др. // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 2. – С. 31–38.

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

7. 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.

8. ELCUT: Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3.1: руководство пользователя. – СПб.: ООО «Тор», 2018. – 483 с.

9. 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.

10. Разработка конструкции и методики проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.В. Еремин, А.В. Плаксин // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 57–65.

3. Eliasson, A., Elvfing, H., Ramanan, V.R. Amorphous metal core material shows economic and environmental benefits when pre-existing transformers are to be replaced within vattenfall group's distribution network. Published in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Oct. 2010, Gothenburg. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Amorphous-Metal-core-material-shows-economic-and-to-Eliasson-Elvfing/3b5b7e644ebc37e1c2137020ffd4e0b7841d5af0>

4. Evdokunin, G., Dmitriev, M. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы [Transformers in the electrical network. Simulation of transients taking into account the magnetic system configuration]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no. 5(53), pp. 2–7.

5. Kruzhaev, A.V., Elagin, I.A., Pavleyno, M.A., Dmitriev, V.A., Chaly, A.M. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов в однофазном трансформаторе напряжения [Computer simulation and experimental study of transients in a single-phase voltage transformer]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2015, vol. 85, no. 2, pp. 31–38.

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

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

8. ELCUT: *Modelirovanie elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh poley metodom konechnykh elementov. Versiya 6.3.1: rukovodstvo pol'zovatelya* [ELCUT: Simulation of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method. Version 6.3.1: user manual]. Saint-Petersburg: ООО «Тор», 2018. 483 p.

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

10. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Eremin, I.V., Plaksin, A.V. Razrabotka konstruksii i metodiki proektirovaniya vysokochastotnykh transformatorov s serdechnikom iz amorfnykh splavov [Development of the design and design technique for high-frequency transformers with an amorphous alloy core]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 57–65.

References

1. Starodubtsev, Yu.N., Belozarov, V.Ya. *Magnitnye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskikh splavov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta. 384 p.

2. Sudzuki, K., Fudzimori, Kh., Khasimoto, K. *Amorfnye metally* [Amorphous metals]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 328 p.

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

Каржевин Андрей Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина», аспирант, e-mail: drusja95@gmail.com
Karzhevin Andrei Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: drusja95@gmail.com

Подобный Александр Викторович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени 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

Дрязгов Дмитрий Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина», магистрант, e-mail: crus943@gmail.com
Dryazgov Dmitry Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Master course student, e-mail: crus943@gmail.com

УДК 621.313

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЩЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИВОДА ЛЕБЕДКИ

М.В. САХАРОВ¹, В.Н. КАРАУЛОВ²

¹ ООО «Эльмаш (УЭТМ)», Екатеринбург, Российская Федерация

² ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: sakharov_mv@uetm.ru¹; karaulov@em.ispu.ru²

Авторское резюме

Состояние вопроса. При проектировании синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки необходимо учитывать особенности этой машины. Двигатель имеет обращенную конструкцию с ограниченными размерами, питается от преобразователя частоты, запускается при номинальной частоте питания и номинальной нагрузке без использования демпферной обмотки и частотного пуска, обеспечивает требуемый диапазон скоростей намотки каната. Специализированная инженерная методика проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки отсутствует. Требуется внести изменения и дополнения в существующие методики проектирования синхронных машин при решении задачи проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки.

Материалы и методы. При проектировании и выполнении поверочного электромагнитного расчета синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки использована методика проектирования машин с постоянными магнитами В.А. Балагурова и методика проектирования общепромышленных синхронных машин с электромагнитным возбуждением. Методики реализованы в среде Mathcad. Для моделирования электромеханических процессов и теплового состояния синхронного двигателя с постоянными магнитами использованы их полевые модели.

Результаты. Разработана методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки, отличающаяся от известных и обеспечивающая за счет этого учет особенности конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами при расчете размеров машины, магнитов, сердечника статора, при выборе электромагнитных нагрузок, проектировании обмотки статора, выборе системы охлаждения и марки стали сердечника статора. Специфические требования технического задания учтены при расчете числа полюсов и частоты питающего напряжения. Выполнен проект обращенного синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки. Представлены результаты проектирования и поверочных расчетов.