

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

### РАЗРАБОТКА 2D-МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ПОРОЖДАЮЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ<sup>1</sup>

А.И. ТИХОНОВ<sup>1</sup>, А.В. СТУЛОВ<sup>2</sup>, И.С. СНИТЬКО<sup>1</sup>, А.В. ПОДОБНЫЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск, Российская Федерация  
E-mail: aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru, irant-kin@yandex.ru, aleksandr.rash@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Актуальной является задача разработки технологий порождающего проектирования, решающего задачи структурной оптимизации и цифровых двойников, представляющих собой имитационные модели устройств с точностью не ниже 95 %. Данные технологии реализуются, как правило, на основе 3D-моделей физических полей, например, с использованием пакетов ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, требовательных к компьютерным ресурсам и к квалификации проектировщиков. Однако достаточная для цифровых двойников трансформаторов точность может быть достигнута при использовании цепных и 2D-полевых моделей. В связи с этим актуальной является разработка моделей, используемых для расчета трансформатора с точностью и способностью к учету особенностей конструкции конкретного устройства, характерной для цифровых двойников, что может найти применение в порождающем проектировании трансформаторов и при исследовании режимов их работы при эксплуатации.

**Материалы и методы.** Использован метод конечных элементов, реализованный средствами библиотеки EMLib (авторская разработка), позволяющей рассчитывать магнитные поля в 2D-постановке, а также методы имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SymPowerSystem.

**Результаты.** Оценены допущения, принимаемые при имитационном моделировании силового трансформатора, – возможность использования цепных и 2D-полевых моделей без учета анизотропии стали с граничными условиями Дирихле при расчете потоков рассеяния. Разработаны 2D-полевые модели для расчета основного потока и потоков рассеяния, которые могут быть положены в основу технологии цифровых двойников и порождающего проектирования трансформаторов. Приведена имитационная модель трансформатора, реализованная в MatLab Simulink. Показана возможность использования приведенных моделей для диагностирования неисправностей трансформатора. Приведены результаты моделирования трансформатора с дефектом.

**Выводы.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании трансформаторов для поиска оптимальных исполнений и исследования результатов проектных решений без создания

<sup>1</sup> Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 18-43-370012 от 09.06.2018, и Фонда содействия инновациям, номер договора 17ГРЦТС10-D5/56171 от 12.12.2019.

опытных образцов, а также при эксплуатации трансформаторов для оценки их повреждений по результатам испытаний без демонтажа.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, порождающее проектирование, метод конечных элементов, имитационное моделирование трансформаторов

## DEVELOPMENT OF 2D MODELS OF THE MAGNETIC FIELD FOR DIGITAL TWIN TECHNOLOGY AND GENERATIVE DESIGN OF POWER TRANSFORMERS

A.I. TIKHONOV<sup>1</sup>, A.V. STULOV<sup>2</sup>, I.S. SNITKO<sup>1</sup>, A.V. PODOBNYJ<sup>1</sup>

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

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

E-mail: aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru, irant-kin@yandex.ru, aleksandr.rash@mail.ru

### Abstract

**Background.** The development of generative design technologies that solve the problems of structural optimization and digital twins, that is simulation models of devices with at least 95 % accuracy, is an urgent task. These technologies are usually implemented on the basis of 3D models of physical fields, for example, using ANSYS Maxwell or COMSOL Multiphysics packages, which are demanding in terms of computer resources and designer skills. However, the sufficient accuracy for transformer digital twins can be achieved using chain and 2D field models. The article aims to develop the models to calculate the transformer with the accuracy and ability to take into account the design features of a particular device, which is characteristic of digital twins. This can be used in generative design of transformers and in the study of their operation modes.

**Materials and methods.** The finite element method implemented via the authoring EMLib library which allows calculating magnetic fields in a 2D formulation was used. The simulation methods using the MatLab Simulink SymPowerSystem package were also employed.

**Results.** The assumptions made during the power transformer simulation have been estimated. They include the possibility of using chain and 2D field models without taking into account the steel anisotropy with Dirichlet boundary conditions when calculating the scattering fluxes. 2D field models have been developed for calculating the main flux and scattering fluxes, which are able to form the basis for digital twin technology and generative design of transformers. A simulation model of a transformer implemented in MatLab Simulink has been provided. The possibility of using the models for diagnosing transformer faults has been demonstrated. The simulation results of a transformer with a defect have been presented.

**Conclusions.** The results obtained can be used in the development of transformers to search for optimal designs and to study the results of design decisions without creating prototypes. The findings can also be applied while operating the transformers to assess the damage and failures without dismantling and according to the test results.

**Key words:** digital twins, generative design, finite element method, simulation of transformers

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.3.032-043

**Введение.** Одним из приоритетов государственной политики России, обозначенных в рамках «Национальной технологической инициативы» (НТИ) РФ, является цифровизация экономики [1]. В сфере производства это касается, в первую очередь, использования высокотехнологичных интеллектуальных систем при проектировании и эксплуатации технических объектов. Отставание в данном направлении неизбежно приведет к проигрышу в конкуренции. Поэтому даже в рамках предприятий малого и среднего бизнеса четко просматривается необходимость цифровых технологий, связанных с такими понятиями, как

«порождающее проектирование» и «цифровые двойники».

Под порождающим проектированием понимается технология, основанная, в первую очередь, на полевых 3D-моделях физических процессов, самостоятельно формирующих облик проектируемых изделий под заданные конструктором условия их будущего функционирования [2]. Порождающее проектирование является следующей ступенью развития CAD/CAE-систем, на которой основное внимание уделяется поиску оптимальной формы или конструкции проектируемого изделия исходя из условий ее работы [3]. В определен-

ном смысле порождающее проектирование является продолжением идеи топологической оптимизации, позволяющей находить новые конструктивные решения на стадии проектирования технических устройств. Например, в [4] приведен пример оптимизации детали (кронштейна) с использованием пакета Autodesk Inventor Professional. Следует отметить, что идеи порождающего проектирования в настоящее время реализуются, главным образом, в области машиностроения. Научные работы в области порождающего проектирования электрических машин и трансформаторов пока отсутствуют.

Так как при порождающем проектировании возникают условия для порождения новых исполнений проектируемого устройства, для которых не существует апробированных методик инженерного расчета, то данная технология тесно связана с другим характерным направлением развития экономики, связанным с понятием цифровых двойников.

Под цифровыми двойниками понимаются виртуальные прототипы технических устройств, представляющие собой наукоемкие модели, позволяющие с высокой точностью (95 % и выше) имитировать эти устройства в различных режимах работы. При проектировании это дает возможность оценивать результаты проектных решений без необходимости создания опытных образцов, что существенно снижает материальные затраты на проектирование особенно в условиях штучного или мелкосерийного производства. Как и в случае порождающего проектирования, для создания цифровых двойников используются, как правило, CAE-технологии, работающие с 3D-моделями, такие как ANSYS [5], CADFEM [6], COMSOL [7]. К сожалению, практически все публикации по теме цифровых двойников в настоящее время являются, как правило, либо рекламными статьями, либо краткими сообщениями о проводимых в этой области работах, не несущими научной конкретики, например [8]. Однако есть статьи, в которых отражены возможности моделирования процессов в трансформаторах с использованием 3D- и 2D-моделей (например, [9, 10, 11]). Правда, таких публикаций также мало.

Главная проблема, возникающая при таком подходе в приложении к предприятиям малого и среднего бизнеса, состоит в

невозможности приобретения коммерческой лицензии на использование данных дорогостоящих технологических платформ. Подготовка кадров для работы с этими платформами также является значительной проблемой.

В то же время, если рассматривать конкретно сферу электромашиностроительного и трансформаторостроительного производства, необходимо отметить, что создание точных полевых моделей, позволяющих имитировать произвольные режимы работы электрических машин и трансформаторов произвольной конструкции, может быть осуществлено с использованием 2D-моделей, которые не только проще и доступней, но и зачастую гораздо точнее 3D-моделей. В частности, в [12] приведена методика оптимизации коллекторных машин с использованием технологии [13], основанной на 2D-модели магнитного поля. При оптимизации на каждом шаге поиска решения с использованием генетических алгоритмов полностью перестраивается конечно-элементная модель, обеспечивая при этом выход на изначально непредсказуемые варианты конструктивных исполнений, что полностью соответствует идее порождающего проектирования. Для спроектированной таким образом машины осуществляется серия расчетов магнитного поля, результаты которой используются в цепной модели динамических режимов работы машины, с помощью которой можно сымитировать произвольные режимы работы машины с учетом особенностей ее конструкции, что полностью соответствует понятию цифрового двойника.

Приведенная в [12] технология исследований может быть адаптирована и к силовым трансформаторам. Математическая модель, на основе которой может быть построен цифровой двойник трансформатора, подробно рассмотрена в [14]. Здесь отмечено, в частности, что магнитопровод трансформатора может быть достаточно точно смоделирован с использованием теории магнитных цепей. Однако ряд параметров, таких как магнитное сопротивление поля нулевой последовательности и индуктивность рассеяния обмоток, требуют расчета магнитного поля.

Ниже проведена оценка допущений, используемых при моделировании силового трансформатора с точностью, позволяющей говорить о том, что данные модели

могут быть отнесены к классу цифровых двойников, на которых можно не только исследовать работу спроектированного трансформатора, но и реализовать технологию порождающего проектирования.

**Методы исследования.** Силовой трансформатор относится к статическим устройствам, основанным на индукционном принципе преобразования энергии. Это значит, что с точки зрения функционального моделирования определяющее значение в данном случае имеет знание точной картины магнитного поля в различные моменты времени. Так как при промышленной частоте 50 Гц электромагнитным излучением энергии можно пренебречь, то для анализа режимов работы достаточно использовать модель квазистационарного магнитного поля. Это существенно упрощает задачу.

В то же время с точки зрения картины магнитного поля трансформатор традиционно относится к типичным объектам, для которых необходимо использовать именно 3D-модели, что требует значительных вычислительных ресурсов и опыта моделирования. В реальном проектировании количество таких задач желательно минимизировать.

Одним из главных требований, предъявляемых к инженерным моделям наряду с требованиями адекватности и точности, является требование максимальной простоты. В случае полевых задач наиболее распространенным является метод редукции размерности задачи, например сведение 3D-задачи к одной или нескольким 2D-задачам без потери точности.

Понятно, что 2D-модель магнитного поля в плоскопараллельной постановке (рис. 1) принципиально не подходит для расчета потоков рассеяния. Однако сравнение результатов расчета величины основного магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, полученных на этой модели, с результатами расчета магнитного поля в 3D-постановке дает расхождение, не превышающее 2–3 % (например, в тестовой задаче расчета магнитного поля трансформатора ТМГ–1000–10/0,4 величина основного магнитного потока составила 0,0474 Вб при расчете на 3D-модели в Comsol Multyphysics и 0,0484 Вб – при расчете на 2D-модели в EMLib; расхождение составило 2,1 %). При этом ввиду возможности генерации более детальной конечно-элементной (КЭ) сетки в 2D-постановке

может быть обеспечена более высокая точность расчета, чем в 3D-постановке.

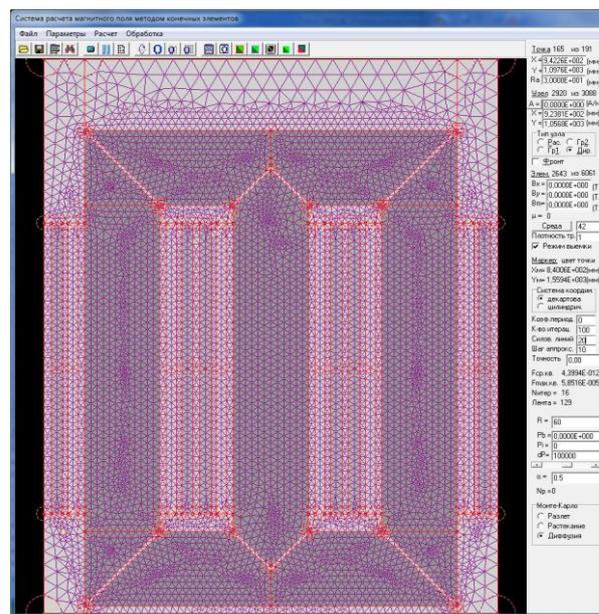


Рис. 1. Конечно-элементная модель силового трансформатора, созданная библиотекой EMLib

Следует отметить, что сечение стержня и ярма в 2D-модели (рис. 1) имеет форму прямоугольника, а не ступенчатой фигуры, вписанной в окружность или эллипс, как в реальном трансформаторе. При этом ширина сердечника  $b_c$  принималась равной ширине наибольшего пакета электротехнической стали, а толщина (размер в третьем измерении) рассчитывалась как

$$a_c = \frac{S_a}{b_c}, \quad (1)$$

где  $S_a$  – активное сечение стали стержня.

Именно при этом допущении 2D-модель обеспечивает точность расчета основного потока не менее 95 %, что требуется для создания цифрового двойника.

Бак трансформатора обычно изготавливается из стали (ферромагнитный материал), толщина которой мала по сравнению с размерами трансформатора. При триангуляции бака элементы сетки зачастую оказываются вытянутыми, что вносит дополнительную погрешность в расчет. Для упрощения модели желательно стенку бака не учитывать, а границу области провести по внутренней стороне бака. Для этого было проведено исследование эффекта вытеснения тока в стенке бака от полей рассеяния на тестовых моделях нестационарных

нарного магнитного поля в ELCUT (рис. 2). В результате было получено, что уже на частоте  $f = 50$  Гц магнитный поток практически полностью вытесняется из массива железа (величина потока в железе на два порядка меньше полного потока рассеяния), что позволяет с высокой степенью точности принять допущение о возможности заменить бак границей Дирихле.

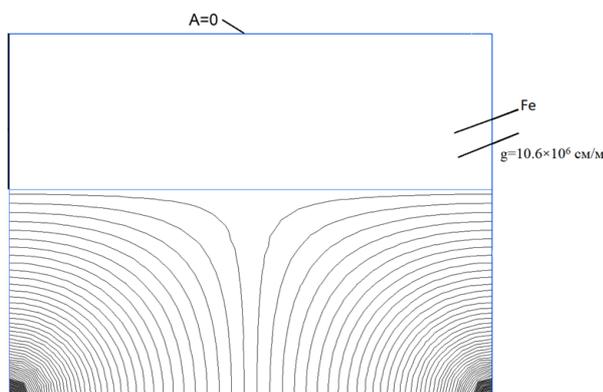


Рис. 2. Картина нестационарного магнитного поля вблизи массивной железной стенки

Для учета наличия технологических зазоров, возникающих при шихтовке магнитопровода, в модели на рис. 1 предусмотрены расчетные немагнитные вставки, толщина которых  $\delta$  выбирается из условия достижения максимальной точности расчета в методе конечных элементов (элементы должны иметь форму, близкую к равнобедренному треугольнику). Магнитная проницаемость данной вставки определяется из условия равенства магнитного сопротивления расчетных вставок магнитному сопротивлению реального технологического зазора:

$$\mu_{\delta} = \mu_0 \frac{\delta_{ТЗ}}{\delta}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\delta_{ТЗ}$  – расчетная ширина технологического зазора.

Так как  $\delta_{ТЗ}$  – это расчетная величина, зависящая от технологических особенностей конкретного производства, то на практике для расчета величины  $\mu_{\delta}$  рекомендуется алгоритм, основанный на итерационной серии расчетов магнитного поля трансформатора в режиме холостого хода (ХХ) при амплитудном значении тока ХХ в средней фазе (рис. 3). Искомое значение  $\mu_{\delta}$  соответствует расчету, в котором первичное напряжение равно

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot f w_1 \Phi_m, \quad (3)$$

где  $U_1$  – напряжение сети;  $E_1$  – ЭДС первичной обмотки;  $f$  – частота сети;  $w_1$  – число витков в первичной обмотке;  $\Phi_m$  – амплитудное значение основного магнитного потока.

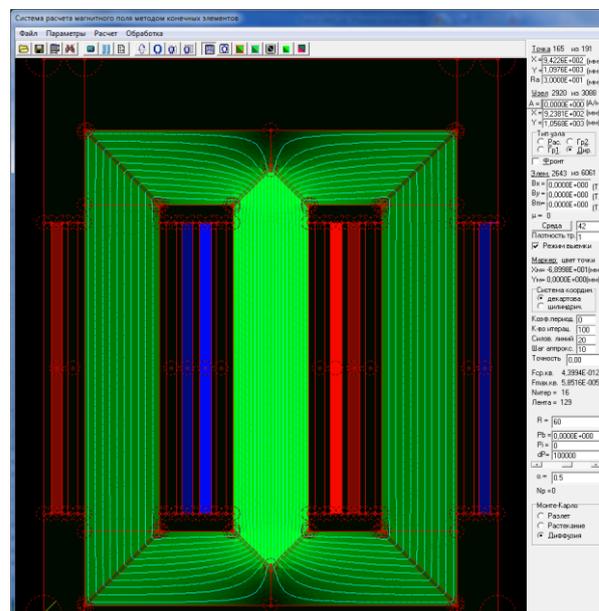


Рис. 3. Результаты расчета магнитного поля в режиме ХХ для момента времени, соответствующего максимальному току в средней фазе

Реальное значение тока ХХ может быть найдено только по результатам экспериментальных испытаний. На этапе проектирования данное значение может быть определено по приближительной формуле, приведенной в РД 16 317-86 «Трансформаторы силовые. Расчет потерь и тока холостого хода».

В условиях реального производства рекомендуется на основе серии экспериментальных измерений и численных расчетов на приведенной модели построить зависимость  $\mu_{\delta} = f(\delta')$ , где  $\delta' = \delta/d_c$  – относительная ширина немагнитной вставки;  $\delta$  – ширина вставки, найденная по приведенной методике для конкретного трансформатора;  $d_c$  – диаметр стержня. Такая зависимость позволяет однозначно определять значение  $\mu_{\delta}$  на этапе проектирования, причем с учетом специфики технологического процесса конкретного производства.

КЭ-модель трансформатора, калиброванная таким образом, оставаясь двумерной, позволит определять величину основного магнитного потока не только с учетом технологического зазора, что не всегда находит отражение в подобном рода мо-

делях, но и с учетом возможной несимметрии магнитопровода, вызванной, например, ударными электродинамическими воздействиями при коротком замыкании (КЗ) или некачественной шихтовкой.

Необходимость учета анизотропии электротехнической стали при создании цифровых двойников силовых трансформаторов также требует оценки. Здесь следует учесть, что использование в модели расчетных немагнитных вставок приводит к тому, что в области углов магнитопровода силовые линии искривляются практически под прямым углом (см. рис. 3). Даже при использовании изотропной стали составляющая магнитной индукции в направлении, перпендикулярном направлению проката стали, в стержнях на шесть порядков меньше составляющих магнитной индукции вдоль проката. Исключение составляют участки ярма в области среднего стержня, где силовые линии идут под некоторым углом к направлению проката. Однако даже если мы в исследованиях для всех областей ярма используем кривую намагничивания, соответствующую направлению силовых линий магнитного поля поперек проката, то расхождение в величине основного магнитного потока составляет около 1 %. Это значит, что усложнять задачу дополнительным учетом анизотропии в средних областях ярма не следует.

Для учета влияния технологических отверстий в сердечнике на величину основного потока было проведено исследование в Comsol Multyphysics в 2D- и 3D-постановке с учетом анизотропии стали и без учета (рис. 4).

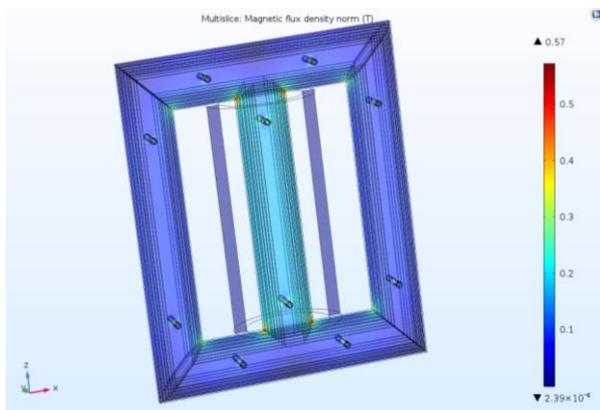


Рис. 4. Исследование влияния технологических отверстий в магнитопроводе на величину основного магнитного потока

Расхождение с вариантом 2D-модели без анизотропии и без отверстий составило:

- 0,027 % в 2D-модели без анизотропии;
- 0,022 % в 2D-модели с анизотропией;
- 0,99 % в 3D-модели без анизотропии;
- 1,6 % в 3D-модели с анизотропией.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что расхождения находятся в пределах допустимой точности инженерных расчетов. Поэтому для упрощения модели влиянием технологических отверстий можно пренебречь без существенной потери точности.

Особый подход к моделированию необходимо применить для учета потоков полей рассеяния. Расчет магнитного поля на 3D-модели показывает, что поток рассеяния силового трансформатора существенно меньше основного потока (в 50–100 раз и более). Например, как уже отмечалось, расчет основного потока трансформатора ТМГ–1000–10/0,4 дал величину 0,0474 Вб, в то время как поток рассеяния составил всего 0,00044 Вб. То есть величина потока поля рассеяния, по сути, находится в области погрешности метода конечных элементов.

Таким образом, поток рассеяния необходимо рассчитывать отдельно. При этом эффективность использования для этого 3D-моделей на компьютерах с обычной производительностью является спорной. В то же время достаточно оправданным в данном случае является использование 2D-модели, в которой учитывается осевая симметрия (рис. 5). В данной модели магнитопровод полностью исключен, а на всей границе расчетной области задается условие Дирихле, что соответствует полному вытеснению магнитного поля рассеяния из железа бака и железа магнитопровода, что соответствует принятым допущениям. Намагничивающие силы обмоток принимаются равными и противоположными по знаку, что соответствует условиям проведения опыта короткого замыкания. Поток рассеяния каждой  $k$ -й обмотки рассчитывается по формуле

$$\Phi_{\sigma k} = 2\pi\Psi_k, \quad (4)$$

где  $\Psi_k = r_k A_k$  – функция векторного магнитного потенциала  $A_k$  в точке радиусом  $r_k$  относительно оси симметрии (положение точки выбирается приблизительно в середине  $k$ -й обмотки из условия нахождения максимального по модулю значения функции  $\Psi_k$ ; при этом точка с нулевым значени-

ем функции  $\Psi_k$  лежит приблизительно в центре главного канала).

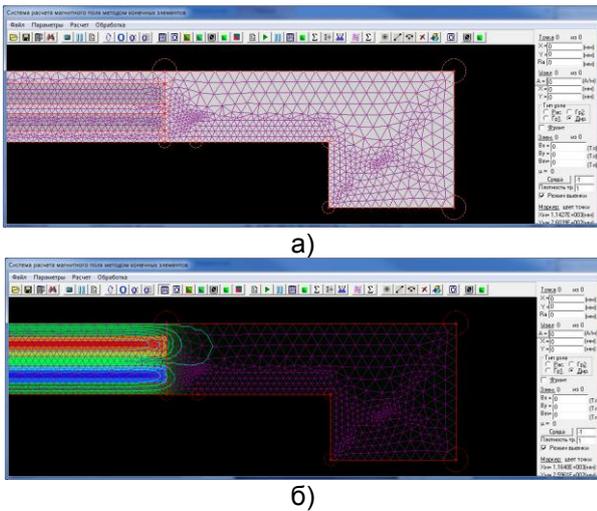


Рис. 5. Фрагмент осесимметричной модели трансформатора для расчета индуктивности рассеяния обмоток (а) и картина поля рассеяния (б)

Соответственно, индуктивность рассеяния каждой  $k$ -й обмотки определяется как

$$L_{\sigma k} = \frac{\Psi_{\sigma k}}{i_k},$$

где  $\Psi_{\sigma k}$  – потокосцепление  $k$ -й обмотки в опыте короткого замыкания;  $i_k$  – ток в  $k$ -й обмотке.

Рассмотренные особенности картины основного магнитного поля трансформатора (высокая степень однородности, слабое поле рассеяния, слабое влияние дополнительных факторов) говорят о том, что с достаточной для цифровых двойников точностью для расчета основного магнитного поля достаточно использовать теорию магнитных цепей. Магнитная цепь в большинстве случаев имеет вид, представленный на рис. 6.

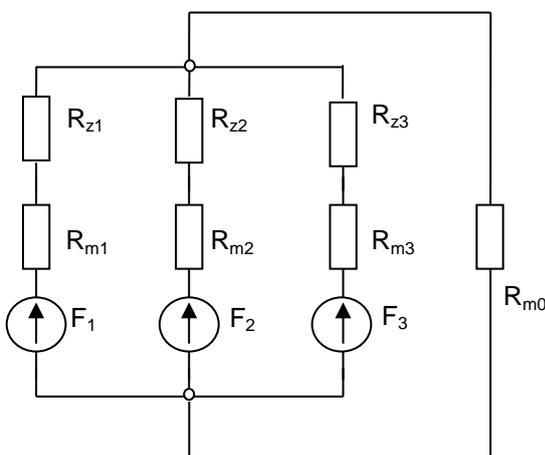


Рис. 6. Магнитная цепь силового трансформатора

На рис. 6 приведены следующие обозначения:  $R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}$  – магнитные сопротивления ветвей схемы замещения, которые рассчитываются по формуле

$$R_{mk} = v(B_k) \begin{cases} \frac{l_s}{S_s} + \frac{2l_a}{S_a} & \text{при } k = 1, 3, \\ \frac{l_s}{S_s} & \text{при } k = 2; \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{zk} = \frac{\delta_{ТЗ}}{2\sqrt{2} \cdot \mu_0 S_s}; \quad (6)$$

$F_1, F_2, F_3$  – намагничивающие силы стержней, которые рассчитываются по формулам  $F_k = i_{0rk} w_1$ ;

$R_{m0}$  – магнитное сопротивление потока нулевой последовательности.

Здесь  $v(B)$  – кривая намагничивания электротехнической стали в направлении проката стали в форме зависимости удельного магнитного сопротивления стали от индукции (рис. 7);  $l_s$  – длина средней линии стержня до линий стыка;  $l_a$  – длина средней линии половины ярма до линий стыка;  $S_s, S_a$  – активное сечение стержня и ярма соответственно;  $\delta_{ТЗ}$  – расчетное значение технологического зазора между стержнем и ярмом;  $i_{0rk}$  – намагничивающий ток  $k$ -й фазы;  $w_1$  – число витков в первичной обмотке.

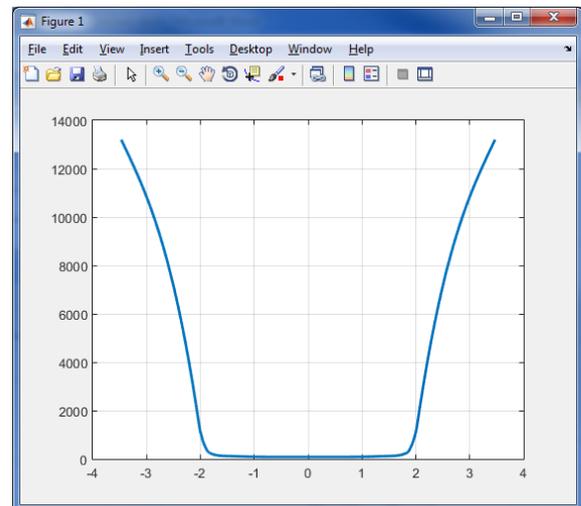


Рис. 7. Кривая намагничивания электротехнической стали в форме  $v(B)$

Для расчета магнитного сопротивления нулевой последовательности предлагается использовать модель, представленную на рис. 8, аналогичную модели на рис. 5, но с заданием тока только в первичной обмот-

ке, равным амплитуде намагничивающего тока  $i_{0m}$ . При этом

$$R_{m0} = \frac{\Phi_0}{i_{0m} W_1}, \quad (8)$$

где  $\Phi_0$  – найденный из модели на рис. 7 магнитный поток.

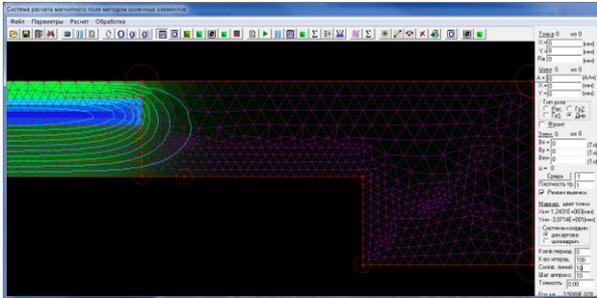


Рис. 8. Осесимметричная модель для расчета магнитного сопротивления поля нулевой последовательности

Таким образом определяются практически все параметры электрической схемы замещения, которая может быть использована для создания цифрового двойника трансформатора (рис. 9) и отличается от схемы, приведенной в [14], только элементом  $R_z$ , посредством которого учитывается вклад технологических зазоров в стыках стержней с ярами.

Для определения уточненных номиналов сопротивлений  $R_{mUA}$ ,  $R_{mUB}$ ,  $R_{mUC}$ , учитывающих потери мощности в магнитопроводе, предлагается следующий алгоритм. Сначала осуществляется предварительная

оценка величины данных сопротивлений. Для этого реализуется серия расчетов магнитного поля на модели, представленной на рис. 3, в режиме ХХ при разных значениях токов ХХ в разных фазах на периоде при допущении о симметрии и синусоидальном характере изменения данных токов. В каждом  $i$ -м элементе КЭ сетки  $k$ -го стержня и прилегающих к нему участков ярма определяется максимальная за период величина магнитной индукции  $B_{mik}$ . Предварительные значения потерь ХХ  $k$ -го стержня рассчитываются по формуле

$$P_{0k} = \gamma a_c k_p^e k_p^u \sum_{i=1}^{N_{\Delta k}} p(B_{mik}) S_{\Delta ik} + 2\sqrt{2} S_a p_3 \left( \frac{B_{mik}}{\sqrt{2}} \right), \quad (9)$$

где  $\gamma$  – плотность стали;  $a_c$  – приведенная толщина пакета электротехнической стали, найденная по (1);  $k_p^e, k_p^u$  – коэффициент увеличения потерь за счет действия остаточных механических напряжений в стали и коэффициент увеличения потерь за счет искажения формы кривой магнитной индукции соответственно, принятые по рекомендациям [15];  $p(B_{mik})$  – удельные потери в стали, найденные по кривой потерь при индукции  $B_{mik}$ ;  $S_{\Delta ik}$  – площадь  $i$ -го треугольного элемента  $k$ -го стержня и прилегающих к нему участков ярма;  $S_a$  – активная площадь стержня;  $p_3$  – удельные потери в стали в зоне стыка, найденные по рекомендациям [15] в зависимости от  $B_{mik}$ .

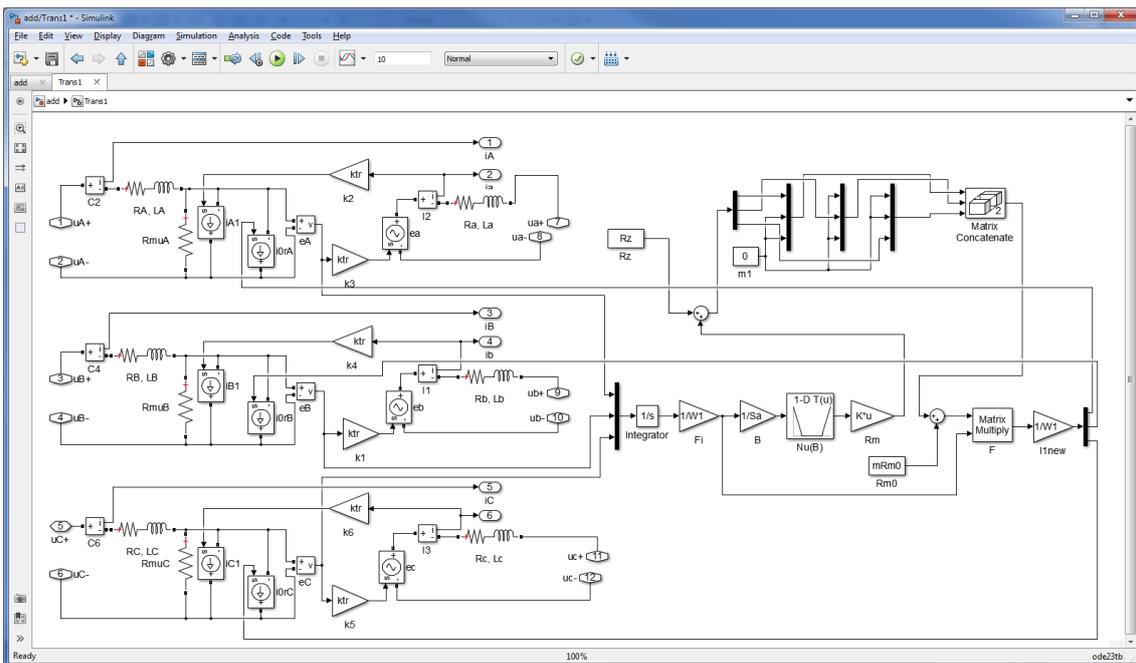


Рис. 9. Схема динамической модели трехфазного трансформатора в MatLab Simulink SimPowerSystem

Затем рассчитывается первое приближение сопротивлений ветвей намагничивания фаз:

$$R_{muk} = \frac{U_1^2}{P_{0k}}. \quad (10)$$

Подставляем данные сопротивления в соответствующие ветви на схеме рис. 9 и рассчитываем модель в режиме включения трансформатора на XX. По результатам расчета активных составляющих токов XX в фазах трансформатора в установившемся режиме, которые в данном случае будут иметь несинусоидальный характер, рассчитываем усредненные за период потери (расчет осуществляется в серии полевых расчетов при найденных мгновенных значениях токов фаз):

$$P_{0k} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \left( \gamma a_c k_p^e k_p^u \sum_{i=1}^{N_{ak}} p(B_{mikj}) S_{\Delta ik} + 2\sqrt{2} S_a p_3 \left( \frac{B_{mikj}}{\sqrt{2}} \right) \right) \Delta t_j, \quad (11)$$

где  $n$  – количество шагов интегрирования на периоде;  $\Delta t_j$  –  $j$ -й шаг интегрирования.

После этого по (10) вычисляем уточненные значения сопротивлений ветвей намагничивания фаз, которые подставляем в модель цифрового двойника трансформатора, схема которого изображена на рис. 9.

В проектировании цифровой двойник в рассмотренной здесь версии может использоваться на стадии поверочного расчета. Однако КЭ-модель с приведенными здесь допущениями может использоваться также и при построении функции цели оптимизации трансформатора. При этом на каждом шаге поиска при обращении к функции цели осуществляется полная перестройка КЭ-модели трансформатора по тем размерам, которые определяются текущими значениями варьируемых параметров, с последующим расчетом магнитного поля и использованием результатов данного расчета при вычислении конкретных критериев целевой функции.

Для этого был создан параметрический генератор КЭ-модели силового трансформатора, который позволяет автоматически генерировать серии полевых моделей по заданному списку величин, определяющих как геометрию расчетной области, так и конструкцию трансформатора (стержневая, бронестержневая, витая или пространственная конструкция магни-

топровода, разные типы обмоток и т.п.) аналогично тому, как это было реализовано в [13] для решения задачи оптимизации конструкции коллекторной машины. Поиск оптимального решения при этом осуществляется с использованием генетического алгоритма, позволяющего успешно справиться с проблемой дискретности и разрывности целевой функции.

В такой постановке задача оптимизация полностью соответствует понятию порождающего проектирования.

**Результаты исследований.** В качестве результатов проведенного исследования рассмотрим решение задачи включения трансформатора на XX при условии, что перед этим в трансформаторе произошло трехфазное короткое замыкание и под действием электродинамических усилий магнитопровод несколько деформировался.

Например, примем, что верхнее ярмо сместилось таким образом, что зазоры в стыках стержней с верхним ярмом стали составлять соответственно 0,1 мм, 1 мм и 2 мм (исходный зазор составлял 0,1 мм во всех стыках). Расчет осуществлялся с использованием модели, приведенной на рис. 9.

Результат расчета установившегося тока XX трансформатора до повреждения представлен на рис. 10. Анализ полученных результатов показывает, в частности, что токи XX в двух крайних фазах симметричны друг другу, ток в средней фазе ожидаемо отличается.

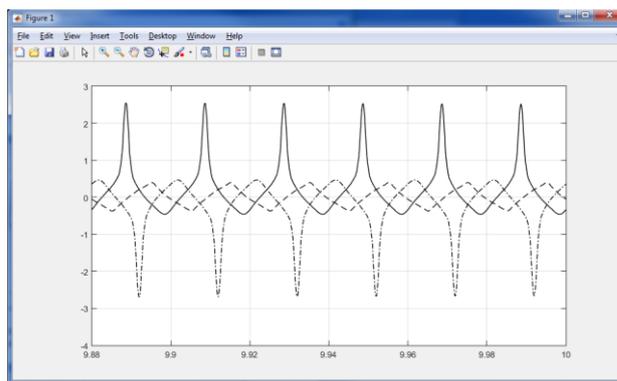


Рис. 10. Установившиеся фазные токи XX в трансформаторе с одинаковыми по стержням технологическими зазорами ( $\delta_{T3} = 0,1$  мм)

Для выполнения условий задачи моделирования трансформатора с повреждением по (6) был осуществлен пересчет магнитных сопротивлений технологических

зазоров. Магнитопровод стал несимметричным, что отразилось на кривых включения трансформатора на ХХ (рис. 11). Для сравнения на рис. 12 кривые токов ХХ до повреждения (тонкие линии) и после повреждения (толстые линии) наложены друг на друга.

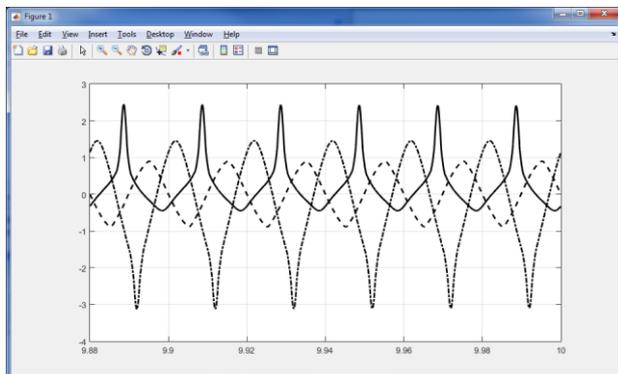


Рис. 11. Установившиеся фазные токи ХХ в трансформаторе с разными по стержням технологическими зазорами ( $\delta_{Т31} = 0,1$  мм,  $\delta_{Т32} = 1$  мм,  $\delta_{Т33} = 2$  мм)

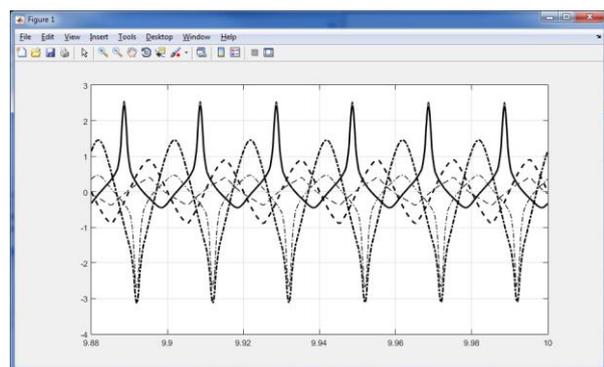


Рис. 12. Сравнение токов ХХ до повреждение (тонкие линии) и после (толстые линии)

Анализ полученных результатов показывает, что токи в крайних фазах потеряли симметрию друг с другом, при этом амплитуда токов во второй и третьей фазах увеличилась.

Использование цифровых двойников возможно и на стадии контроля качества произведенной продукции. Так, получив реальные осциллограммы токов ХХ, можно реализовать дефект в модели, подобрав его параметры таким образом, чтобы модельные кривые совпали с осциллограммой. По этим данным можно судить о характере неисправностей трансформатора.

**Выводы.** Проведенный анализ позволяет сформулировать требования к моделям, которые могут быть положены в ос-

нову цифрового двойника силового трансформатора, а также могут быть использованы в порождающем проектировании трансформатора, обеспечивающем поиск оптимальных вариантов конструкции.

Основное внимание было направлено на отказ от традиционных для таких задач 3D-моделей магнитного поля. Показано, что несколько 2D-моделей способны обеспечить требуемую точность расчетов (не менее 95 %). При этом собственно полевые модели используются только для расчета параметров цепной модели трансформатора, что дает возможность использовать данные модели для имитации различных режимов работы трансформатора с учетом особенностей его конструкции при высоком быстродействии моделей.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в условиях производства и проектных организаций. Кроме того, результаты могут быть использованы при эксплуатации трансформаторов для оценки их повреждений по результатам испытаний без демонтажа.

#### Список литературы

1. **Национальная** технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti>.
2. **Технологии** порождающего проектирования AutoDesk [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://www.pointcad.ru/tehnologii/generative-design>.
3. **Дейнеко Л., Тертышная Н., Плащевский П.** Порождающее проектирование – инновационный подход к созданию цифрового макета изделия // CAD/cam/cae Observer. – 2018. – № 3(119). – С. 65–68.
4. **Порождающее** проектирование и топологическая оптимизация: перспективы новой технологии [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2018/12/21/porozhdayushhee-proektirovanie-i-topologicheskaya-optimizatsiya-perspektivy-novoj-tehnologii/>
5. **Digital Twin** // ANSYS. URL: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>
6. **Цифровой** двойник (Digital Twin) [Электронный ресурс] // CADFEM. – Режим доступа: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/>
7. **Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes** // COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>

8. **Романовская О.** Ученые ЮУрГУ разрабатывают цифровой двойник электропривода [Электронный ресурс] // Эксперт online. – Режим доступа: <https://expert.ru/2019/08/6/uchenye-yuurgu-razrabatyvayut-tsifrovoj-dvoynik-elektroprivoda/>

9. **Калявин А.** Новые возможности ANSYS 15.0 для решения задач электромеханики // САПР и графика. – 2014. – № 1. – С. 70–73.

10. **Калявин А.** Моделируем электромагнитное поле в обновленном ANSYS 16.0 // САПР и графика. – 2015. – № 3. – С. 62–67.

11. **Моделирование** электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода [Электронный ресурс] / Д.С. Ярымбаш, М.И. Коцур, Т.С. Ярымбаш, И.М. Килимник // *Problemele energetich regionale*. – 2020. – № 1(45). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-elektromagnitnyh-protsesov-pri-rabote-silovykh-transformatorov-pod-nagruzkoy-i-v-rezhime-holostogo-hoda/viewer>

12. **Тамьярова М.В., Тихонов А.И.** Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 46–55.

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

14. **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.

15. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

## References

1. Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa [National Technological Initiative]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <https://asi.ru/nti>.

2. Tekhnologii porozhdayushchego proektirovaniya AutoDesk [AutoDesk generating design technologies]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <https://www.pointcad.ru/tehnologii/generative-design/>.

3. Deyneko, L., Tertyshnaya, N., Plashchevskiy, P. Porozhdayushchee proektirovanie – innovatsionnyy podkhod k sozdaniyu tsifrovogo maketa izdeliya [Generating design – an innovative

approach to creating a digital model of a product]. *CAD/cam/cae Observer*, 2018, no. 3(119), pp. 65–68.

4. Porozhdayushchee proektirovanie i topologicheskaya optimizatsiya: perspektivy novoy tekhnologii [Generative design and topological optimization: prospects for new technology]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <http://integral-russia.ru/2018/12/21/porozhdayushchee-proektirovanie-i-topologicheskaya-optimizatsiya-perspektivy-novoy-tehnologii/>

5. Digital Twin. ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>

6. Tsifrovoy dvoynik [Digital twin]. *CAD-FEM*. Available at: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/>

7. Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes. COMSOL. Available at: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>

8. Romanovskaya, O. Uchenye YuUrGU razrabatyvayut tsifrovoy dvoynik elektroprivoda [Scientists at SUSU are developing a digital twin for electric drive]. *Expert online*. Available at: <https://expert.ru/2019/08/6/uchenye-yuurgu-razrabatyvayut-tsifrovoj-dvoynik-elektroprivoda/>

9. Kalyavin, A. Novye vozmozhnosti ANSYS 15.0 dlya resheniya zadach elektromekhaniki [New features of ANSYS 15.0 for solving problems of electromechanics]. *SAPR i grafika*, 2014, no. 1, pp. 70–73.

10. Kalyavin, A. Modeliruem elektromagnitnoe pole v obnovlennom ANSYS 16.0 [Modeling the electromagnetic field in the updated ANSYS 16.0]. *SAPR i grafika*, 2015, no. 3, pp. 62–67.

11. Yarymbash, D.S., Kotsur, M.I., Yarymbash, T.S., Kilimnik, I.M. Modelirovanie elektromagnitnykh protsesov pri rabote silovykh transformatorov pod nagruzkoy i v rezhime kholostogo khoda [Modeling of electromagnetic processes in power transformers under load and in idle mode]. *Problemele energetich regionale*, 2020, no. 1(45). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-elektromagnitnyh-protsesov-pri-rabote-silovykh-transformatorov-pod-nagruzkoy-i-v-rezhime-holostogo-hoda/viewer>

12. Tam'yarova, M.V., Tikhonov, A.I. Metodika strukturno-parametricheskoy optimizatsii kollektornykh mashin s ispol'zovaniem modeli magnitnogo polya i geneticheskogo algoritma [Method of structural-parametric optimization of collector machines using a magnetic field model and a genetic algorithm]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 46–55.

13. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Numerical study of electrical

engineering devices using a magnetic field finite element modeling library]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 55–61.

14. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhev, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [De-

velopment of a non-linear model of a three-phase transformer to study the effect of asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.

15. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

---

*Тихонов Андрей Ильич,*

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

*Tikhonov Andrey Ilyich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Physics, e-mail: aitispu@mail.ru

*Стулов Алексей Вадимович,*

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

*Stulov Alexey Vadimovich,*

Transformer LLC, PhD in Engineering, Deputy Director General for Technical Development, e-mail: alxstl@mail.ru

*Снитко Ирина Сергеевна,*

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

*Snit'ko Irina Sergeevna,*

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

*Подобный Александр Викторович,*

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

*Podobny Alexander Viktorovich,*

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

УДК 621.313.333

## РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫМ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ВИБРОШУМОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.Н. ГОЛУБЕВ, В.Г. БЕЛОНОГОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: Belonogovvladimir@vk.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Ужесточающиеся требования к характеристикам электромеханических систем включают в себя задачу улучшения виброшумовых показателей электропривода. В настоящее время эта задача решается в основном в рамках традиционных трехфазных систем управления. Новые возможности ее решения открывает переход на многофазный вариант построения электропривода. Целью исследования является улучшение виброшумовых характеристик электропривода за счет разработки системы многофазного управления, обеспечивающей целенаправленное формирование конфигурации поля в зазоре многофазной электрической машины.

**Материалы и методы.** Для проведения исследований использована модель многофазного синхронного двигателя, учитывающая пространственную несинусоидальность распределения поля в зазоре. Модель позволяет представить структуру двигателя как объекта управления в виде совокупности параллельных подструктур, число которых зависит от числа фаз.

**Результаты.** Предложена методика конструкторского проектирования синхронного двигателя при произвольном числе фаз обмотки на базе полевой модели машины. Корректность получаемых с помощью методики результатов обеспечивается учетом реальной геометрии магнитопровода и насы-