

На правах рукописи



ПОДОБНЫЙ Александр Викторович

**МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОРРЕКТИРУЕМЫХ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА ИМИТАЦИОННЫХ
МОДЕЛЕЙ**

Специальность

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(электротехника, энергетика)

Автореферат

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Тихонов Андрей Ильич**

Официальные оппоненты:

Янишевская Анна Генриховна, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР»;

Кобелев Андрей Степанович, кандидат технических наук, ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром», начальник расчетно-теоретического сектора.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Защита состоится 21 сентября 2022 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен

http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Podobnyy_A.V..pdf.

Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Копылова
Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из приоритетов государственной политики России является цифровизация экономики. В рамках данного приоритета одним из наиболее наукоемких является направление, связанное с созданием цифровых двойников технических систем, использование которых позволяет имитировать работу этих систем с высокой (до 95%) точностью совпадения результатов моделирования с реальными показателями. При этом, удается спрогнозировать весь жизненный цикл электроустановки, а также последствия принятия решений по управлению ее работой. Это позволяет оптимизировать процесс эксплуатации электрооборудования.

Использование цифровых двойников на этапе проектирования трансформаторов в качестве цифровых прототипов не существующих пока еще изделий позволяет повысить точность расчета, проанализировать режимы работы будущего изделия, повысить его надежность.

Перспективный способ создания цифровых двойников связан с использованием имитационных моделей разрабатываемых устройств. Однако ввиду большого разброса свойств электротехнических материалов такие модели требуют обязательной калибровки с учетом информации о работе реального устройства.

Таким образом, актуальной является проблема разработки имитационных моделей трансформаторов, построенных на знаниях физики протекающих в них процессов, корректируемых по результатам экспериментальных измерений на реальной установке в целях доведения точности расчетов до требований, предъявляемых к цифровым двойникам.

Степень разработанности проблемы.

Технологии расчета трансформаторов в Советском Союзе были развиты до уровня, при котором реальный срок их службы составлял 50 лет и выше. Над этой проблемой работали ученые НИИ, в частности ВИТ, ВЭИ, а также инженеры электротехнических заводов, среди которых можно выделить МЭЗ (г. Москва), Запорожский трансформаторный завод, Минский электротехнический завод.

Среди ученых, которые внесли значительный вклад в развитие теории, лежащей в основе САПР трансформаторов, можно отметить советских ученых К.А. Круга, П.Л. Калантарова, Л.В. Лейтеса, Л.Р. Неймана, Л.М. Пиотровского, Г.Н. Петрова, А.В. Сапожникова, П.М. Тихомирова и др. Данная диссертация находится в русле Ивановской школы САПР трансформаторов, представленной в трудах Ю.Б. Бородулина, Ю.Я. Щелькалова, Г.В. Попова, А.И. Тихонова.

В настоящее время модели режимов работы трансформатора становятся частью САПР, позволяя осуществить анализ работы проектируемого устройства с помощью численного эксперимента на стадии

поверочного расчета. Так как современные САПР строятся в основном по модульному принципу, то за данную процедуру отвечают автономные подсистемы расчета нестационарных физических полей, получившие название систем инженерного анализа, среди которых в России при проектировании трансформаторов наиболее часто используются пакеты ANSYS Maxwell, COMSOL Mulyiphysics, ELCUT.

Точные имитационные модели трансформаторов могут быть реализованы и на основе теории цепей. Сегодня существует множество систем, воплотивших в себе теоретические наработки в области теории цепей. Одним из наиболее популярных является пакет Matlab Simulink с внедренной в него библиотекой моделирования физических процессов SimScare. В частности, для моделирования электрических цепей наиболее популярна библиотека SimPowerSystems.

В плане оценки технического состояния силовых трансформаторов на основе данных мониторинга можно отметить работы ВНИИЭ, ВЭИ, ИГЭУ, Московский завод «Изолятор», МЭИ (ТУ), НИЦ «ЗТЗ Сервис», ОРГРЭС, ХК «Электrozавод». Накоплен научный и практический опыт оценки и диагностирования и прогнозирования ресурса силовых трансформаторов. И данная работа пока не теряет своей актуальности.

Цель работы – снижение себестоимости и сроков проектирования трансформаторов, а также повышение надежности и эффективности их эксплуатации путем прогнозирования поведения изделия в различных условиях и принятия обоснованных решений по результатам проведения виртуальных испытаний с использованием цифровых двойников, используемых на всех стадиях жизненного цикла продукции.

Объектами исследования являются электрические трансформаторы, в том числе силовые.

Предмет исследования – имитационные модели трансформаторов, способные обеспечивать точность расчетов 95% и выше.

Задачи, решаемые в работе:

1. Разработка методики создания и использования цифровых двойников на основе имитационных моделей трансформаторов, корректируемых по результатами эксперимента.
2. Разработка имитационных моделей трансформаторов и методик их коррекции по результатам экспериментальных исследований.
3. Создание системы автоматического сбора и передачи информации о режимах работы трансформаторного оборудования.
4. Экспериментальная проверка точности имитационных моделей.
5. Разработка новых и совершенствование существующих алгоритмов и программного обеспечения, осуществляющих инструментальную поддержку разработанных методик.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности 05.13.12: «...специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа...»*. Специальность включает принципы и методы, отличающиеся тем, что они *содержат разработку и исследования научных основ проектирования, построения и функционирования интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений...»*. *В части области исследования специальности 05.13.12 – пункту 1:* «Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР»; *пункту 3:* «Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений...».

Методы исследования. Для решения задач выполнены теоретические исследования с использованием численных методов моделирования физических цепей, реализованных в средах Matlab и Excel, численных методов расчетов электромагнитных полей с использованием библиотеки моделирования физических полей EMLib, экспериментальные исследования с использованием методов автоматизации эксперимента.

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

1. Разработаны методики создания и использования цифровых двойников в качестве основы подсистем НИОКР и расширенного поверочного расчета в САПР однофазных и трехфазных трансформаторов, *отличающиеся* использованием быстродействующих уточненных имитационных моделей трансформаторов, корректируемых по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений реального устройства.

2. Разработаны имитационные модели трансформаторов, построенные на основе теории цепей, *отличающиеся* способностью к коррекции с использованием экспериментальных осциллограмм токов и напряжений реального устройства, *позволяющие* служить основой для построения цифровых прототипов и цифровых двойников экземпляров трансформаторов.

3. Разработана методика коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, *отличающаяся* алгоритмом построения его характеристики намагничивания по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений, *позволяющая* достичь высокой степени совпадения

мгновенных значений токов, полученных при моделировании, с реальными осциллограммами.

4. Разработана методика коррекции имитационной модели трехфазного трансформатора, *отличающаяся* использованием генетического алгоритма для решения нелинейной системы уравнений, построенной по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений реального устройства, и расчета характеристик намагничивания отдельных ветвей магнитной цепи, *позволяющая* построить цифровой двойник силового трансформатора.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Имитационные модели однофазного и трехфазного трансформаторов, корректируемые по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений реального устройства, способные служить основой для создания цифровых двойников трансформаторов.

2. Методики коррекции имитационных моделей однофазного и трехфазного трансформатора по экспериментальным осциллограммам токов и напряжений.

3. Методики создания и использования цифровых двойников трансформаторов на стадиях НИОКР и расширенного поверочного расчета.

4. Алгоритмы и программы, обеспечивающие инструментальную поддержку принятия проектных решений, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая ценность работы.

1. Апробированы имитационные модели, позволяющие обеспечить повышенную точность моделирования работы трансформаторного оборудования в режиме холостого хода.

2. Методика расширенного поверочного расчета однофазных и трехфазных трансформаторов, основанная на использовании имитационных моделей на стадии проектирования, интегрирована в состав САПР TransCAE, разработанной в ИГЭУ.

3. Разработаны и апробированы регистратор и созданная на его основе система автоматического сбора и передачи информации о работе реально существующего оборудования.

4. Методика коррекции имитационных моделей трансформаторов по результатам экспериментально собранной информации интегрирована в состав САПР TransCAE, разработанной в ИГЭУ.

5. Разработанные алгоритмы и программы могут быть использованы в качестве основы для создания подсистем расширенного поверочного расчета отраслевых САПР трансформаторов, а также для подсистем диагностики неисправностей магнитной системы трансформаторов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования, сравнением результатов расчета с результатами, полученными на апробированных моделях и разработанной экспериментальной установке.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в производственный процесс в ООО «Талан» (г. Иваново), в НПК «Автоприбор» (г. Владимир), ООО «Трансформер» (г. Подольск), в учебный процесс на кафедрах физики и Электромеханики ИГЭУ (г. Иваново).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

Личный вклад автора состоит в участии в разработке и отладке имитационной модели однофазного и трехфазного трансформатора, в разработке и отладке экспериментальной установки для коррекции имитационной модели по результатам исследования реального устройства, разработке методики коррекции имитационных моделей трансформаторов по результатам эксперимента, в участии в разработке и отладке программного обеспечения подсистемы уточненного поверочного расчета силовых трансформаторов, в разработке подсистемы формирования имитационной модели силового трансформатора в составе САПР, а также в проведении численных и натурных экспериментов и разработке рекомендаций по созданию цифровых двойников силовых трансформаторов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждены на Международных научно-технических конференциях: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2015, 2017, 2019, 2021 гг.), «ЭНЕРГИЯ» (Иваново, ИГЭУ, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2016, 2017 гг.), «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» (Пенза, 2016 г.), «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, 2019, 2020 гг.), на XIV международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охране России (Иваново, 2019 г.).

Публикации. По результатам работы опубликованы 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 17 статей в периодических изданиях, сборниках статей и материалов конференций, 2 тезисов докладов, 1 свидетельство на программный продукт.

Структура и объем работы. Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования, и приложений. Основная часть работы изложена на 140 страницах и содержит 66 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе дано понятие цифровых двойников технических устройств (ЦД), под которыми в данном случае понимаются математические модели, калиброванные по результатам измерений на реальном устройстве, обеспечивающие возможность получать информацию о данном устройстве путем анализа его ЦД.

В настоящее время технология ЦД развивается, как правило, на основе CAE-систем, типа пакета ANSYS, в состав которого входит модуль Twin Builder, служащий платформой для работы с ЦД. Использование ЦД позволяет организовывать мультифизические симуляции.

Особенно активно технология ЦД развивается сегодня в энергетике. Учитывая важность трансформаторов для энергетики, можно отметить актуальность проблемы создания ЦД силовых трансформаторов.

В основе ЦД трансформаторов (ЦДТ) лежат два подхода:

- 1) на основе мониторинга состояния устройства с последующей обработкой результатов нейронными сетями или регрессивными моделями;
- 2) на основе имитационных моделей физических процессов с последующей калибровкой по результатам мониторинга реального устройства.

Перспективен путь, основанный на их комбинации. Это значит, что при создании ЦДТ можно выделить три актуальные задачи:

- 1) создание систем автоматического сбора и анализа информации о работе реальных трансформаторов;
- 2) разработка систем моделирования трансформаторов, позволяющих имитировать их работу в различных режимах;
- 3) разработка диагностических моделей на основе обработки информации о его текущем состоянии.

Использование ЦДТ возможно как на стадии их эксплуатации, так и на стадиях предпроектных исследований, производства, включая проектирование и приемо-сдаточные испытания, и ремонта. При эксплуатации это дает возможность выявлять неисправности трансформаторов без их разборки, а также прогнозировать последствия тех или иных режимов работы. На стадии производства ЦДТ могут быть использованы как для анализа возможных проектных решений, так и для уточненного поверочного расчета устройства путем исследования его работы в характерных режимах. Расхождение результатов приемо-сдаточных испытаний изготовленного трансформатора с результатами исследования его ЦД может служить основанием для отбраковки данного устройства.

ЦДТ может быть построен на основе цепной имитационной модели. Однако существующие библиотечные решения (например, предлагаемые MatLab Simulink) неприемлемы из-за их относительной закрытости. Поэтому актуальной является задача создания открытых для развития имитационных моделей трансформатора, калибруемых по результатам экспериментальных испытаний для повышения точности совпадения расчетов с экспериментом.

Для калибровки имитационных моделей требуются системы мониторинга, позволяющей регистрировать быстроизменяющиеся величины, например кривые токов и напряжений в ремах XX и КЗ. Существующие системы мониторинга ориентированы, в первую очередь, на регистрацию медленно изменяющихся во времени параметров, характеризующих установившиеся режимы работы. Кроме того, они являются весьма дорогостоящими. Поэтому актуальной является задача разработки бюджетной системы автоматического сбора и передачи информации о режимах работы трансформаторов, в том числе распределительных.

Во второй главе рассмотрены результаты разработки моделей для реализации методики создания ЦДТ.

Как показывает анализ, при создании ЦДТ достаточная для инженерных расчетов точность может быть получена при использовании 2D-моделей магнитного поля. Принято решения использовать динамически подключаемую библиотеку расчета магнитного поля EMLib, разработанную в ИГЭУ. Данная библиотека интегрируется в пакет MSExcel, имеющий встроенную систему программирования VBA. Написаны VBA-макросы для автоматической генерации и численного исследования полевой модели трансформатора для уточненного расчета тока и потерь холостого хода (XX) (рис. 1). В последнем случае используется формула

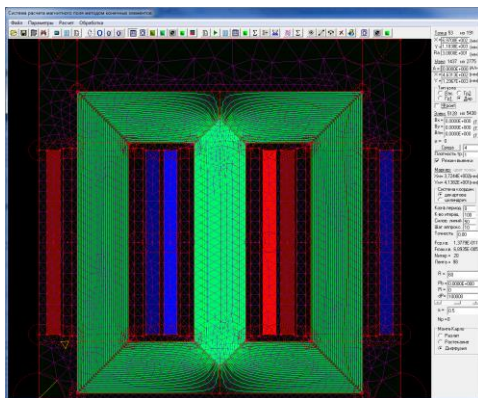


Рис. 1. Модель магнитного поля трансформатора с использованием EMLib

$$P_0 = \gamma \cdot \ell \cdot k_p^b \cdot k_p^u \cdot k_3 \sum_{k=1}^{N_k} [p(B_{mk}) \cdot S_k] + \sum_{i=1}^{N_{st}} \left[\sqrt{2} S_{ai} P_{st} \left(\frac{B_{mi}}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (1)$$

где γ – плотность электротехнической стали; N_s – количество треугольников, заполненных сталью; k_p^B, k_p^H – технологические коэффициенты; S_k – площадь k -го треугольника; $p(B_{mk})$ – удельные потери в стали в k -м треугольнике с максимальной индукцией B_{mk} ; N_{st} – количество косых стыков между ярами и стержнями; S_{ai} – площадь i -го стыка; $p_{st}(B_{mi})$ – удельные потери в i -м стыке с максимальной индукцией B_{mi} .

Для создания имитационных моделей трансформатора, использован подход на основе теории нелинейных магнитных цепей (рис. 2). Доказано, что ввиду особенностей магнитного поля трансформатора данный подход позволяет получить достаточную для инженерных расчетов точность. Имитационная модель однофазного трансформатора приведена на рис. 3. На рис. 4 приведены результаты расчета процесса включения трансформатора на XX.

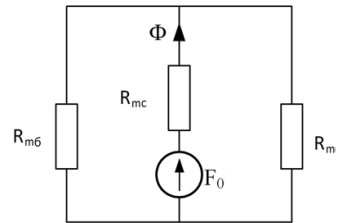


Рис. 2. Магнитная цепь однофазного трансформатора с Ш-образным сердечником

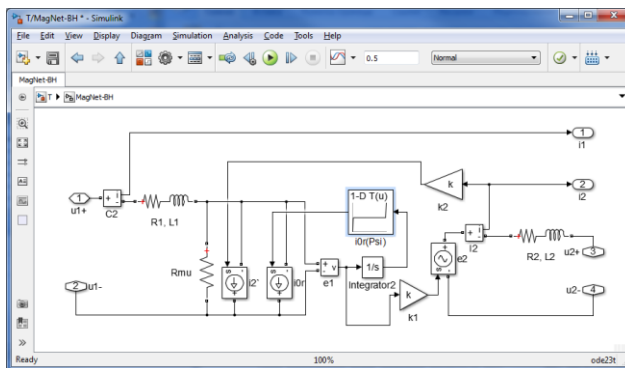
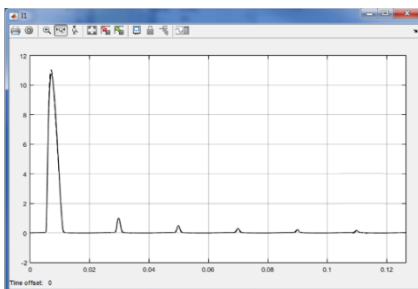
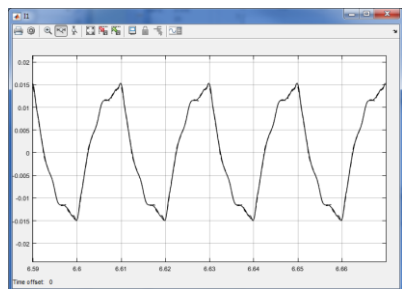


Рис. 3. Имитационная модель однофазного трансформатора



а)



б)

Рис. 4. Результаты моделирования процесса включения трансформатора: ток XX в момент включения (а) и в установившемся режиме (б) в зависимости от времени

При моделировании трехфазного трансформатора использована цепная модель магнитной системы, приведенная на рис. 5. Здесь R_{mk} – магнитные сопротивления ветвей магнитной системы; R_{m0} – магнитное сопротивление поля нулевой; F_k – МДС. Система магнитной цепи по методу контурных токов в матричной форме имеет вид

$$\{i_{0r}\} = \frac{1}{W_1} [R_m] \{\Phi\}, \quad (2)$$

где $\{i_{0r}\} = [i_{0r1} \ i_{0r2} \ i_{0r3}]^T$, (3)

$$\{\Phi\} = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3]^T, \quad (4)$$

$$[R_m] = \begin{bmatrix} R_{m1} + R_{m0} & R_{m0} & R_{m0} \\ R_{m0} & R_{m2} + R_{m0} & R_{m0} \\ R_{m0} & R_{m0} & R_{m3} + R_{m0} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Имитационная модель, намагничивающие токи $\{i_{0r}\}$ в которой соответствуют данной системе уравнений, представлена на рис. 6. На рис. 7 приведены кривые тока в первичных обмотках при включении на XX трансформатора ТМГ1000-10/0,4. Более жирные линии соответствует симметричным зазорам между всеми стержнями и ярмами, менее жирные – варианту трансформатора с выбитым вследствие КЗ ярмом.

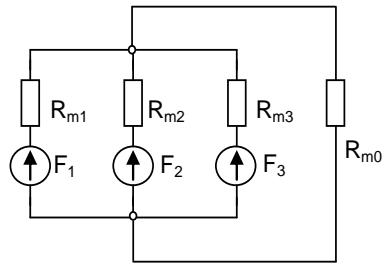


Рис. 5. Магнитная цепь трехфазного трансформатора стержневой конструкции

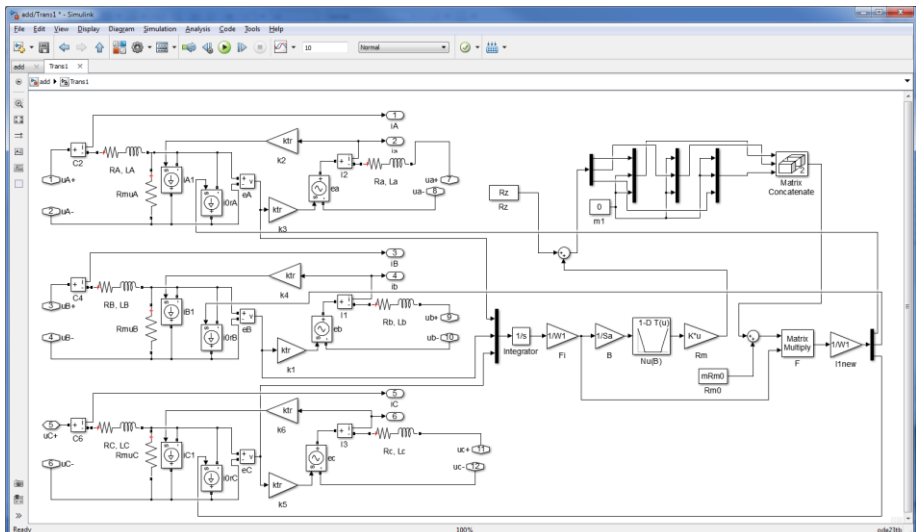


Рис. 6. Имитационная модель трехфазного трансформатора

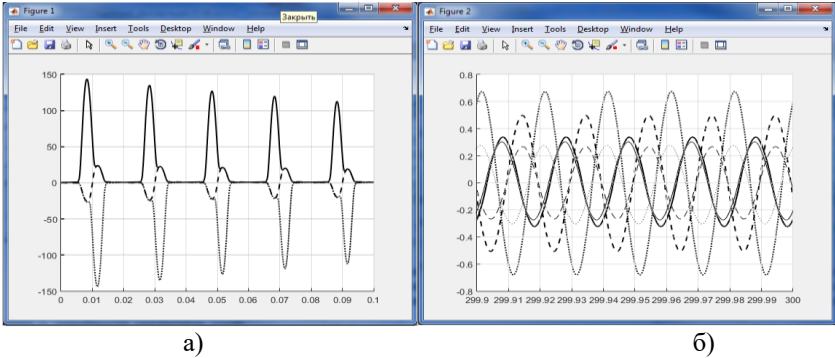


Рис. 7. Сравнение кривых первичных токов при включении на XX трансформатора с симметричными (менее жирные линии) и несимметричными (более жирные линии) технологическими зазорами: а – в начальный момент времени; б – установившийся ток XX

В третьей главе приведен результат разработки и апробации методик калибровки имитационных моделей трансформаторов.

Методика коррекции модели однофазного трансформатора строится на анализе снятой регистратором осциллограммы первичного напряжения и тока XX, представленной на рис. 11.

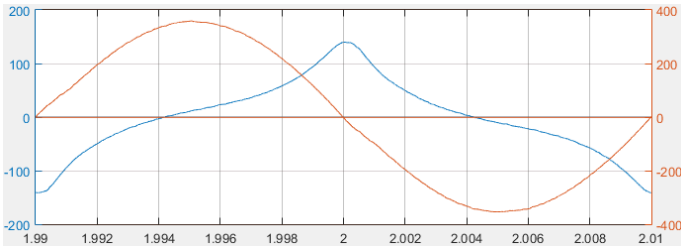


Рис. 8. Осциллограмма первичного напряжения и первичного тока на одном периоде, полученная при включении однофазного трансформатора на XX

По снятой осциллограмме рассчитывается активная мощность:

$$P \approx \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta t_i, \quad (6)$$

где T – период; n – количество точек осциллограммы на периоде; Δt_i – i -й интервал времени между двумя измерениями

Расчет кривой магнитного гистерезиса однофазного трансформатора (рис. 9) осуществляется по формуле

$$\Psi(t) = \int_0^t (u(t) - i(t) \cdot R) dt. \quad (7)$$

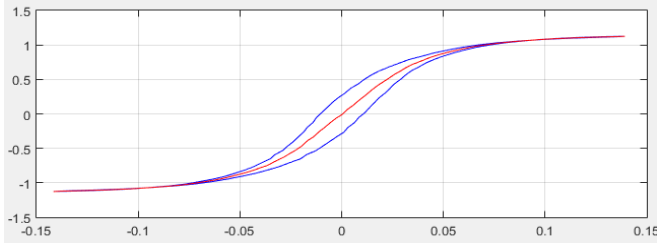


Рис. 9. Кривая магнитного гистерезиса и основная кривая намагничивания однофазного трансформатора

Построенная на ее основе средняя кривая намагничивания трансформатора передается в имитационную модель. На рис. 10 приведено сравнение полученных результатов. Совпадение двух кривых, соответствующих реальной осциллограмме и результатам моделирования свидетельствуют о хорошем совпадении с экспериментом.

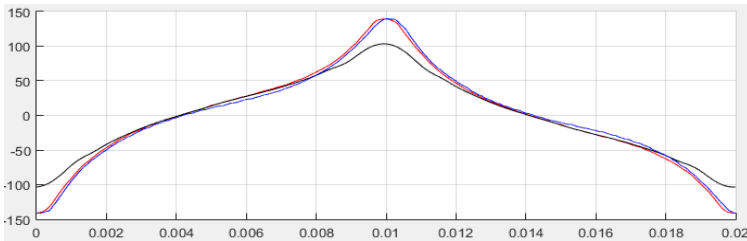


Рис. 10. Кривые первичного тока трансформатора в режиме XX на периоде

Калибровки модели трехфазного трансформатора осуществляется по результатам трех опытов XX при заданных первичных напряжениях только в одной фазе. В опытах снимаются осциллограммы тока XX данной фазы и напряжений в первичных обмотках всех трех фаз, что соответствует схемам магнитной цепи, приведенной на рис. 11, где

$$\mathfrak{R}_k = \frac{R_{mk}}{W_1^2} \Big|_{k=1,2,3}, \quad (8)$$

R_{mk} – магнитные сопротивления k -й ветвей магнитной цепи; W_1 – количество витков в первичной обмотке; I_k – намагничивающий ток.

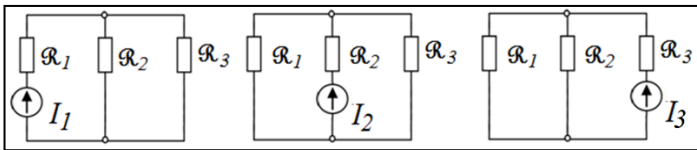


Рис. 11. Магнитные цепи трехфазного трансформатора при снятии калибровочных осциллограмм

Опыт повторяется поочередно для трех фаз. По полученным осциллограммам строятся кривые $\Psi'_{k,p,q}(i_k(t))$, представленные на рис. 12.

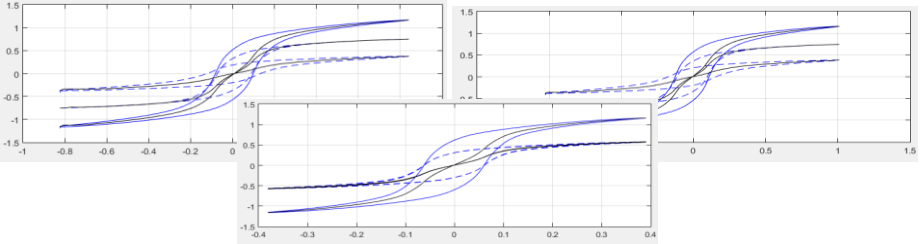


Рис. 12. Кривые намагничивания, рассчитанные по осциллограммам

По средним кривым намагничивания (рис. 12) строятся зависимости

$$\Re(\Psi) = \frac{i(t)}{\Psi(t)}. \quad (9)$$

Разработан алгоритм, позволяющий по девяти зависимостям (9) построить нелинейную систему уравнений, решением которой являются три зависимости $\Re_k(\Psi)|_{k=1,2,3}$, соответствующие ветвям магнитной цепи трансформатора (8). Задача решается с использованием генетического алгоритма путем минимизации невязки

$$F = \sqrt{\sum_{t=1}^{N_i} \sum_{k=1}^3 \left[(\Psi'_{k,t} - \Psi_{k,t})^2 + (\Psi'_{p,t} - \Psi_{p,t})^2 + (\Psi'_{q,t} - \Psi_{q,t})^2 \right]}, \quad (10)$$

где N_i – количество точек в табличной кривой (принималось $N_i = 100$); Ψ_{kt} – потокосцепления, найденные по реальным осциллограммам, аппроксимированным сплайнами; Ψ'_{kt} – расчетные значения, найденные по формулам, соответствующим схемам, представленным на рис. 11,

$$\begin{aligned} \Re'_{k,j} &= \Re_{k,j} + \frac{\Re_{p,j} \Re_{q,j}}{\Re_{p,j} + \Re_{q,j}}, \\ \Psi'_{k,j} &= \frac{i_{k,j}}{\Re_{k,j}}, \\ \Psi'_{p,j} &= \frac{i_{k,j} - \Psi'_{k,j} \Re_{k,j}}{\Re_{p,j}}, \\ \Psi'_{q,j} &= \frac{i_{k,j} - \Psi'_{k,j} \Re_{k,j}}{\Re_{q,j}}. \end{aligned} \quad (11)$$

$k=1,2,3$
 $p = \begin{cases} k+1, & \text{при } k+1 \leq 3 \\ k+1-3, & \text{при } k+1 > 3 \end{cases}$
 $q = \begin{cases} k+2, & \text{при } k+2 \leq 3 \\ k+2-3, & \text{при } k+2 > 3 \end{cases}$
 $j=1..N_i$

В качестве варьируемых параметров использовались по $N_{\Psi} = 7$ точек для каждой из трех искоемых функций $\mathfrak{R}_k(\Psi)|_{k=1,2,3}$, что с учетом симметрии данных кривых соответствовало 14 точкам кривых, по которым кривые аппроксимировались сплайнами на каждом шаге поиска. Кривые, полученные в результате поиска, представлены на рис. 13.

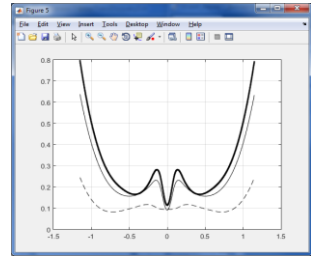


Рис. 13. Кривые $\mathfrak{R}_k(\Psi)$, полученные в ходе поискового процесса

На рис. 14 приведены итоговые кривые токов установившегося ХХ в первичных фазных обмотках трехфазного трансформатора, полученные на имитационной модели, построенной на основе рис. 6 с использованием кривых $\mathfrak{R}_k(\Psi)|_{k=1,2,3}$, представленных на рис. 13, в сравнении с реальными осциллограммами. Модельные кривые несколько отличаются от реальных осциллограмм (максимальное отклонение мгновенного тока фазы С около 20%).

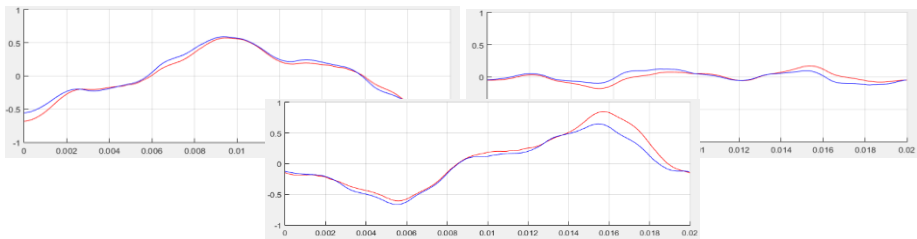


Рис. 14. Кривые фазных токов ХХ, полученные на имитационной модели, в сравнении с реальными осциллограммами на одном периоде

Для снятия экспериментальных осциллограмм был разработан регистратор (рис. 15) со следующими характеристиками:

- сбор аналоговых данных – 12 каналов АЦП с частотой 100 кГц, 10 каналов с частотой менее 0,1 Гц;
- разрядность АЦП – 12 бит;
- частотой выборки АЦП 100 МГц;
- скорость передачи данных от регистратора на ПК 14,4 Mbps.

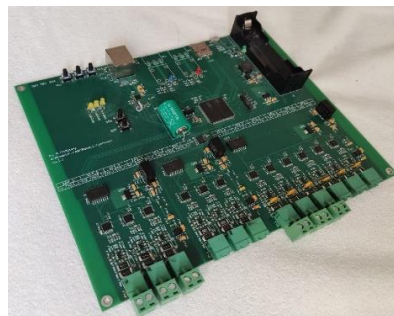


Рис. 15. Внешний вид регистратора

Для создания регистратора выбран контроллер STM32H743ZIT6 на базе 32-битного RISC-контроллере Arm Cortex-M7, частота 400 МГц.

В четвертой главе приведены методики использования ЦД на разных стадиях жизненного цикла трансформаторов.

Методика использования ЦДТ на стадии НИОКР основана на идее построения имитационной модели трансформатора нетиповой конструкции с последующим исследованием на ЦДТ особенностей функционирования данного устройства. Это позволяет избавиться от необходимости создания построения опытных образцов, а также дает возможность разработки методики проектирования устройств нетиповой конструкции.

На стадии проектирования ЦДТ играет роль цифрового прототипа проектируемого устройства. Он может быть использован на этапе расширенного поверочного расчета, осуществляемого в форме численного эксперимента на ЦДТ. Это позволит оценить особенности работы проектируемого устройства в различных режимах в условиях конкретной электросети. Кроме того, использование ЦДТ позволит адаптировать выбранную (или разработанную) методику проектирования к условиям конкретного производства путем учета технологических особенностей технологического цикла данного производства. Для этого предполагается создание ЦДТ серийного устройства путем калибровки его имитационной модели по результатам приемосдаточных испытаний (ЦДТ эталонного экземпляра трансформатора). Это позволит не только скорректировать принятую типовую методику проектирования данного класса устройств, но и упростит процесс отбраковки некачественной продукции путем сравнения результатов приемосдаточных испытаний с результатами исследования ЦДТ, что повысит надежность готовой продукции.

На стадии эксплуатации используется ЦДТ конкретного экземпляра продукции, созданный на производстве путем калибровки имитационной модели по осциллограммам конкретного трансформатора в процессе его приемосдаточных испытаний. Такой ЦДТ поставляется покупателю вместе с готовым устройством и может быть использован для выявления повреждений трансформатора, которые могут возникнуть, например, после КЗ. Для этого предполагается регулярная процедура сопоставления результатов текущего мониторинга работы трансформатора с результатами исследования его ЦД. Также ЦДТ может быть использован для анализа последствий принятия решений по управлению режимами работы электросети, где установлен данный трансформатор.

На рис. 16 представлена структура САПР, в которой реализованы элементы разработанной технологии цифровых двойников трансформаторов. В отличие от существующих САПР в качестве одного из необходимых

элементов здесь присутствуют подсистемы НИОКР, поддержки ЦД и поддержки жизненного цикла продукции.

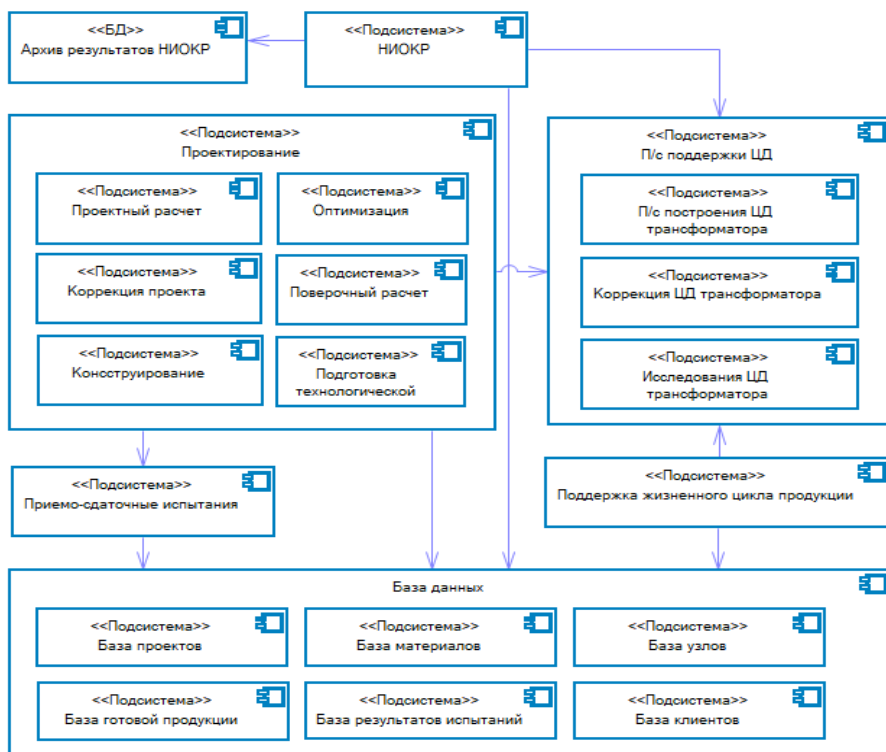


Рис. 16. Структура САПР трансформаторов с использованием ЦД

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны математический аппарат и имитационные модели однофазных и трехфазных трансформаторов, позволяющие учитывать наличие несимметрии в конструкции магнитной системы, возникающей как в результате некачественной сборки, так и в процесс эксплуатации.

2. Разработан многоканальный регистратор и средства обработки, обеспечивающие инструментальную поддержку технологии ЦДТ на стадиях проектирования и эксплуатации трансформатора.

3. Разработаны методики коррекции имитационных моделей, позволяющие настраивать их на конкретные устройства, что позволяет получить высокую точность результатов моделирования.

4. Разработаны методики создания и использования ЦДТ на стадиях НИОКР и проверочного расчета. Данные методики основаны на

использовании ЦД для калибровки методик проектирования к условиям конкретного производства по результатам приемосдаточных испытаний серий трансформаторов и для анализа принятых проектных решений.

5. Разработана методика выявления повреждений эксплуатируемого трансформаторного оборудования путем сравнения осциллограмм токов ХХ до и после возникновения кризисных ситуаций.

6. Разработана структура САПР трансформаторов с использованием цифровых двойников. Результаты работы интегрированы в существующую САПР распределительных трансформаторов.

Публикации по теме диссертации по списку ВАК

1. Тихонов А.И., Стулов А.В., Каржевин А.А., Подобный А.В. Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2020, Вып. 1, с. 22-31.
2. Тихонов А.И., Стулов А.В., Снитко И.С., Подобный А.В. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2020, Вып. 3, с. 32-43.
3. Тихонов А.И., Стулов А.В., Еремин И.В., Снитко И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. - № 1 (29). - С. 76-82.
4. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали.- Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2019, Вып. 2, с. 43-51.
5. Тихонов А.И., Гусенков А.В., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Технология моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2016, Вып. 6, с. 57-65.

Публикации по теме диссертации в других изданиях

6. Подобный А.В., Тихонов А.И., Солунин М.А. Разработка системы автоматизации эксперимента на базе платформы ARDUINO (XVIII Бенардосовские чтения): Мат. междунар. науч.-техн. конф. / ИГЭУ. – Иваново, 2015. – Т. 3. - С.170-173.
7. Тамьярова М.В., Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка системы автоматизации экспериментальных исследований электрических машин на основе виртуального лабораторного стенда / В сб.: Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров. Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 168-177.

8. Подобный А.В., Комлев Д.М., Тихонов А.И. Разработка системы дистанционного управления трансформаторной подстанцией // (XIX Бенардосовские чтения): Мат. науч.-техн. конф. / ИГЭУ. – Иваново, 2017. – Т. 3. - с.188-191.
9. Гусенков А.В., Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Технология инженерных расчетов электротехнических устройств с использованием автономных наукоемких библиотек // International periodic scientific journal. October 2018. Issue 5 / Vol. 1. – С. 42-55. - ISSN 2567 – 5273, DOI 10.30890/2567-5273
10. Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка системы автоматизации сбора данных и управления // Мат. 13-й междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2018». 3 – 5 апреля 2018. Том 2 / ИГЭУ. – Иваново, 2018. - С. 89.
11. Семенова К.В., Тихонов А.И., Подобный А.В., Каржевин А.А. К вопросу о разработке мер по снижению аварийности трансформаторных подстанций на основе технологии цифровых двойников. - Иваново: «Пожарная и аварийная безопасность" 2019. № 3 (14). С. 9-18.
12. Подобный А.В., Тихонов А.И. Использование модели магнитного поля трансформатора для анализа повреждений: Мат. 14-й междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2019». 2 - 4 апреля 2019. Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2019. - с. 89.
13. Семенова К.В., Подобный А.В., Тихонов А.И. Методика расчета жизненного цикла трансформаторов // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. мат. IX Всероссийской науч.-практ. конф., Иваново, 18 апреля 2019 г. – Иваново: ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС России, 2019, 168-172.
14. Семенова К.В., Тихонов А.И., Подобный А.В., Каржевин А.А. Технология создания цифровых двойников силовых трансформаторов для оптимизации работы и прогнозирования аварий на трансформаторных подстанциях. / Сб. мат. XIV междунар. науч.-практ. конф., Иваново 12-13.09.2019. С.79-83.
15. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Семенова К.В., Подобный А.В. Динамическая модель силового трансформатора в MatLab Simulink SimPowerSystems // (XX Бенардосовские чтения): Мат. междунар. науч.-техн. конф. / ИГЭУ. – Иваново, 2019. – Т. 3. - с.164-167.
16. Еремин И. В., Подобный А. В., Каржевин А. А., Плаксин А. В., Снитько И. С., Тихонов А. И. Разработка моделей для системы автоматизированного проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфной стали // Молодой ученый. — 2020. — №5 (295). С. 14 – 22.
17. Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка контроллера для создания цифровых двойников силовых трансформаторов: Мат. 14-й междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2020». 7 - 10 апреля 2020. Том 2 / ИГЭУ. – Иваново, 2020. - с. 93.
18. Семенова К.В., Каржевин А.А., Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка имитационной модели распределительного трансформатора в составе цифрового двойника электрической сети для уменьшения пожароопасности энергосистем / Пожарная и аварийная безопасность: сб. мат. XV Междунар. науч.-

- практ. конф., Иваново, 17–18 ноября 2020 г. – Иваново : ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС Рос-сии, 2020. – С. 120 – 123.
19. Семенова К.В., Тихонов А.И., Снитько И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А. Разработка цифровых двойников силовых трансформаторов // Надежность и долговечность машин и механизмов : сб. мат. XI Всероссийской науч.-практ. конф, Иваново, 16 апреля 2020 г.– Иваново : ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС, 2020, с. 307 – 311.
20. Тихонов А.И., Снитько И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А., Прохорова Н.В. Расчет однофазного сухого трансформатора малой мощности / ИГЭУ. – Иваново, 2020. – 40 с.
21. Подобный А.В., Тихонов А.И. Построение кривой магнитного гистерезиса на основе осциллограммы намагничивающего тока: Мат. 16-й всеросс. (8-й междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2021». 6 - 8 апреля 2021. Том 2 / ИГЭУ. – Иваново, 2021. - с. 86.
22. Тихонов А.И., Подобный А.В., Каржевин А.А., Семенова К.В., Прохорова Н.В. Разработка моделей для реализации технологии цифровых двойников силовых трансформаторов // (XXI Бенардосовские чтения): Мат. междунар. науч.-техн. конф. / ИГЭУ – Иваново, 2021. – Т. 3. - с.218 – 221.

Тезисы докладов на конференциях

23. Подобный А.В., Тихонов А.И. Управление электромеханическими узлами при автоматизации эксперимента на платформе Arduino // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тез. док. 22-й междунар. науч.-техн. кон. студентов и аспирантов (25-26 февраля 2016 г., Москва). В 3 т. Том 2. – М: Издательский дом МЭИ, 2016 г. – с.21.
24. Подобный А.В., Тамьярова Ю.В., Тихонов А.И. Динамическая полевая модель универсального коллекторного двигателя // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тез. док. 23-й междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2017 г. – с. 24.

Свидетельства на программные продукты

25. Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Система генерации и исследований полевой динамической модели универсального коллекторного двигателя / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2019615127, дата гос. регистрации 18.04.2019.

ПОДОБНЫЙ Александр Викторович
**МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА
ОСНОВЕ КОРРЕКТИРУЕМЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Подписано в печать _____ г. Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. Печ .л 1,16
Тираж 100 экз. Заказ № _____

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34