

Протокол № 80
заседания диссертационного совета Д 212.064.02,
созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)
от 21 сентября 2022 года
при защите диссертации Подобного Александра Викторовича на тему
«Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе
корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей»
по специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования
(электротехника, энергетика)»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

На заседании присутствовали 18 членов диссертационного совета из 22:

- | | |
|------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1. Тарарыкин Сергей Вячеславович (председатель) | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 2. Тютиков Владимир Валентинович (зам. председателя) | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 3. Копылова Лариса Геннадьевна (ученый секретарь) | канд. техн. наук, 05.13.06 |
| 4. Анисимов Анатолий Анатольевич | д-р техн. наук, 05.09.03 |
| 5. Виноградов Анатолий Брониславович | д-р техн. наук, 05.09.03 |
| 6. Голубев Александр Николаевич | д-р техн. наук, 05.09.03 |
| 7. Казаков Юрий Борисович | д-р техн. наук, 05.09.03 |
| 8. Колганов Алексей Руфимович | д-р техн. наук, 05.13.12 |
| 9. Коростелев Владимир Федорович | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 10. Косяков Сергей Витальевич | д-р техн. наук, 05.13.12 |
| 11. Курнышев Борис Сергеевич | д-р техн. наук, 05.09.03 |
| 12. Пантелеев Евгений Рафаилович | д-р техн. наук, 05.13.12 |
| 13. Ратманова Ирина Дмитриевна | д-р техн. наук, 05.13.12 |
| 14. Староверов Борис Александрович | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 15. Тверской Юрий Семенович | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 16. Тихонов Андрей Ильич | д-р техн. наук, 05.13.12 |
| 17. Целищев Евгений Сергеевич | д-р техн. наук, 05.13.06 |
| 18. Шипко Михаил Николаевич | д-р техн. наук, 05.13.06 |
- а также официальные оппоненты и сотрудники ИГЭУ.

Председательствует на заседании профессор Тарарыкин Сергей Вячеславович.

Председательствующий на основании явочного листа извещает членов Совета о правомочности заседания. Списочный состав совета 22 человека. Присутствуют на заседании 18 членов совета из 22, в том числе докторов наук по специальности 05.09.03 – 5. Таким образом, Совет правомочен начать защиту. Заседание считается открытым.

Председательствующий объявляет о защите кандидатской диссертации

Подобного Александра Викторовича на тему «Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей».

Диссертация принята к защите решением диссертационного совета от 13 мая 2022 года, протокол № 77.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Тихонов Андрей Ильич, заведующий кафедрой «Физика» ИГЭУ.

Официальные оппоненты:

- Янишевская Анна Генриховна, доктор технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» (*отсутствует по уважительной причине*);
- Кобелев Андрей Степанович, кандидат технических наук, ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром» (г. Владимир), начальник расчетно-теоретического сектора.

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

Ученый секретарь Копылова Лариса Геннадьевна кратко докладывает об основном содержании представленных документов соискателя и сообщает членам совета, что все документы соответствуют установленным требованиям.

Соискатель излагает основные положения диссертации и отвечает на вопросы членов совета: Колганова А.Р., Целищева Е.С., Косякова С.В., Казакова Ю.Б., Тверского Ю.С., Ратмановой И.Д., Анисимова А.А., Староверова Б.А., Пантелеева Е.Р., Виноградова А.Б.

После технического перерыва слово предоставляется научному руководителю Тихонову Андрею Ильичу.

Ученый секретарь оглашает заключение организации, где выполнялась работа, оформленное в виде выписки из протокола №8 расширенного заседания кафедры «Программное обеспечение компьютерных систем» ИГЭУ от 24 февраля 2022 года.

Ученый секретарь оглашает отзыв ведущей организации – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ). Диссертационная работа и отзыв на неё обсуждены на заседании кафедры «Информационные системы» факультета информационных систем и технологий (протокол №1 29.08.2022 г.)

Учёный секретарь сообщает присутствующим, что на автореферат диссертации поступило 9отзывов:

1. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва;
2. ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»;

3. АНО «Научно-исследовательский и образовательный центр «Территория инновационного развития», г. Подольск;
4. АО «Вибропромтех», г. Ярославль;
5. АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»;
6. АО «Российские космические системы», г. Москва;
7. ООО «УП–МОС», г. Москва;
8. ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России»;
9. ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева».

Все отзывы положительные.

Соискатель отвечает на замечания, содержащиеся в отзыве ведущей организации и в отзывах на автореферат диссертации.

Ученый секретарь совета Копылова Л.Г. зачитывает положительный отзыв официального оппонента Янишевской Анны Генриховны, отсутствующей по уважительной причине. Соискатель отвечает на замечания, содержащиеся в отзыве оппонента.

Выступает официальный оппонент Кобелев А.С. Соискатель отвечает на замечания, содержащиеся в отзыве оппонента.

В дальнейшей дискуссии участвуют члены совета: Пантелеев Е.Р., Коростелев В.Ф., Староверов Б.А., председатель совета Тарарыкин С.В.

После заключительного слова соискателя диссертационный совет переходит к тайному голосованию.

Единогласно избирается счетная комиссия из трех членов совета: Анисимов А.А., Виноградов А.Б., Голубев А.Н.

После проведения тайного голосования председатель счётной комиссии Анисимов А.А. оглашает протокол счетной комиссии с результатами голосования:

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек.

Присутствует на заседании 18 членов совета, из них докторов наук по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика) – 5.

Роздано бюллетеней – 18. Осталось нерозданных бюллетеней – 4. Оказалось в урне бюллетеней – 18.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата технических наук Подобному Александру Викторовичу: подано голосов: «за» – 18, «против» – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Совет открытым голосованием единогласно («за» – 18, «против» – нет) утверждает протокол счетной комиссии и результаты голосования.

Председательствующий поздравляет соискателя Подобного А.В. с присуждением ему ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационный совет переходит к обсуждению проекта заключения. После обсуждения и внесения редакционных поправок Совет открытым голосованием единогласно («за» – 18, «против» – нет) принимает следующее заключение:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.064.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.Ленина»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 21 сентября 2022 г. № 80

О присуждении **Подобному Александру Викторовичу**, гражданину России, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей» по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика)» принята к защите 13 мая 2022 г. (протокол заседания № 77) диссертационным советом Д 212.064.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) Минобрнауки России, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, приказом № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Подобный Александр Викторович, 4 января 1995 года рождения.

В 2017 году соискатель окончил магистратуру федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

В 2021 году освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», работает преподавателем кафедры «Системы автоматизированного проектирования и инженерных расчетов» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Диссертация выполнена на кафедре «Программное обеспечение компьютерных систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук Тихонов Андрей Ильич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Физика».

Официальные оппоненты:

– Янишевская Анна Генриховна, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ

ВО «Омский государственный технический университет» (г. Омск), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР»;

– Кобелев Андрей Степанович, кандидат технических наук, ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром» (г. Владимир), начальник расчетно-теоретического сектора дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, в своем положительном отзыве, подписанном Романовым Антоном Алексеевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Информационные системы» факультета информационных систем и технологий, и утвержденном проректором по научной работе, доктором технических наук Наместниковым Алексеем Михайловичем, отметила, что результаты диссертационной работы могут быть использованы в проектных организациях и промышленности при проектировании силовых трансформаторов, а также в учебном процессе. Ведущая организация констатировала, что диссертация Подобного А.В. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. В работе изложены оригинальные научно обоснованные технические решения в области разработки элементов САПР трансформаторов, в частности, новый подход к созданию и использованию при проектировании силовых трансформаторов их цифровых двойников, что имеет теоретическое и практическое значение для развития электротехнической отрасли страны. Обоснованы теоретически, разработаны и экспериментально проверены новые модели, которые могут быть использованы при создании цифровых двойников силовых трансформаторов, интегрированных в САПР.

Диссертация отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствующим специальности 05.13.12. «Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика)», а ее автор, Подобный Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 25 публикациях автора, из них 5 работ опубликованы в изданиях по перечню ВАК. Общий объем публикаций автора составляет 7,06 п.л., из них по теме диссертационной работы 7,06 п.л., личный вклад автора – 1,88 п.л., из них по теме диссертационной работы 1,88 п.л. Получено свидетельство на программный продукт.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Тихонов А.И., Стулов А.В., Еремин И.В., Снитько 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. DOI:

10.25699/SSSB.2020.29.56930 (в статье описаны основные положения технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов в форме имитационных моделей, корректируемых по результатам экспериментальных исследований реального устройства с использованием разработанного для этих целей специализированного регистратора).

2. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. №. 2. – С. 43-51. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.043-051 (В работе изложены результаты разработки имитационной модели однофазного трансформатора на примере трансформатора из аморфной стали. Модель открыта для коррекции, в том числе по результатам сравнения с экспериментальными данными, что позволило в последствии построить на ее основе цифровой двойник однофазного трансформатора с высокой степенью совпадения результатов моделирования с экспериментальными осциллограммами токов реального трансформатора).

3. 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 // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. №. 1. – С. 22-31. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.022-031 (В работе изложены результаты разработки имитационной модели трехфазного трансформатора, на основе которой впоследствии был создан цифровой двойник трехфазного трансформатора. В статье рассмотрен алгоритм определения неисправности магнитопровода трансформатора без его разборки путем сопоставления результатов моделирования на имитационной модели с осциллограммами токов холостого хода реального трансформатора);

На диссертацию и автореферат поступило 9 отзывов из организаций: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва (подписал канд. техн. наук, доцент Стучилин В.В., доцент кафедры инфокоммуникационных технологий); ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (подписал д-р техн наук, профессор Роньжин В.И., профессор кафедры организации производства и городского хозяйства); АНО «Научно-исследовательский и образовательный центр «Территория инновационного развития», г. Подольск (подписал канд. техн. наук А.В. Стулов, директор); АО «Вибропромтех», г. Ярославль (подписал канд. физ.-мат. наук Басовец С.К., генеральный директор); АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (подписал канд. техн. наук Кузнецов А.С., начальник бюро развития персонала); АО «Российские космические системы», г. Москва (подписал канд. техн. наук Мамедов Т.Т., начальник отделения 16); ООО «УП–МОС», г. Москва (подписал канд. техн. наук Кулешов С.Л., генеральный директор); ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» (подписал д-р техн. наук, доцент А.А. Краснов, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин); ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева» (подписала д-р техн. на-

ук, профессор Снежко В.Л., заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов).

Основные замечания, содержащиеся в отзывах, не носят принципиального характера и касаются выбора объектов для экспериментальных исследований, оценки точности измерений и степени совпадения результатов моделирования и эксперимента, вопросов оправданности использования математического пакета MatLab в САПР трансформаторов, параметров генетического алгоритма, используемого в работе, особенностей использования результатов расчета магнитного поля.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их соответствием критериям, предъявляемым пунктами 22, 24 «Положения о присуждении ученых степеней», а также их научно-исследовательской деятельностью и публикационной активностью в области теоретических и экспериментальных исследований, касающихся систем автоматизированного проектирования технических устройств, а также имитационного моделирования и экспериментальных исследований этих устройств.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны методика создания и использования основных компонентов цифровых двойников в САПР силовых трансформаторов, развивающая методологию систем автоматизированного проектирования возможностью применения имитационных моделей, корректируемых по результатам экспериментальных измерений, для уточнения результатов проектного расчета и оценки возможных дефектов магнитной системы как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации изготовленного по проекту устройства; методика коррекции имитационной модели силового трансформатора, позволяющая повысить степень совпадения результатов моделирования с экспериментом;

предложен оригинальный подход к расчету магнитных характеристик отдельных ветвей магнитной системы трехфазного трансформатора, основанный на решении нелинейной системы уравнений, построенной по результатам экспериментальных осциллограмм токов и напряжений реального трансформатора, с помощью генетических алгоритмов;

доказана перспективность использования в практике проектирования силовых трансформаторов идеи построения расчетных методик, включающих в качестве необходимого элемента анализ цифровых прототипов, корректируемых по результатам приемо-сдаточных испытаний на конкретном производстве. Это позволяет учесть влияние на поверочный расчет технологических факторов и уменьшить количество брака при выпуске готовой продукции;

введена измененная трактовка понятия цифрового двойника трансформатора, в которой смещен акцент с диагностического аспекта применяемых математических моделей на функциональный аспект, позволяющий не только прогнозировать вероятность возникновения неисправностей и остаточный ресурс, но и осуществлять имитацию работы устройства в различных режимах, что позволяет прогнозировать характер

возможных последствий принятия решений по выбору режимов эксплуатации реального трансформатора.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность построения имитационной модели трансформатора, способной повысить степень совпадения результатов расчета мгновенных значений величин, характеризующих работу трансформатора, в частности токов в обмотках, с экспериментальными осциллограммами;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы экспериментальных исследований с применением разработанного автором регистратора токов и напряжений, методы теории цепей с применением имитационного пакета MatLab Simulink, методы теории магнитного поля, в том числе реализуемые с помощью библиотеки EMLib, а также современные математические пакеты, в частности, MatLab и Excel;

изложены идея построения методик диагностики неисправностей магнитной системы трансформатора по результатам моделирования режима холостого хода на цифровом двойнике в сравнении с экспериментальными осциллограммами реального трансформатора до и после возникновения аварийных ситуаций, а также идея построения цифровых прототипов трансформаторов нетиповых исполнений для целей НИОКР;

раскрыты проблемы существующих имитационных моделей силовых трансформаторов, связанные с невозможностью учета на стадии разработки модели конкретного устройства существенных факторов технологического характера, характеристик используемых материалов, особенностей конструкции готового изделия (например, наличия технологических зазоров), от корректности задания которых зависит точность моделирования;

изучены варианты построения имитационной модели трансформатора, а также влияние структуры этих моделей, вида и точности задания магнитных характеристик электротехнической стали на устойчивость процесса численного интегрирования по времени систем уравнений, на основе которых строятся исследуемые модели;

проведена модернизация существующих имитационных моделей силовых трансформаторов, построенных на основе понятия идеального трансформатора, путем внедрения в их состав матричного описания магнитной цепи для расчета намагничивающих токов первичных обмоток.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в практику научных исследований и проектирования методика построения и исследования цифрового двойника силового трехфазного трансформатора, позволяющая осуществлять уточненный расчет потерь и тока холостого хода, в ООО «Трансформер» (г. Подольск); подсистема построения цифрового двойника силового трехфазного трансформатора, позволяющая осуществлять уточненный имитационный расчет трансформатора в режиме холостого хода в ООО

«НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир); в практику эксплуатации силовых трансформаторов в виде подсистемы контроля параметров работы трансформатора в ООО «Талан» (г. Иваново); в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» внедрена система численных исследований цифрового двойника однофазного трансформатора, на основании которой разработаны практические занятия по преподаваемым дисциплинам;

определены перспективы развития цифровых двойников силовых трансформаторов в применении к теории и практике автоматизированного проектирования данных устройств, а также в применении к проблеме повышения надежности работы существующих трансформаторов путем своевременного выявления неисправностей без демонтажа и разборки функционирующего оборудования;

созданы исследовательская подсистема САПР силовых трансформаторов, в основу которой заложены разработанные в диссертации алгоритмы, модели и методики, в том числе алгоритм параметрической генерации модели магнитного поля в магнитопроводе, имитационные модели однофазного и трехфазного трансформаторов, методики коррекции параметров имитационных моделей однофазного и трехфазного трансформатора по экспериментальным осциллограммам, методика использования цифрового двойника трансформатора на стадиях НИОКР и поверочного расчета;

представлены предложения по дальнейшему развитию цифровых двойников, позволяющих создавать и исследовать модели трансформаторов нетиповых исполнений, в частности, специальных трансформаторов.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

для экспериментальной проверки результатов был использован разработанный в рамках диссертации специализированный высокоскоростной многоканальный регистратор, проверка точности которого проводилась с использованием сертифицированного оборудования, обоснована методика калибровки разработанных моделей;

теория построена на известных и широко применяемых методах расчета магнитного поля, электрических и магнитных цепей; данные, полученные по результатам имитационного моделирования, согласуются с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными по теме диссертации;

идея базируется на обобщении опыта проектирования силовых трансформаторов с применением математических пакетов и систем имитационного моделирования, на современных достижениях в области имитационного моделирования трансформаторов с использованием элементов теории поля и теории цепей, а также на достижениях современной микроэлектроники и методах автоматизации экспериментальных исследований;

использованы данные, полученные на апробированных имитационных моделях силовых трансформаторов, входящих в состав пакета имитационного моделирования MatLab Sumulink, а также данные из научных публикаций по теме диссертации;

установлено качественное и количественное совпадение результатов исследований автора на имитационных моделях с результатами экспериментальных исследований;

