



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(УлГТУ)

Северный Венец ул., д.32,  
г. Ульяновск, 432027, Россия

Тел.: (8422) 43-06-43; факс (8422) 43-02-37

e-mail: [rector@ulstu.ru](mailto:rector@ulstu.ru) <http://www.ulstu.ru>

ОКПО 02069378, ОГРН 1027301160226

ИНН/КПП 7325000052/732501001

31.08.2022

№

1420/14-04

На

от

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Ульяновский

государственный технический

университет имени Л.И. Ульянова

«31»

00

## О Т З Ы В

ведущей организации

на диссертационную работу Подобного Александра Викторовича «Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика).

### Актуальность темы диссертации

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. Их использование 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 стадии 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, корректируемый по результатам экспериментальных измерений на реальной установке и

в целях доведения точности расчетов до требований, предъявляемых к цифровым двойникам.

### **Анализ содержания диссертации – основные результаты**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 144 наименования, и приложений. Основная часть работы изложена на 141 странице и содержит 66 иллюстраций.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, описана степень ее разработанности. Сформулирована цель диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, представлены методы достижения поставленной цели, результаты, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** выполнен обзор по теме исследования. Дано понятие цифровых двойников технических устройств (ЦД), история их развития, описаны подходы и методы построения математических моделей силовых трансформаторов, включая определение его параметров. Уделяется внимание вопросам текущего состояния САПР трансформаторов, а также проблемам мониторинга трансформаторов. Описаны основные подходы в создании ЦД трансформаторов, а также области их применения на различных этапах производства. Поставлены задачи исследования.

Материал главы свидетельствует о хорошем знакомстве автора с предметом исследований и методами достижения поставленной цели. *Основным итогом первой главы можно считать обоснование актуальности проблемы создания цифровых двойников силовых трансформаторов, позволяющих получить высокую точность совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на реальном устройстве. Для решения данной проблемы автор формулирует три главные задачи диссертации: разработка быстродействующих имитационных моделей силовых трансформаторов на основе теории цепей, разработка регистратора для экспериментальной проверки результатов имитационного моделирования на конкретном устройстве и разработка методики коррекции имитационной модели трансформатора по результатам эксперимента.*

**Вторая глава** посвящена разработке моделей для реализации методики создания ЦД трансформаторов. При сравнении двухмерных и трехмерных моделей расчета магнитного поля при определении параметров силового трансформатора обоснована возможность использования более простых двухмерных моделей, которые обеспечивают приемлемую точность при большем быстродействии. Кроме того, доказана эффективность использования цепных моделей магнитной системы при построении быстродействующей модели силового трансформатора. Принято решение о построении исследовательской подсистемы на основе пакета MSExcel, связанного с пакетом посредством интерфейса SpreadSheets Link Ex. Написаны VBA-макросы для автоматической генерации и численного исследования полевой модели трансформатора, а также для организации цикла исследований имитационной модели в среде MatLab с использованием приложения Simulink.

Автором разработаны имитационные модели однофазного и трехфазного трансформаторов на основе теории нелинейных магнитных цепей. Доказано, что ввиду особенностей магнитного поля трансформатора данный подход позволяет получить

достаточную для инженерных расчетов точность. Показано, что разработанные модели можно использовать как для имитации работы трансформаторов в характерных режимах, так и для оценки возможных неисправностей магнитной системы, отражающихся на характере кривых тока при включении трансформатора на холостой ход.

*К основному результату второй главы можно отнести разработанные имитационные модели трансформаторов типовой конструкции, имеющие высокое быстродействие, вследствие чего, данные модели могут служить основой для ЦД реальных типовых устройств, а также могут быть использованы для построения более сложных моделей устройств нетиповых исполнений.*

**В третьей главе** приведен результат разработки и апробации методик калибровки имитационных моделей трансформаторов. Уделяется внимание разработке методики коррекции модели однофазного трансформатора на основе анализа снятой регистратором осциллограммы первичного напряжения и тока холостого хода. Для калибровки имитационной модели используется кривая намагничивания трансформатора, полученная из осциллограмм, снятых при испытаниях реального трансформатора в режиме холостого хода.

Для калибровки имитационной модели трехфазного трансформатора разработан алгоритм, позволяющий построить и нелинейную систему уравнений, решением которой являются три характеристики намагничивания ветвей магнитной цепи трансформатора. Данная задача решается с использованием генетического алгоритма.

Для снятия экспериментальных осциллограмм токов и напряжений исследуемых трансформаторов автором был разработан регистратор данных, позволяющий снимать показания тока и напряжения сразу по 12 каналам с частотой до 100 кГц.

*Новизна и практическая значимость полученных здесь результатов очевидна и сомнений не вызывает. Разработанный регистратор наилучшим образом подходит для решения поставленных задач, а практическая реализация методики коррекции ЦД однофазного трансформатора показала высокую степень совпадения результатов моделирования с данными, полученными в реальном эксперименте. Особый интерес вызывает разработанная автором модель, используемая для коррекции цифрового двойника трехфазного трансформатора, построенная на идее решения нелинейной системы уравнений, формируемой по результатам анализа экспериментальных осциллограмм, с использованием генетических алгоритмов.*

**В четвертой главе** описаны методики использования ЦД на разных стадиях жизненного цикла трансформаторов, а также разработанная подсистема поверочного расчета САПР трансформатора. В качестве основы для реализации данной подсистемы использован пакет Microsoft Excel, совмещенный с математическим пакетом MatLab. Подсистема поверочного расчета, разработанная автором внедрена в состав САПР TransCAE, разработанной в ИГЭУ для проектирования силовых трансформаторов класса напряжения до 35 кВ и позволяет решать не только задачи поверочного расчета, но и осуществлять предпроектные исследования новых исполнений трансформаторов.

*Основным результатом данной главы можно считать разработку принципиально нового подхода к созданию САПР трансформаторов, состоящего в использовании доступных широкому пользователю программных средств для создания сложных наукоемких моделей и алгоритмов, ориентированных на предварительное исследование*

*работы проектируемого устройства в произвольных режимах, а также на поиск неисправностей магнитопроводов реальных трансформаторов на основе анализа кривых токов и напряжений реального трансформатора в режиме холостого хода.*

**В заключении** приведены выводы по работе, отмечено, что цель диссертации достигнута, решены все поставленные задачи.

**Научная новизна** определяется следующими наиболее значимыми результатами:

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.

**Обоснованность и достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается их соответствием общепризнанным представлениям о физических процессах в трансформаторах, значительной экспериментальной составляющей проведенных исследований с использованием разработанного автором многоканального регистратора, высокой степенью сходимости результатов моделирования с экспериментальными данными, наличием актов внедрения в реальное производство. В частности, по результатам работы получено четыре акта внедрения и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Значимость для науки и производства полученных автором результатов**

Полученные автором результаты нашли применение в расширении функционала САПР трансформатора подсистемой расширенных поверочных расчетов. Разработанные имитационные модели позволяют оценивать режимы работы трансформатора совместно с электрической сетью уже на этапе проектирования, что позволяет предусмотреть наиболее тяжелые режимы работы и продумать управление ими.

Практическая значимость работы подтверждена актами внедрения результатов исследований на производственные предприятия, занимающиеся серийным выпуском трансформаторов.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные результаты целесообразно использовать на предприятиях трансформаторостроения, не имеющих в своем активе САПР, а также как дополнение к уже имеющимся системам проектирования.

Разработанные в рамках работы модели и средства могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов для организации численного эксперимента. Особую практическую значимость имеет подсистема расширенного поверочного расчета в составе САПР трансформаторов. Ее использование позволяет проводить достоверный анализ установившихся режимов работы устройства на любом этапе его жизненного цикла.

Разработанные программные продукты рекомендуются к использованию в связке с уже существующими на предприятиях системами для расширения их функционала.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в проектных организациях и промышленности при проектировании силовых трансформаторов, а также в учебном процессе.

#### **Замечания по работе**

1. У автора имеется четыре акта внедрения, но при этом все показанные эксперименты проводились с трансформатором малой мощности. С чем связано отсутствие апробации на промышленных образцах силовых трансформаторов?

2. В работе не приведены количественные оценки точности совпадения кривых токов и напряжений, полученных с помощью ЦДТ и реально снятых осциллограмм.

3. В списке литературы приводятся работы автора, связанные с построением полевой модели универсального коллекторного двигателя. В диссертационной работе это направление работ автора не отражено. Непонятно, какие именно результаты, полученные при исследовании коллекторных двигателей, были использованы в диссертации?

4. Для оценки точности и корректности полученных результатов используются приборы, не внесенные в госреестр средств измерений. Также не очень понятна сама методика оценки погрешности разработанного регистратора.

5. В работе имеются некорректные выражения, грамматические и стилистические ошибки.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

#### **Заключение по работе**

Диссертация Подобного А.В. «Методика создания цифровых двойников трансформаторов на основе корректируемых по результатам эксперимента имитационных моделей» 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 от 24.09.2013 г. №84), предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствующим специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (электротехника, энергетика)», автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации, а ее автор, Подобный Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа, автореферат диссертации, а также отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Информационные системы» факультета информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (протокол № 1 от 29.08.2022 г.).

Заведующий кафедрой «Информационные системы»  
факультета информационных систем и технологий  
ФГБОУ ВО «Ульяновский  
государственный технический  
университет», к.т.н., доцент

Романов  
Антон Алексеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»  
Адрес: 432027, Ульяновская область, г. Ульяновск, улица Северный Венец, 32  
Телефон: +7(8422) 43-03-43  
Электронная почта: rector@ulstu.ru

Личную подпись Романова А.А. заверяю  
начальник управления кадрового обеспечения  
Маслова О.А.