

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.310.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 11 декабря 2024 г., № 5

О присуждении Галяутдиновой Алсу Ренатовне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Интеллектуальная система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов распределительных сетей 35/6(10) кВ» по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды принята к защите 02 октября 2024 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.310.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 717/нк от 09.11.2012.

Соискатель Галяутдинова Алсу Ренатовна, 21 октября 1996 года рождения,

В 2020 году соискатель окончила магистратуру ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»,

в 2024 году окончила очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», по научной специальности 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды),

работает в должности преподавателя кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук Ившин Игорь Владимирович, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Официальные оппоненты:

Вахнина Вера Васильевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», кафедра «Электроснабжение и электротехника», заведующий кафедрой;

Матренин Павел Викторович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Научная лаборатория цифровых двойников в электроэнергетике, ведущий научный сотрудник,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном Русиной Анастасией Георгиевной, доктором технических наук,

доцентом, кафедра «Электрические станции», заведующей кафедрой, указала, что диссертационная работа Галяутдиновой А.Р. имеет научную ценность и является законченной научно-квалификационной работой, результатом которой является разработка научно обоснованного технического решения в области автоматизированного контроля, способствующего увеличению эксплуатационного ресурса силового трансформатора и имеющего значение для энергетической отрасли Российской Федерации. Также работу можно квалифицировать как решение задачи, имеющей значение для развития теории и практики неразрушающего и аналитического контроля трансформаторного оборудования. Работа отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ общим объёмом 7,5 п.л. и авторским вкладом 4,2 п.л.: работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS (и приравненных к публикациям в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК) – 2, общим объёмом 1,5 п.л. и авторским вкладом 0,6 п.л.; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК – 3, общим объёмом 2,6 п.л. и авторским вкладом 1,5 п.л.; свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ – 2, общим объёмом 0,5 п.л. и авторским вкладом 0,2 п.л.; работ, опубликованных в материалах международных, всероссийских и национальных конференций – 10, общим объёмом 2,9 п.л. и авторским вкладом 1,9 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Vladimirov O., Galyautdinova A., Nizamiev M., Ivshin I., Usmanov I. Equipment and data transmission system for express analysis of the technical condition of the main equipment of the 35/6(10) kV transformer substation // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 190. P. 122-134 (статья в рецензируемом научном издании МБД SCOPUS, вклад соискателя – 40%).

2. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф., Усманов И.К. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по коэффициенту экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 14-26. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-14-26 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 50%).

3. Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 2. С. 32-45. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 70%).

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов. Из них положительных – 7. С замечаниями и вопросами – 7. Отзывы прислали:

1. Заведующий кафедрой «Электропривод и электротехника» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, доктор технических наук, доцент Макаров В.Г. и доцент кафедры «Электропривод и электротехника» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, кандидат технических наук Цвенгер И.Г. Замечания: 1) не указана периодичность измерения контролируемых параметров системы онлайн-мониторинга; 2) на с. 12 автореферата приведена архитектура и описание разработанной многослойной нейросетевой модели, однако не обоснован выбор ее архитектуры и не ясно, проводилась ли проверка нейронной сети на переобучение; 3) в автореферате содержатся сведения о внедрении

разработанной системы в трансформаторы марки ТМН-6300/35, при этом автор не указывает, может ли быть применена данная система в трансформаторах других марок и не потребуются ли при этом вносить какие-либо изменения.

2. Научный сотрудник Лаборатории энергетического оборудования и систем Центра промышленной энергетики ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Санкт-Петербург, кандидат технических наук, доцент Мельникова О.С. Замечание и вопрос: 1) в автореферате недостаточно подробно раскрыта система апробации результатов исследования; 2) на основании каких документов определены диапазоны балльной шкалы по контролируемым параметрам (таблица 7)?

3. Доцент кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, кандидат технических наук, доцент Роженцова Н.В. Замечание: в диссертации отсутствует стоимость системы онлайн-мониторинга и экономический эффект от ее внедрения. На мой взгляд, это позволило бы оценить возможность дальнейшего использования в электрических сетях 35/6(10) кВ.

4. Профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнология» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, доктор технических наук, профессор Рыжкова Е.Н. и профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнология» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, кандидат технических наук, доцент Цырук С.А. Замечания: 1) несколько режет слух термин «маслонаполненный трансформатор», как будто есть иной способ использования масла в качестве охлаждающей субстанции; 2) в автореферате в целом и на рисунке 6 «Архитектура разработанной многослойной нейросетевой модели» следовало бы более подробно описать, что же находится в скрытых слоях нейронов ИНС.

5. Профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах» факультета радиоэлектроники и автоматики ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, доктор физико-математических наук, профессор Славутский Л.А. Вопросы и замечание: 1) проверялось ли качество обучения интеллектуальной нейросети на большой модельной выборке входных параметров? 2) каким образом используется экспертная оценка в вашей работе? О каких экспертах идет речь? 3) имеются опечатки по тексту.

6. Заведующий кафедрой «Электрические машины и привод» Ташкентского государственного технического университета, г. Ташкент, Узбекистан, доктор технических наук, профессор Тоиров О.З. Замечание и вопрос: 1) из автореферата непонятно, как подбиралась целевая функция для контролируемого параметра трансформатора (таблица 7); 2) на основании каких критериев подбирались контрольно-измерительные приборы и датчики для системы мониторинга? Проводился ли анализ существующих приборов?

7. Директор Института автоматики и электронного приборостроения ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ференец А.В. Замечание и вопрос: 1) в разделе «актуальность» неясно, насколько целесообразно построение системы онлайн-мониторинга для силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ; 2) в каких единицах измеряется остаточный ресурс (таблица 8)?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Оппонент Вахнина Вера Васильевна является известным ученым в области математического моделирования, неразрушающего контроля и диагностики силовых трансформаторов, численных методов и комплексов

программ расчета электродинамической стойкости трансформаторного оборудования, имеет соответствующие научные публикации.

Оппонент Матренин Павел Викторович является известным специалистом в области методов оценки технического состояния электрооборудования, моделирования нейронных сетей в области электроэнергетики, создания цифровых двойников, имеет соответствующие научные публикации.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, является одним из ведущих учебных и научно-инженерных центров Сибири и России в сфере электроэнергетических комплексов и систем, а также приборов и методов контроля электрооборудования. Сотрудники кафедры «Электрические станции» занимаются диагностикой силовых трансформаторов (в том числе амплитудно-фазными методами анализа), моделированием электромагнитных полей силовых трансформаторов, имеют соответствующие научные публикации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны методика и интеллектуальная система онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, позволяющие определять техническое состояние трансформатора с использованием введенного коэффициента экспресс-анализа, который рассчитывается на основе измеренных параметров работающего трансформатора с учетом их весовых коэффициентов, и принимать решения о предиктивном техническом обслуживании или ремонте; новая архитектура многослойной нейросетевой модели для обработки данных онлайн-мониторинга и повышения точности оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора;

предложен алгоритм выработки рекомендаций по техническому обслуживанию силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ на основе разработанной методики;

доказано наличие взаимосвязей между параметрами трансформатора и внешних, режимных параметров и возможность применения методов неразрушающего контроля в онлайн-режиме;

предложены граничные значения коэффициента экспресс-анализа; рекомендации для технического воздействия на силовой трансформатор; перечень контролируемых параметров и контрольно-измерительных приборов интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказан и обоснован перечень контролируемых параметров, достаточный для контроля и определяющий непосредственно техническое состояние силового трансформатора;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы неразрушающего контроля, онлайн-мониторинг для своевременной оценки технического состояния с применением мер по восстановлению работоспособности силового маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ;

разработана новая архитектура многослойной нейросетевой модели, отличающаяся использованием радиальных базисных функций в обучающемся отдельно первом слое, для обработки данных онлайн-мониторинга и повышения точности оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора;

раскрыты возможности и ограничения применения интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ;

изучены зависимости между параметрами и техническим состоянием силового трансформатора.

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

разработан и внедрен (имеются акты внедрения) в компании ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина (г. Альметьевск, Республика Татарстан), в компании-производителе диагностического оборудования ООО «Димрус» (Пермский край), а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГЭУ» интеллектуальная система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов распределительных сетей 35/6(10) кВ;

по результатам выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по договору №0002/52/63 от 06.04.2020, заключенному между ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина и ФГБОУ ВО «КГЭУ», при оказании информационно-консультационных услуг по договору №1054-23-п от 08.11.2023, заключенному между ООО «Газпром трансгаз Казань» и ФГБОУ ВО «КГЭУ», была подтверждена работоспособность интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ;

определены перспективы практического применения интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора для создания системы превентивной диагностики с последующим прогнозированием работоспособности силовых трансформаторов, формирование источника данных для прогнозных моделей по силовым маслонаполненным трансформаторам в сетях 35/6(10) кВ.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с применением аттестованных измерительных средств по контролируемым параметрам, проведена калибровка измерительной системы, показана воспроизводимость результатов измерений в различных условиях;

теоретические основы определения технического состояния силового трансформатора не противоречат известным из литературы данным и согласуются с опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами других авторов;

идея разработанной системы **базируется** на анализе работ других ученых в этой области;

использовано сравнение данных, полученных с помощью разработанной в диссертации интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния и с помощью методики, предписанной Приказом Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей», установлено соответствие результатов;

установлена непротиворечивость экспериментальных результатов, выводов и моделей известным теоретическим положениям и данным работ других исследователей в этой области;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, измерительные приборы, прошедшие поверку.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в разработке интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния, в проведении экспериментальных исследований, участии в разработке математической модели обработки результатов параметров технического состояния для автоматизации контроля силового маслонаполненного трансформатора, участии в обсуждении полученных результатов и их представлении в публикациях.

Диссертационный совет рекомендует использование результатов в существующих системах контроля технического состояния трансформаторов для расширения функционала диагностических систем, а также для создания единой базы данных со сбором информации от различных диагностических

систем и повышения качества контроля технического состояния трансформаторов.

Полученные результаты имеют интерес для широкого круга специалистов и могут быть использованы эксплуатирующими организациями и производителями диагностического оборудования, такими как ПАО «Россети», ПАО «Интер – РАО», ПАО «Газпром», АО «Сетевая компания» (г. Казань), ООО «Димрус» (Пермский край), АО «Пергам-Инжиниринг» (г. Москва).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. На 26-м слайде в таблице 8 указаны результаты расчета остаточного ресурса с учетом коэффициента экспресс-анализа. Как вы оцениваете точность вашего прогноза? Как вы ее проверяете? Ведь этот ресурс рассчитан для неизменных условий эксплуатации, и при их изменении остаточный ресурс будет изменяться (*член совета Гарифьянов Н.Н. и ученый секретарь Калимуллин Р.И.*).

2. Какие критерии использовались при анализе методов искусственного интеллекта? Было бы полезно привести сравнительный численный анализ методов (*ведущая организация*).

3. Было бы полезно рассмотреть вопросы кибербезопасности предлагаемой системы (*ведущая организация*).

4. В п. 1 «Научной новизны работы» непонятно, какие новые контролируемые параметры предложено ввести в разработанную интеллектуальную систему онлайн-мониторинга и контроля технического состояния маслонаполненного силового трансформатора рассматриваемого класса напряжения – 35/6(10) кВ? (*оппонент Вахнина В.В.*).

5. В Российской Федерации нормативный документ РД 153-34.0-46.302-00 представляет собой официально утвержденный стандарт, который регламентирует концентрацию следующих газов, растворенных в масле силовых трансформаторов: водорода (H_2), метана (CH_4), ацетилена (C_2H_2), этилена (C_2H_4), этана (C_2H_6), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2),

причем для каждого вида дефекта определены характерные газы и их концентрация. В главе 2 в таблице 2.1 для контролируемых параметров приведены указанные газы (параметр x_3) для изоляционной системы трансформатора. Однако в главе 4 при определении предельно-допустимых значений контролируемых параметров трансформатора рассматриваются уровни растворенных в масле газов: водорода (H_2) и оксида углерода (CO). Автору следует пояснить, почему были выбраны только эти газы в качестве контролируемых параметров силового трансформатора? (*оппонент Вахнина В.В.*).

6. Результаты обучения каких моделей нейронной сети приведены в таблице 3.1 главы 3? Следует пояснить, каким образом получены приведенные в таблице 3.1 значения метрик качества (*оппонент Вахнина В.В.*).

7. Следовало представить критерии и алгоритм выбора контрольно-измерительных приборов (*оппонент Матренин П.В.*).

8. На рисунке 3.2 глубокое обучение показано как раздел искусственных нейронных сетей (ИНС). Действительно, в настоящее время глубокое обучение реализуется, как правило, с использованием ИНС, тем не менее, глубокое обучение и ИНС следовало показать, как пересекающиеся множества, но не полностью включать глубокое обучение в ИНС (*оппонент Матренин П.В.*).

Соискатель Галяутдинова А.Р. **согласилась** с замечаниями 3 и 8 и **ответила на остальные замечания** следующим образом:

1. Онлайн-мониторинг предполагает с собой контроль непрерывного характера, который позволяет оценивать техническое состояние трансформатора под рабочим напряжением по измеренным значениям параметров, в моем случае с периодичностью 1 раз в минуту. Преимуществом онлайн-мониторинга является возможность отслеживания технического состояния трансформатора для предотвращения его выхода из строя. Данные в таблице показывают прогноз по текущему состоянию трансформатора. Если какой-либо параметр превысит свое предельно-допустимое значение, то остаточный ресурс пересчитывается на основании измеренных значений

параметров. Для подтверждения точности прогноза за экспериментальные данные взяли статистику измерений, представленную компанией ПАО «Татнефть».

2. При анализе методов искусственного интеллекта использовались показатели точности решения регрессионной задачи оценки технического состояния трансформатора: среднеквадратичная ошибка прогноза, корень из среднеквадратичной ошибки прогноза, средняя по модулю ошибка, нормализованная средняя по модулю ошибка, коэффициент детерминации.

4. В диссертационной работе перечень контролируемых параметров состоит из 9 параметров трансформатора, 2 внешних параметров, 1 режимного параметра. Все эти параметры обоснованы на основании статистика отказов.

5. Газы H_2 (водород), CO (оксид углерода) выбраны для анализа растворенных газов в масле. Согласно пункту 3.8.2 «Требования к техническому диагностированию и мониторингу состояния оборудования ПС» Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», автоматизированные системы мониторинга и диагностики непрерывного контроля рекомендуется применять к силовым трансформаторам 35 кВ в объеме: контроль содержания водорода, растворенного в масле бака трансформатора. Для онлайн-мониторинга в России доступным прибором на момент разработки системы являлся Газоанализатор Intellix GLA 100, который имеет 100%-ную чувствительность к водороду (общая сигнализация о превышении концентрации газа), а также чувствителен к окиси углерода (при перегреве бумажной изоляции).

6. В таблице 3.1 приведены модели обучения линейной регрессии, метода k-ближайших соседей, дерева решений, метода опорных векторов. Обучающая выборка была обучена на всех этих методах, по каждому из них были определены метрики качества. Точность и качество обучения модели измеряется метрикой качества. В данной диссертационной работе были использованы следующие метрики: среднеквадратичная ошибка прогноза (MSE), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), средняя по модулю

ошибка (MAE), нормализованная средняя по модулю ошибка (nMAE), коэффициент детерминации (R^2).

7. Выбор КИП осуществлялся на основании 2 критериев: регистрация и анализ данных в онлайн-режиме и возможность определения параметра силового трансформатора под рабочим напряжением. Алгоритм выбора в диссертации отсутствует, да, согласна.

На заседании 11 декабря 2024 года **диссертационный совет принял решение** за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, присудить Галяутдиновой Алсу Ренатовне ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Матухин Вадим Леонидович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Калимуллин Рустем Ирекович

11 декабря 2024 г.



Матухина В.Л. Калимуллин Р.И.
Специалист ОК Кабанова С.А.