

На правах рукописи



Галяутдинова Алсу Ренатовна

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОНЛАЙН-МОНИТОРИНГА И
КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ
МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЕЙ 35/6(10) КВ

2.2.8. – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

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

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и
электротехника» Института химии и энергетики
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный
университет», г. Тольятти

Матренин Павел Викторович
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник Научной лаборатории цифровых
двойников в электроэнергетике Уральского
энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 11 декабря 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-20.

Отзывы на автореферат, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://old.kgeu.ru/Diss/Dissertant/198?idDiss=159>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Распределительная электрическая сеть – это сеть, предназначенная для распределения электрической энергии, получаемой от источников питания по территории электроснабжаемого района и непосредственная ее подача к приемникам и потребителям. Неотъемлемыми элементами распределительной электрической сети являются силовые трансформаторы 35/6(10) кВ. К ним предъявляются повышенные требования по надежности для бесперебойного питания потребителей электрической энергии. В распределительных электрических сетях 35/6(10) кВ преобладают силовые трансформаторы маслонаполненного типа, из них 60% эксплуатируются с превышением ресурса, определённого нормативно-технической документацией (25 лет).

Выбор силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ в качестве объекта исследований данной диссертации, создание интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния и своевременное принятие мер по восстановлению работоспособности является актуальным и входит в одну из приоритетных задач в среднесрочном периоде. Это позволит создать инструмент для построения системы предиктивного технического обслуживания или ремонта.

Сегодня в электроэнергетике активно развиваются и внедряются цифровые технологии, применяется рациональное сочетание методов онлайн- и оффлайн-мониторинга. Онлайн-мониторинг – контроль непрерывного характера, который позволяет оценивать техническое состояние трансформатора под рабочим напряжением по набору контролируемых параметров. Информационно-измерительная база на основе современных измерительных комплексов обеспечивает сбор, обработку и хранение информации с различных контрольно-измерительных приборов (КИП) параметров трансформатора в онлайн-режиме. Такие комплексы обеспечивают дистанционное наблюдение за техническим состоянием силового трансформатора, повышают достоверность оценки контролируемых параметров при эксплуатации оборудования.

Увеличение объема анализируемой информации о состоянии силового трансформатора ведет к значительным изменениям при выборе методов обработки данных и требует не только автоматизации процессов обработки и анализа данных, но и использование методов искусственного интеллекта. Применение эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок) и получение объективных оценок состояния силового трансформатора вне зависимости от квалификации персонала, с целью повышения эффективности системы, требуют использования интеллектуальных систем.

Вопросам, связанным с оценкой технического состояния и диагностики трансформаторного оборудования, посвящено множество трудов отечественных и зарубежных авторов, таких как Козлов В.К., Хренников А.Ю., Львов М.Ю., Давиденко И.В., Русов В.А., Вахнина В.В., Сви П.М., Соколов В.В., Овсянников А.Г., Назарычев А.Н., Вдовико В.П., Duval M., Jakob F., Shun Yuan Wang, Noble P., Enwen Li, Zakir Husain, Leehter Yao. Широко известны также работы

в направлении совершенствования моделей диагностики и управления техническим состоянием трансформаторного оборудования с применением методов искусственного интеллекта авторов Левина В.М., Монастырского А.Е., Манусова В.З., Хальясмаа А.И., Ушакова В.Я., Воропая Н.И., Андреева Д.А., Лаврова Ю.А., Матренина П.В.

Несмотря на многочисленные исследования в области диагностики, решение задачи онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов в сетях 35/6(10) кВ, способствующей увеличению эксплуатационного ресурса, остается актуальной и связано с применением своевременных мер по восстановлению работоспособности трансформатора. В диссертационной работе предложено новое научно обоснованное техническое решение в области автоматизированного контроля, способствующее увеличению эксплуатационного ресурса силового трансформатора за счет выбора перечня контролируемых параметров для онлайн-мониторинга и контроля технического состояния, имеющее существенное значение для развития электроэнергетики России.

Методология и методы исследования

Объект исследования: силовой маслонаполненный трансформатор под рабочим напряжением в распределительных сетях 35/6(10) кВ.

Предмет исследования: параметры контроля состояния силового маслонаполненного трансформатора под рабочим напряжением 35/6(10) кВ.

Цель работы: разработка интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния, способствующей увеличению эксплуатационного ресурса силового маслонаполненного трансформатора за счет автоматизированного контроля технического состояния в онлайн-режиме в распределительных сетях 35/6(10) кВ.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе решаются следующие **задачи:**

1. Провести анализ повреждаемости силовых маслонаполненных трансформаторов в сетях 35/6(10) кВ, существующих методов и систем контроля, применения интеллектуальных систем онлайн-мониторинга и контроля технического состояния в электроэнергетике для выявления их особенностей.

2. Разработать структурную и функциональную схемы интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ с выбором перечня контролируемых параметров и КИП, системы передачи и обработки полученных данных.

3. Разработать методику и алгоритм для анализа полученных результатов онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, способствующих увеличению его эксплуатационного ресурса.

4. Разработать математическую модель обработки результатов измерений для определения технического состояния и автоматизации контроля силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ.

5. Реализовать разработанную интеллектуальную систему онлайн-мониторинга и контроля технического состояния, провести ее испытания и апробацию на действующих силовых маслонаполненных трансформаторах в сетях 35/6(10) кВ для практического подтверждения работоспособности системы.

Методы исследования

При выполнении исследований применялись методы математической статистики, статистического моделирования и теории вероятности, метод анализа иерархий Томаса Саати, методы искусственного интеллекта. Обработка экспериментальных данных осуществлялась в среде разработки PyCharm, реализованной на языке программирования Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, включающая в себя системы измерения, передачи и первичной обработки данных, формирования баз данных и знаний, обработки и интеллектуального анализа данных, принятия решений, вывода результатов с выбором перечня контролируемых параметров.

2. Методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, позволяющая проводить анализ полученных результатов измерений, отличающаяся возможностью определения его эксплуатационного ресурса.

3. Разработанный алгоритм для реализации методики онлайн-мониторинга и оценки технического состояния, алгоритм выработки рекомендаций по техническому обслуживанию с целью продления ресурса силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ.

4. Разработанная многослойная нейросетевая модель, отличающаяся использованием радиальных базисных функций, на основе полученной информации о силовом трансформаторе и экспертных знаний с учетом эксплуатационного опыта, позволяющая автоматизировать онлайн-контроль.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении научных знаний в области автоматизированного контроля применительно к проблематике диссертации, а также результативного использования онлайн-мониторинга для своевременной оценки технического состояния с применением мер по восстановлению работоспособности силового маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ.

Практическая значимость работы заключается в автоматизации процесса принятия решений об остаточном ресурсе силового маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ на предприятиях электроэнергетической отрасли по результатам разработанной методики онлайн-мониторинга.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов диссертации подтверждается применением общепринятых методов неразрушающего контроля. Теоретические результаты согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных данных, полученных при исследовании силовых трансформаторов, обеспечивается применением аттестованных измерительных средств и апробированных экспериментальных

методик, а также непротиворечивостью результатов измерений результатам, полученным другими авторами и известным положениям науки.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Обоснован перечень контролируемых параметров и КИП интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ.

2. Разработана методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, позволяющие определять техническое состояние трансформатора с использованием коэффициента экспресс-анализа, который рассчитывается с применением измеренных параметров работающего трансформатора, и принимать решения о предиктивном техническом обслуживании или ремонте.

3. 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.

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

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по пунктам паспорта 4 – «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды»; 6 – «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии»; 7 – «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды».

Реализация результатов работы

Результаты диссертации внедрены в компании ПАО «Татнефть» имени В.Д.Шашина, в компании-производителе диагностического оборудования ООО «Димрус», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «КГЭУ» (акты приведены в приложениях Г, Д, Е диссертации).

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.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных, национальных и российских научно-технических конференциях: Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021» (г. Казань, 2021); Международные молодежные научные конференции «Тинчуринские чтения – Энергетика и цифровая трансформация» (г. Казань, 2021, 2022); Международная молодежная научная конференция (школа молодых ученых) «XXV Туполевские чтения» (г. Казань, 2021); Национальные научно-практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Казань, 2020, 2021, 2022); Международные молодежные научно-практические конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (г. Казань, 2022, 2023, 2024); Научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ» (г. Анапа, 2022), Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (г. Казань, 2023), 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау (г. Москва, 2023), 5-я Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE) (г. Москва, 2023).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 17 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, 3 статьи в рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК по специальности диссертации, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 10 материалов докладов на научных конференциях, включенных в РИНЦ.

Полный список публикаций автора представлен в диссертации.

Личный вклад автора

Соискателем получены основные результаты исследований, выполненных лично автором или при участии автора, которые отражены в статьях и диссертации, под руководством д.т.н., профессора Ившина Игоря Владимировича.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование и 7 приложений. Содержит 171 страницу машинописного текста, проиллюстрированного 41 рисунками и 39 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования,

представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе проведен анализ существующих методов и систем контроля состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, а также методов обработки данных.

Основными причинами возникновения отказов силового маслонаполненного трансформатора являются дефекты, возникающие в обмотках, низкое качество технического обслуживания и ремонта (ТОиР), несоблюдения периодичности и объема выполнения профилактических мероприятий, недостаточный уровень исполнения средств оценки технического состояния и диагностики, ошибки персонала. В число факторов, влияющих на скорость развития отказов, входят повышение входного напряжения, климатические факторы, качество ТОиР и наличие устройств защиты.

Большинство силовых трансформаторов эксплуатируются с превышением ресурса, установленного ГОСТ 11677-85. По данным ПАО «Россети Центр и Приволжье» в 2023 году количество повреждений составило 573, где 60% эксплуатируемых силовых маслонаполненных трансформаторов в распределительных сетях выработали свой ресурс. Основной причиной повреждений является неудовлетворительное техническое состояние (старение, износ) силовых трансформаторов, что составляет 27% из всех повреждений.

Статистика повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ (по данным ПАО «Татнефть») приведена на рисунке 1.

Статистика повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ

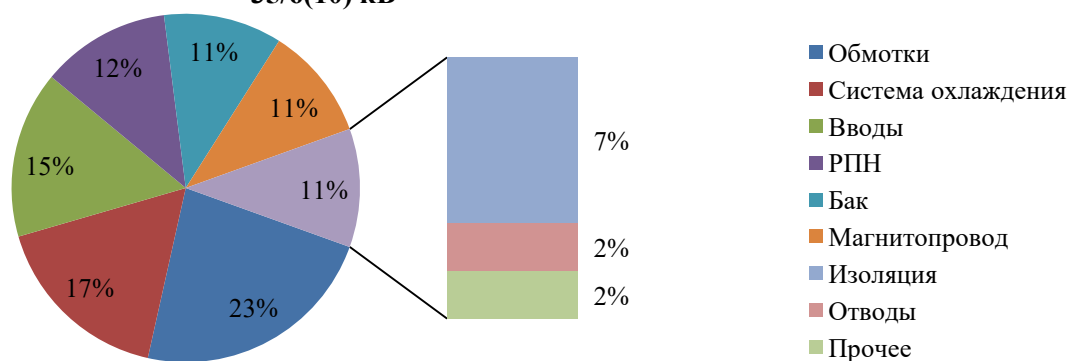


Рисунок 1 – Статистика повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ

Согласно рисунку 1, одними из основных повреждаемых элементов силовых маслонаполненных трансформаторов 35/6(10) кВ являются обмотки – 23%, система охлаждения – 17%, вводы – 15%, регулятор напряжения под нагрузкой (РПН) – 12% и бак – 11%.

Для контроля технического состояния силового трансформатора под рабочим напряжением в сетях 35/6(10) кВ применяются методы неразрушающего контроля (МНК) (анализ растворенных газов (АРГ) в масле, тепловой, вибрационный, электрический, акустический и др.). Значительная часть отказов трансформаторов может быть предотвращена при своевременном выявлении и принятии мер по восстановлению работоспособности. Существующая система ТОиР силовых

трансформаторов не всегда своевременно может определить его техническое состояние, так как проводится по графику и в определенные временные интервалы, что может привести к выходу его из строя.

Во второй главе представлена разработанная автором диссертации интеллектуальная система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния (ИСОМТС) силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ.

Силовой маслонаполненный трансформатор является сложной системой, состоящий из совокупности функциональных узлов. По каждому функциональному узлу рассмотрены методы контроля, определенные нормативно-технической документацией (НТД), предназначенные для онлайн-мониторинга.

Автором диссертации была разработана структурная схема ИСОМТС, включающая семь блоков (рис. 2):

- измерений;
- передачи и первичной обработки данных;
- формирования базы данных;
- формирования базы знаний;
- обработки и анализа данных;
- принятия решений;
- вывода результатов.

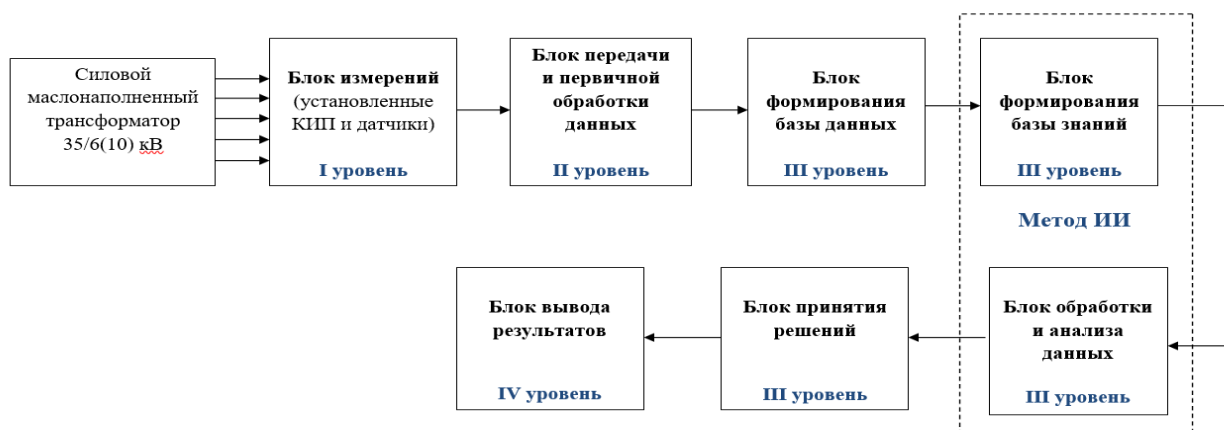


Рисунок 2 – Структурная схема ИСОМТС силового маслонаполненного трансформатора

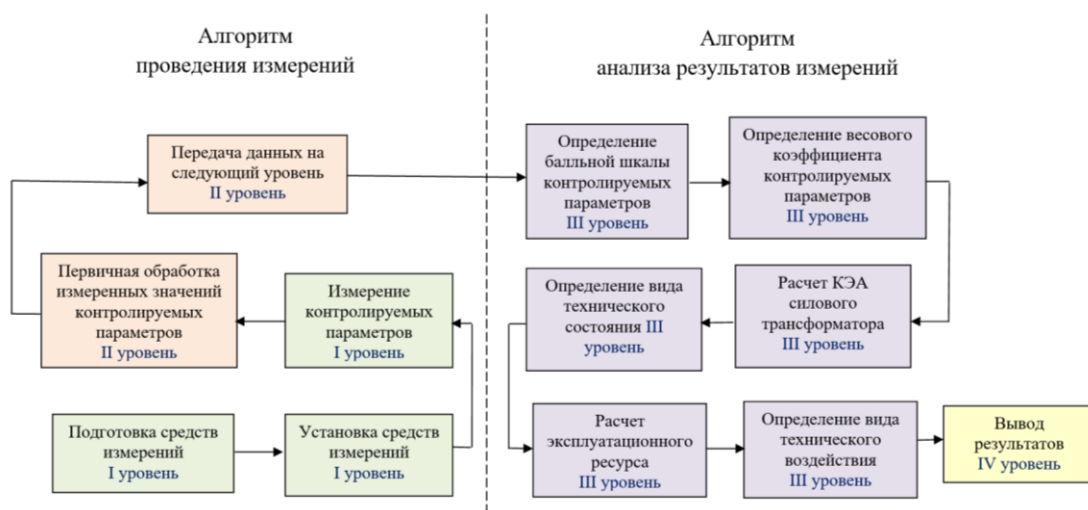


Рисунок 3 – Методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового трансформатора 35/6(10) кВ

ИСОМТС силового трансформатора является многоуровневой системой, которая состоит из четырех уровней передачи данных: уровень I (уровень сбора данных), уровень II (уровень мониторинга), уровень III (диагностический уровень подстанции), уровень IV (диагностический уровень энергопредприятия) (рис. 2).

Разработанная методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового трансформатора позволяет определить интегральный показатель технического состояния (коэффициент экспресс-анализа) (КЭА) и дать оценку эксплуатационного ресурса по результатам контроля функциональных узлов силового трансформатора. Представленная методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового трансформатора состоит из алгоритмов проведения измерений и анализа результатов измерений (рис. 3).

При анализе полученных измерений контролируемых параметров применяется параметрическая оценка – сопоставление фактических значений контролируемых параметров оборудования с их нормативными значениями, а также экспертная оценка – для определения важности контролируемых параметров, основываясь на данных эксплуатации.

Автором в диссертации было предложено модифицировать индекс технического состояния (ИТС) и ввести понятие КЭА. Расчет КЭА параметров силового трансформатора осуществляется по формуле:

$$KЭА = 100 \times \frac{\sum_{x_i}^{n} KB_{x_i} \times B_{x_i}}{4}, \quad (1)$$

где KB_{x_i} – значение весового коэффициента контролируемых параметров, определенное методом парных сравнений; B_{x_i} – значение, определенное в соответствии с методикой балльной шкалы параметров (таблица 1); x_i – контролируемые параметры; n – количество контролируемых параметров.

Таблица 1 – Определение балльной шкалы параметров

№ п/п	Балльная шкала	Характеристики диапазонов значений параметров
1.	Балл 4	Отсутствует отклонение измеренных параметров от требований НТД, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме
2.	Балл 3	Измеренные параметры находятся в пределах значений, определенной НТД, но появилась тенденция ухудшения значения такого параметра
3.	Балл 2	Измеренные параметры находятся в пределах значений, определенной НТД, но возникает угроза наступления отказов
4.	Балл 1	Измеренные параметры находятся на уровне предельно-допустимых значений, определенных НТД, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме
5.	Балл 0	Измеренные параметры находятся за пределами предельно-допустимых значений, определенных НТД

Параметрическая оценка осуществляется по следующей последовательности: каждое измеренное значение контролируемого параметра x_i оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений от предельно-допустимых. Балльная шкала варьируется от «0» (наихудшая оценка) до «4» (наилучшая оценка) в соответствии с методикой Минэнерго России.

Экспертная оценка применяется для определения весовых коэффициентов, которые принимают значение от 0 до 1 в соответствии с методикой Минэнерго России. Весовые коэффициенты отражают важность и характеризуют степень влияния контролируемых параметров на надежность и работоспособность силового трансформатора.

Автором диссертации была реализована ИСОМТС силового маслонаполненного трансформатора 35/6(10) кВ, диапазоны КЭА, визуализация и вид технического воздействия представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диапазоны КЭА с необходимым видом технического воздействия

Диапазон КЭА	Вид технического состояния	Визуализация (цвет)	Вид технического воздействия
$КЭА \leq 25$	Критическое	Красный	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
$25 < КЭА \leq 50$	Неудовлетворительное	Оранжевый	Дополнительное ТОиР, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$50 < КЭА \leq 75$	Удовлетворительное	Желтый	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт
$75 < КЭА \leq 100$	Хорошее	Зеленый	Плановое диагностирование

Далее согласно разработанной методике проводится расчет остаточного ресурса силового трансформатора. Рассчитывается текущее значение ресурса:

$$R_i = R_{i-1} \times \exp \left[-\frac{КЭА_{i-1} - КЭА_i}{100} \right], \quad (2)$$

где R_i и R_{i-1} – ресурс, определенный на текущий и в предыдущем моменте времени; $КЭА_i$ и $КЭА_{i-1}$ – КЭА на текущий и в предыдущем моменте времени.

Рассчитывается значение остаточного ресурса:

$$R_{ост} = R_i - R_{np}, \quad (3)$$

где R_{np} – предельно-допустимое значение ресурса, равное 0,2, что соответствует требованиям безопасной технической эксплуатации трансформаторов.

По мере увеличения срока службы ресурс трансформатора снижается до предельно-допустимого значения, который определяет момент прекращения его эксплуатации. Для восстанавливаемого оборудования – силового трансформатора – при проведении ТОиР интенсивность сработки ресурса уменьшается, а значение ресурса частично восстанавливается.

Алгоритм выработки рекомендаций по техническому обслуживанию силового трансформатора в сетях 35/6(10) кВ представлен на рисунке 4.

В третьей главе представлена разработка метода обработки данных в блоке формирования базы знаний ИСОМТС. Представлен анализ методов искусственного интеллекта (ИИ) для оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора.

В условиях цифровизации электроэнергетики данные, получаемые из различных КИП, с каждым годом увеличиваются, и классические методы обработки данных не справляются с большим объемом информации.

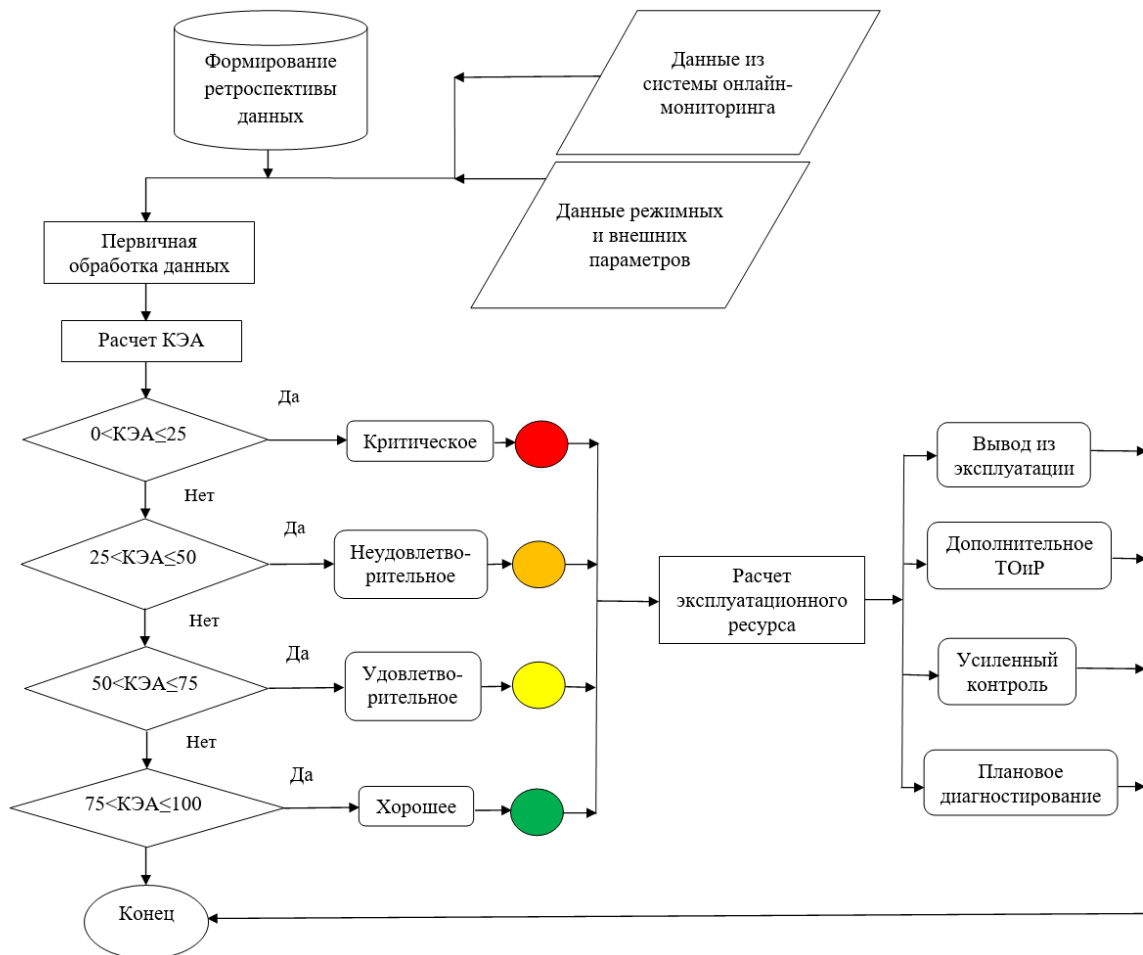


Рисунок 4 – Алгоритм выработки рекомендаций по техническому обслуживанию

Для решения поставленной задачи автором предложено рассмотреть следующие методы:

1. **Линейная регрессия** – статистический метод, основанный на построении линейной зависимости между входными признаками и целевой переменной. Метод прост в реализации, но не применим для выявления нелинейных взаимосвязей.

2. ***k*-ближайших соседей** – метод, основанный на усреднении значений целевой переменной объектов обучающей выборки, которые наиболее близки к анализируемому объекту в пространстве признаков. Метод имеет ограничения по использованию при большом объеме обучающей выборки.

3. **Регрессионное дерево решений** – метод, основанный на разделении выборки на подмножества с помощью построения иерархической системы правил. Каждое правило сравнивает значение одного из признаков с пороговым значением. Метод способен аппроксимировать кусочно-непрерывные зависимости, но чувствителен к выбросам в исходных данных.

4. **Метод опорных векторов** – метод, основанный на определении наиболее значимых объектов обучающей выборки и преобразовании пространства признаков в пространство более высокой размерности. Для этого используются радиальные базисные функции, за счет чего метод способен выявлять сложные нелинейные зависимости между признаками.

Точность и качество обучения модели измеряется метрикой качества. В диссертации были использованы следующие метрики и их формулы (таблица 3).

Таблица 3 – Используемые метрики качества и их формулы

№ п/п	Метрики качества	Формула
1.	Среднеквадратичная ошибка прогноза	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2$
2.	Корень из среднеквадратичной ошибки прогноза	$RMSE = \sqrt{MSE}$
3.	Средняя по модулю ошибка	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^* - y_i $
4.	Нормализованная средняя по модулю ошибка	$nMAE = \frac{MAE}{\bar{y}} \cdot 100\%$
5.	Коэффициент детерминации	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$

Рассматриваемые методы использовались для обработки данных, получаемых из системы онлайн-мониторинга. Для обучения моделей использовались 267 записей, относящихся к «хорошему», «удовлетворительному», «неудовлетворительному» и «критическому» состояниям. Результаты обучения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Метрики качества

	MSE	RMSE	MAE	nMAE [%]	R ²
Линейная регрессия	0,0160	0,1264	0,10264	23,8223	0,6585
k-ближайших соседей	0,01684	0,1297	0,0965	22,4044	0,64056
Дерево решений	0,01767	0,1329	0,08898	20,6520	0,6227
Метод опорных векторов	0,0129	0,1137	0,0865	20,0778	0,7241

Результаты показали, что зависимости между параметрами и техническим состоянием силового трансформатора имеют сложный характер и не могут быть определены с приемлемой точностью на базе рассмотренных методов.

Автором диссертации принято решение использовать метод нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть (ИНС) – метод, основанный на системном взаимодействии нейронов. Каждый нейрон вычисляет взвешенную сумму входных сигналов. При использовании ИНС возможно реализовать сложные структуры моделей, однако их применение требует тщательного выбора архитектуры модели и настройки гиперпараметров. Выбрана модель на основе многослойного персептрона с прямым распространением ошибки. Оптимизируемые гиперпараметры:

- число скрытых слоев;
- число нейронов в слоях;
- коэффициент L2-регуляризации;
- алгоритм обучения на базе обратного распространения ошибки (классический стохастический градиентный спуск, алгоритм с инерцией RMSProp и алгоритм Adam с адаптацией шага обучения к изменению весов связей между нейронами);

- функция активации нейронов (ReLU или гиперболический тангенс).

На рисунке 5 представлена зависимость ошибки модели MSE для модели с одним скрытым слоем от числа нейронов в нем.

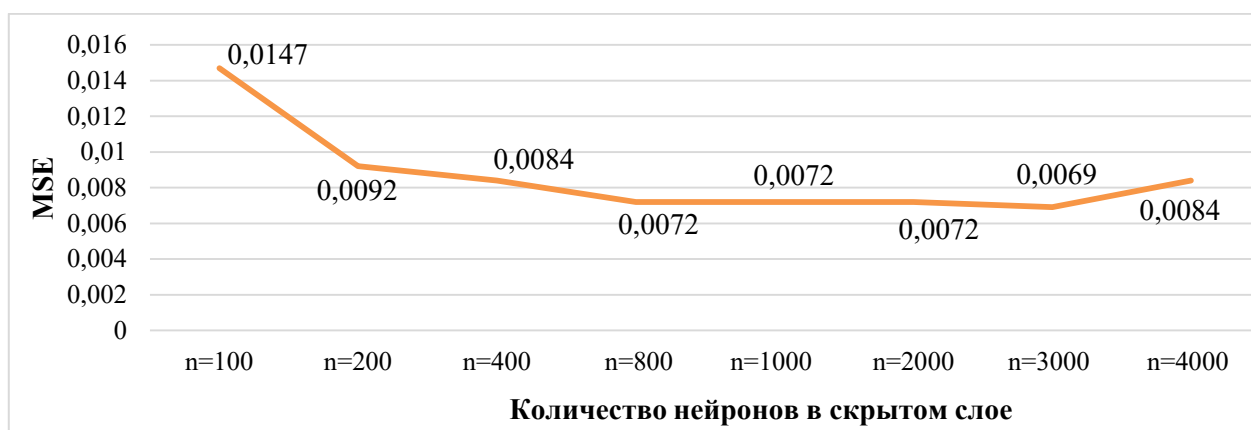


Рисунок 5 – Зависимость ошибки модели MSE от числа нейронов

Наилучший результат показал многослойный персептрон с одним скрытым слоем из 3000 нейронов, коэффициентом L2-регуляризации 0,001, функцией активацией ReLU. Использование большего числа слоев позволяет достичь точности близкой, к точности модели с одним слоем, используя при этом меньшее суммарное число нейронов.

Автором диссертации предложена новая архитектура многослойной нейросетевой модели, отличающаяся использованием радиальных базисных функций в обучающемся отдельно первом слое для повышения точности оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов (рис. 6).

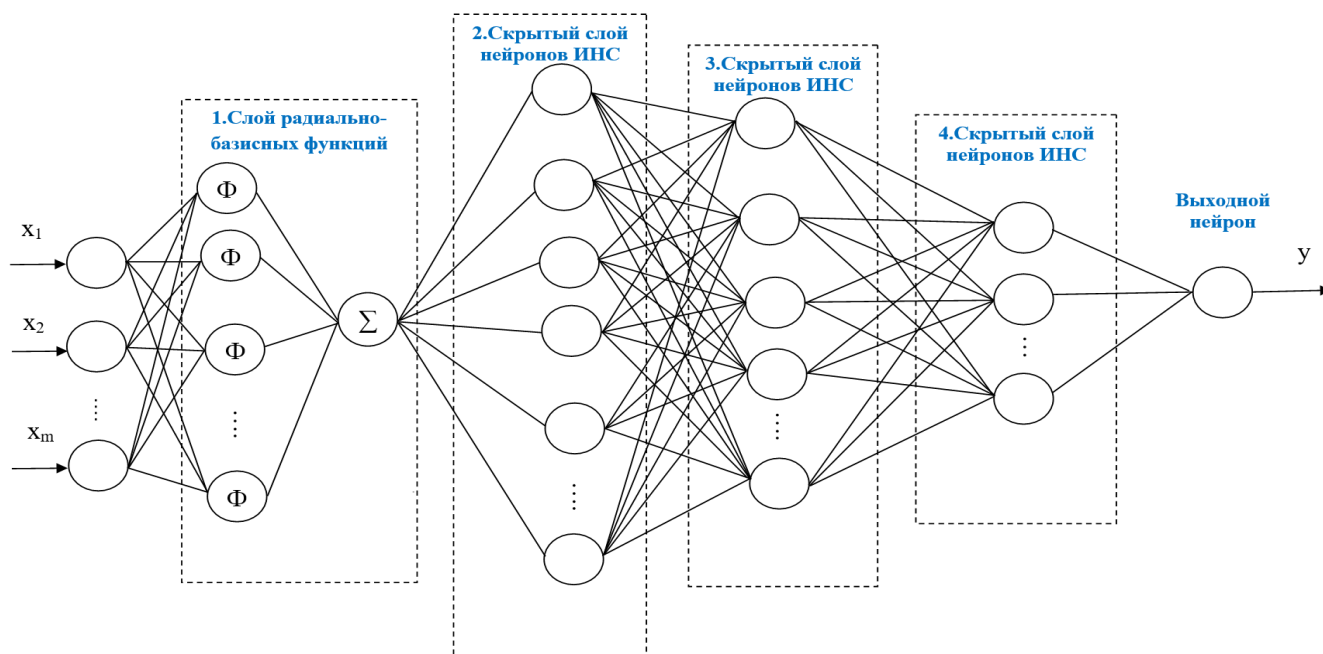


Рисунок 6 – Архитектура разработанной многослойной нейросетевой модели

В таблице 5 представлены результаты обучения новой архитектуры. Из результатов видно, что использование радиальных базисных функций метода опорных векторов позволяет повысить точность. Хотя из сравнения R^2 может

показаться, что улучшение несущественное (0,85 против 0,9), но MSE уменьшается с 0,0069 до 0,0049.

Таблица 5 – Результаты обучения новой архитектуры

	MSE	RMSE	MAE	nMAE [%]	R ²
SVM +1 скрытый слой 10 нейронов	0,0074	0,0862	0,0699	16,2142	0,8412
SVM +1 скрытый слой 50 нейронов	0,0067	0,0819	0,0661	15,3481	0,8570
SVM +1 скрытый слой 100 нейронов	0,0063	0,0794	0,0640	14,8567	0,8655
SVM + 2 скрытых слоя, 100 и 50 нейронов	0,0061	0,0780	0,0628	14,5724	0,8694
SVM + 3 скрытых слоя 100, 50 и 25 нейронов	0,0049	0,0699	0,0570	13,2326	0,8957
SVM + 3 скрытых слоя, 200, 100 и 50 нейронов	0,0056	0,0748	0,0594	13,7950	0,8806

В четвертой главе представлены практические результаты работы ИСОМТС силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ. Разработанная ИСОМТС была установлена на силовые трансформаторы марки ТМН – 6300/35 в ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина.

Контролируемые параметры силового маслонаполненного трансформатора онлайн-мониторинга представлены в таблице 6. При выборе КИП и датчиков были определены следующие критерии: регистрация и анализ данных в онлайн-режиме; возможность определения технического состояния силового трансформатора под рабочим напряжением. Выбраны наиболее предпочтительные КИП отечественных производителей для онлайн-мониторинга силовых трансформаторов 35/6(10) кВ (таблица 6).

Таблица 6 – Перечень контролируемых параметров с КИП

Метод онлайн-контроля	Диагностические параметры	КИП
АРГ	АРГ [ppm]	Газоанализатор Intellix GLA 100
Анализ разрядной активности	Уровень частичных разрядов (ЧР) [dBm]	Системы TDM-S, TDM-10
Анализ влагосодержания масла	Влагосодержание в масле [г/т]	Система TDM-10
Анализ температуры вводов	Температура контактных соединений (КС) вводов [°C]	Датчики RF-Sens, WDM-T
Анализ температуры масла	Температура масла в баке [°C]	Системы TDM-10, TDM-S
Вибрационный анализ	Виброскорость бака [мм/сек]	Датчик вибрации ИВД-3Ц-3

Рассчитанные по методу Саати весовые коэффициенты контролируемых параметров силового трансформатора: уровень ЧР – 0,19; влагосодержание масла – 0,19; АРГ – 0,1; температуры КС вводов фаз А, В, С – 0,096; виброскорость бака – 0,062; температура масла – 0,051; срок службы – 0,022; коэффициент загрузки – 0,033; температура воздуха – 0,033; относительная влажность воздуха – 0,031.

Автором диссертации разработана основа для анализа полученных результатов, где для каждого контролируемого параметра определены диапазоны предельно-допустимых значений (таблица 7).

На этапе обработки данных реализован алгоритм, основанный на нейросетевой модели с использованием радиальных базисных функций. Функциональная схема разработанной ИСОМТС представлена на рисунке 7.

Таблица 7 – Основа для анализа полученных результатов

№ п/п	Контролируемые параметры	Хорошее состояние	Неудовлетворительное состояние	Критическое состояние	Целевая функция
	Балльная шкала	4	2	1	
Данные из системы онлайн-мониторинга					
x_1	Уровень ЧР	$(-60) \leq x < (-30)$	$(-30) \leq x < (-20)$	$(-20) \leq x < (-8)$	
x_2	Влагосодержание масла	$x/30 < 1$ и $x/25 \leq 1$	$x/30 \leq 1$ и $x/25 > 1$	$x/30 > 1$	
x_3	АРГ в масле	$25 \leq x \leq 399$	$400 \leq x \leq 499$	$500 \leq x \leq 5000$	
При $I_{раб} = (0,3-0,6) * I_{ном}$, т.е. $0,3 \leq x_{12} < 0,6$					
$x_{4'}$	Температура КС вводов ф. А	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(x_4 - x_{10}) * (0,5 * x_{12} / x_{13})^2$
$x_{5'}$	Температура КС вводов ф. В	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(x_5 - x_{10}) * (0,5 * x_{12} / x_{13})^2$
$x_{6'}$	Температура КС вводов ф.С	$x < 10$	$10 \leq x < 30$	$x \geq 30$	$(x_6 - x_{10}) * (0,5 * x_{12} / x_{13})^2$
ИЛИ					
При $I_{раб} = (0,6-1) * I_{ном}$, т.е. $0,6 \leq x_{12} \leq 1$					
$x_{4''}$	Температура КС вводов ф.А	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(x_4 - x_{10}) * (x_{14} / x_{13})^2$
$x_{5''}$	Температура КС вводов ф.В	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(x_4 - x_{10}) * (x_{14} / x_{13})^2$
$x_{6''}$	Температура КС вводов ф.С	$x < 20$	$20 \leq x < 40$	$x \geq 40$	$(x_4 - x_{10}) * (x_{14} / x_{13})^2$
x_7	Виброскорость бака	$x < 6,1$	$6,1 \leq x < 10$	$x \geq 10$	
x_8	Температура масла	$x < 80$	$80 \leq x < 95$	$x \geq 95$	
x_9	Срок службы	$x < 0,57$	$0,57 \leq x < 1,85$	$x \geq 1,85$	$(x_{16} - x_{15}) / 25$
x_{10}	Температура воздуха	$(-45) < x < (+40)$		$x \geq (+40)$ или $x < (-45)$	
x_{11}	Относительная влажность воздуха	$x \leq 75$		$x > 75$	
x_{12}	Коэффициент загрузки	$x < 0,8$	$0,8 \leq x < 1,2$	$1,2 \leq x < 1,6$	x_{13} / x_{14}
Паспортные данные трансформатора					
x_{13}	Рабочий ток = 31,5 А				
x_{14}	Номинальный ток = 103,9 А				
x_{15}	Год изготовления = 1982				
x_{16}	Текущий год = 2024				

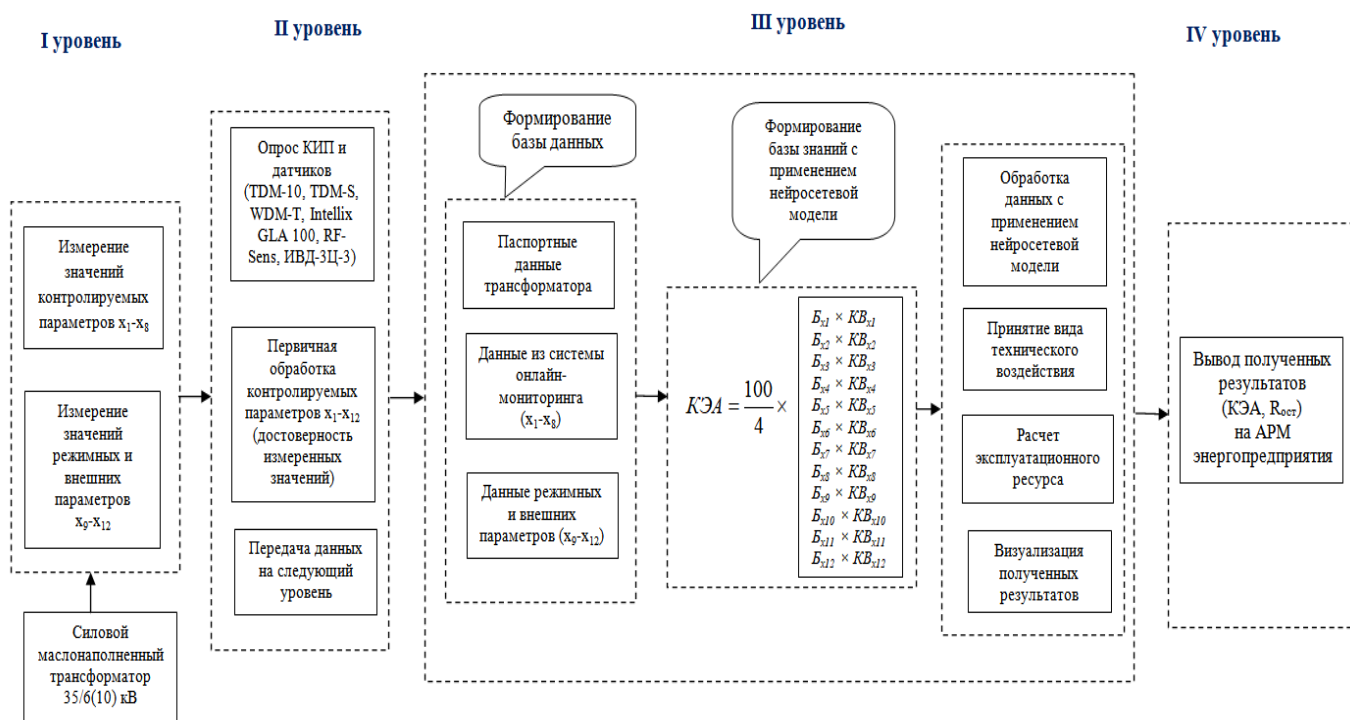


Рисунок 7 – Функциональная схема разработанной ИСОМТС силового трансформатора

Полученные экспериментальные результаты ИСОМТС силовых трансформаторов ТМН-6300 подтверждают работоспособность предложенной системы. По результатам последних измерений ИСОМТС рассчитан остаточный ресурс по двум трансформаторам (таблица 8): трансформаторы находятся в удовлетворительном состоянии, необходим усиленный контроль с дальнейшим выводом на капитальный ремонт.

Таблица 8 – Результаты расчета остаточного ресурса с учетом КЭА

Год эксплуатации	Трансформатор №1			Трансформатор №2		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
КЭА	83,9	74,7	65,1	82,7	75,6	68,1
Текущий ресурс [о.е.]	0,94	0,776	0,698	0,93	0,78	0,724
Остаточный ресурс [о.е.]	0,74	0,576	0,498	0,73	0,58	0,524
Остаточный ресурс [год]	3 г 3 мес.	2 г 11 мес.	2 г 5 мес.	3 г 2 мес.	2 г 11 мес.	2 г 7 мес.

В диссертации погрешности измерений играют важную роль. При проведении оценки технического состояния силового трансформатора приходится оперировать большим объемом данных, поэтому были определены приборная погрешность и расширенная неопределенность оценки по ГОСТ 34100.3 2017. Средняя расширенная неопределенность оценки технического состояния – 4,31%, что не противоречит допустимому уровню (5%). Достоверность полученных данных обеспечивается применением аттестованных измерительных средств.

Результаты экспериментальных исследований диссертационной работы реализованы в ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина, в компании ООО «Димрус», в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГЭУ», что подтверждено актами внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ существующих методов и систем контроля силового трансформатора в сетях 35/6(10) кВ. Установлено, что 60% эксплуатируемых силовых трансформаторов выработало свой ресурс, следовательно, контроль и оценка технического состояния, способствующая увеличению эксплуатационного ресурса, является актуальной задачей.

2. Разработана интеллектуальная система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслонаполненного трансформатора под рабочим напряжением в сетях 35/6(10) кВ, позволяющая автоматизировать процесс контроля и оценки технического состояния с применением методов ИИ на основе данных МНК.

3. Разработана методика онлайн-мониторинга и оценки технического состояния силового маслонаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ, позволяющая определить техническое состояние с использованием КЭА и отличающаяся возможностью определения его эксплуатационного ресурса.

4. Разработана новая архитектура многослойной нейросетевой модели с использованием радиальных базисных функций в обучающемся отдельно первом слое для повышения точности оценки технического состояния силового

маслонаполненного трансформатора, позволяющая автоматизировать онлайн-контроль.

5. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для реализации методики онлайн-мониторинга и оценки технического состояния, алгоритм выработки рекомендаций по техническому обслуживанию с целью продления ресурса силового маслаполненного трансформатора в сетях 35/6(10) кВ

6. Разработанная интеллектуальная система онлайн-мониторинга и контроля технического состояния установлена на силовых трансформаторах ТМН 6300 в сетях 35/6(10) кВ. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния, показали среднюю расширенную неопределенность оценки технического состояния – 4,31%.

Рекомендации

Подходы, используемые в разработанной интеллектуальной системе онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслаполненного трансформатора, могут быть использованы для любых мощностей силовых трансформаторов 35/6(10) кВ.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Совершенствование интеллектуальной системы онлайн-мониторинга и контроля технического состояния силового маслаполненного трансформатора для разработки системы превентивной диагностики с последующим прогнозированием работоспособности силовых трансформаторов, формирование источника данных для прогнозных моделей по силовым маслаполненным трансформаторам в сетях 35/6(10) кВ.

Задачи, поставленные в данном диссертационном исследовании, решены в полном объеме. Цель диссертационной работы достигнута.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных

A1. 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. (МБД SCOPUS).

A2. Ivshin I., Galyautdinova A., Vladimirov O., Nizamiev M., Safiullin A. Software and algorithmic support for online assessment of transformer substation technical condition 35/6(10) kV // Proceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2023. 2023. 10086828. (МБД SCOPUS).

Статьи в рецензируемом научном издании, входящим в перечень ВАК по специальности диссертации

A3. Ившин И.В., Галютдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф., Карпов Е.Н., Мельник Э.П. Интеллектуальная система оценки технического

состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 24-34. – DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35 (ВАК К2).

А4. 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 (ВАК К2).

А5. 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 (ВАК К2).

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

А6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022682581. Определение уровня технического состояния магнитопровода силового трансформатора / Ившин И.В., Басенко В.Р., Галяутдинова А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.11.2022.

А7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024662931. Программа оценки технического состояния силового трансформатора на основе машинного обучения / Галяутдинова А.Р., Соловьев С.А., Петров К.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.06.2024.

Подписано в печать 02.10.2024. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ №357 от 02.10.24

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «45»
420043, г. Казань, ул. Чехова, 28, пом. 32
Тел.: 558-71-29
