

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Яхья Аммар Абдулазиз Яхья** «Совершенствование моделей предиктивной диагностики и оценки состояния трансформаторного оборудования энергообъектов», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

1. Структура и объем диссертации

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 146 наименований, и двух приложений. Диссертация изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунка и 35 таблиц.

2. Актуальность темы диссертации

Возрастающий износ основных производственных активов, требования по поддержанию достаточного уровня надежности функционирования электросетевого комплекса, а также необходимость удержания расходов на эксплуатацию оборудования создают вызовы для внедрения технологических систем предиктивной диагностики и оценки технического состояния силового оборудования. Данные системы призваны обеспечить непрерывный контроль для перехода к эксплуатации по техническому состоянию с обнаружением дефектов и повреждений на ранних стадиях развития. Сложность решения подобных задач определяется, во-первых, существенным отличием входной информации о состоянии контролируемого объекта как по масштабу, так и достоверности, во-вторых, неоднозначностью интерпретации диагностируемых признаков.

Исходя из вышеизложенного, актуальность задачи совершенствования математических моделей оперативной и предиктивной оценки технического состояния силовых трансформаторов, а также систем поддержки принятия решений по обеспечению их надежной эксплуатации не вызывает сомнений.

3. Оценка содержания диссертации

Во введении кратко приведена характеристика работы, обозначена ее структура, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, представлены научная новизна, положения,

выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

В первой главе представлен сравнительный анализ современных методов и моделей для оценки технического состояния и остаточного эксплуатационного ресурса электрооборудования. Произведен аналитический обзор существующих методов off-line и on-line диагностирования (мониторинга) силового маслонаполненного трансформаторного оборудования. Рассмотрены наиболее эффективные и широко применяемые методы раннего обнаружения дефектов в силовых трансформаторах, дана их характеристика с точки зрения интегральной оценки на базе индекса технического состояния и прогнозной оценки остаточного эксплуатационного ресурса. Выполнена оценка эффективности методов мониторинга параметров технического состояния силовых трансформаторов. Приведен анализ современной технологии повышения эксплуатационной надежности оборудования с использованием систем удаленного мониторинга, основными функциями которой является мониторинг основного оборудования и возможность удаленного отключения.

Разработана математическая модель вероятности отказа отдельных функциональных узлов и силового трансформатора в целом с учетом ИТС, позволяющая определить вероятность сложного события.

Кроме того, предложен показатель для сравнительной оценки информативности любого из методов мониторинга параметров состояния силового трансформатора.

Во второй главе произведен выбор математического аппарата для разработки предиктивных и адаптивных моделей оценки технического состояния силового трансформатора. Выполнен сравнительный анализ методов искусственного интеллекта, применяемых для диагностирования электрооборудования: искусственные нейронные сети, статистическую классификацию и распознавание образов, а также теорию нечетких множеств и нечеткой логики. Показана эффективность синтеза моделей и алгоритмов обладающих преимуществом нечетких подходов, обеспечивающие универсальную аппроксимацию, и Байесовского решения для минимизации ошибок диагностирования.

Разработаны и реализованы математические модели на основе аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики для верификации

наиболее известных и эффективных инструментов интерпретации результатов анализа растворенных в трансформаторном масле газов, таких как методы ИЕС, отношений Дорненбурга, треугольника Дюваля. Обосновано применение нечеткой предиктивной цифровой модели по методу треугольника Дюваля для вычислительного ядра системы поддержки принятия решений.

Третья глава посвящена совершенствованию моделей статистической Байесовской классификации дефектов в маслонаполненных СТ и их интеграции с оценкой остаточного эксплуатационного ресурса. Представлена базовая методика формирования статистических моделей для оперативной и предиктивной оценки состояния трансформаторов на основе Байесовских решений и результатов АРГ. Методика позволяет совершенствовать Байесовские модели в направлении повышения их адаптивности, реализованная через настройку границы раздела классов состояний силового трансформатора в зависимости от его текущей загрузки. Адаптация обеспечивает высокий уровень достоверности диагностических оценок.

В диссертационной работе показано, что статистические распределения Φ в каждом из классов состояний являются двухпараметрическими, подчиненными нормальному, логарифмически-нормальному или гамма законам. Данный факт определяет возможность применения Байесовского классификатора при формировании границы раздела дихотомии классов состояний силового трансформатора. Проведено исследование влияния количества и состава контролируемых диагностических параметров на изменение границы раздела классов состояний, а следовательно, на критерии классификации и распознавание дефектов в силовом трансформаторе, позволили сформировать практические требования к настройке моделей.

Четвертая глава посвящена реализации разработанных моделей и алгоритмов в составе информационно-аналитической системы (ИАС) поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторного оборудования на реальных энергетических объектах. Разработаны ключевые принципы и предложена архитектура ИАС с учетом ее применения для задач управления эксплуатацией силового трансформатора.

Интеллектуальным ядром разрабатываемой ИАС эксплуатации силового трансформатора являются предиктивные математические модели, обеспечивающие связь информативных параметров технического состояния с критериями принятия эксплуатационных решений. Базовой диагностической моделью, реализующей многоаспектность диагностических оценок и распознающей отсутствие в трансформаторе признаков развивающихся дефектов, является модель нормально работающего (бездефектного) силового трансформатора на основе метода статистической Байесовской классификации.

Кроме того, для реализации принципа дифференциальной диагностики предложены модели выявления отклонений от «нормы» в функциональных узлах трансформатора, устанавливающие однозначное соответствие между признаком возникшей неисправности и состоянием функционального узла.

Пятая глава посвящена разработке прикладного программного продукта «Программа распознавания дефектов в трансформаторах по результатам анализа растворенных газов», предназначенного для автоматизации процесса оценки технического состояния маслонеполненных трансформаторов 110 кВ и выше. В качестве исходных данных используется ретроспектива протоколов анализа растворенных газов в масле единичного трансформатора или группы однотипных трансформаторов. В качестве выходной информации программа формирует отчет о текущем техническом состоянии каждого единичного трансформатора, а также рекомендации о необходимости (целесообразности) проведения оперативных либо плановых мероприятий для поддержания (восстановления) его надежной эксплуатации.

В заключении сформулированы основные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы, определяющие и подтверждающие их научную новизну, практическую значимость, а также успешное решение всех поставленных в диссертации задач и достижение цели её выполнения.

4. Соответствие работы избранной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Материалы диссертации и автореферата соответствуют пунктам 5, 6, 13 области исследования паспорта научной специальности 05.14.02 по техническим наукам.

5. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

6. Методы исследования

При выполнении исследований в диссертационной работе использовались положения теории вероятности и математической статистики, методы Байесовской теории принятия решений, методы теории распознавания образов и нечеткие логики.

7. Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов и выводов базируется на корректном применении математического аппарата, непротиворечивости, согласованности результатов работы программы, реализующей предложенные модели диагностирования, с результатами опубликованных исследований других авторов, заключениями протоколов испытаний и положениями нормативных документов.

8. Уровень новизны научных положений, выводов и рекомендаций

1. Предложен метод совершенствования адаптивных (предиктивных) свойств статистических моделей Байесовской классификации дефектов в маслонаполненном трансформаторном оборудовании для повышения их достоверности в условиях вариации состава и количества контролируемых параметров за счет настройки положения границы раздела классов в пространстве состояний по критерию минимальной суммарной ошибки.

2. Впервые введена в рассмотрение количественная мера диагностической ценности любого метода мониторинга параметров состояния СТ в составе объекта электроэнергетики при оценке индекса технического состояния единицы оборудования, а также методика ее применения для определения показателей эксплуатационной надежности и экономической эффективности.

3. Разработан обобщенный адаптивный алгоритм управления техническим состоянием силового маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе оперативной (предиктивной) оценки и принятия решений по его дальнейшей надежной эксплуатации. Алгоритм реализован с

применением комбинированных моделей и методов статистической классификации, нечеткой логики и нечеткого логического вывода.

4. Разработано и протестировано прикладное программное обеспечение для оценки технического состояния маслonaполненного оборудования и выбора эксплуатационных воздействий, которое составляет вычислительное ядро информационно-аналитической системы поддержки принятия решений.

9. Ценность для науки и практики результатов исследований

Ценность для науки заключается в развитии математических моделей оперативной и предиктивной оценки состояния СТ, а также формировании ключевых компонент информационно-аналитической поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторного оборудования.

Практическая значимость заключается в том, что разработанные адаптивные модели предиктивной диагностики и оперативной оценки технического состояния силовых трансформаторов, а также методика их формирования и алгоритм принятия решений по управлению техническим состоянием представляют собой эффективное специализированное приложение к существующей системе мониторинга трансформаторного оборудования Новосибирской ГЭС, филиала ПАО «РусГидро».

Вычислительные модели и алгоритмы для расчета текущих значений индекса технического состояния единиц основного энергетического оборудования подстанций разных типов и классов напряжения (силовых трансформаторов, асинхронных двигателей, др.), а также значений их остаточного эксплуатационного ресурса нашли отражение в нормативно-методических документах ПАО «Газпром нефть». Они применяются при оптимизации планирования ТОиР энергооборудования с учетом его фактического технического состояния для повышения обоснованности принятия решений по объемам и периодичности технических воздействий.

Разработанное прикладное программное обеспечение, реализующее усовершенствованные математические модели и алгоритмы оценки технического состояния маслonaполненного трансформаторного оборудования и выбора воздействий по поддержанию его работоспособности, доступны в учебном процессе подготовки магистров направления 13.04.02 «Электроэнергетические системы и сети» по дисциплине «Эксплуатация электрических сетей»

10. Отличие выполненных исследований от других работ

Диссертационную работу Яхья А.А. отличает от других работ, выполненных в области мониторинга и диагностики силовых трансформаторов методически целостный подход к обоснованию корректности разработанных методов, моделей, алгоритмов и технических средств, эффективности их практического применения в условиях реальной эксплуатации, для чего потребовалась разработка методического обеспечения:

1. Произведен аналитический обзор математических методов искусственного интеллекта и машинного обучения с целью дальнейшего совершенствования моделей предиктивной диагностики и оперативной оценки технического состояния маслонаполненного трансформатора.

2. Впервые введен в рассмотрение индекс диагностической ценности методов контроля (мониторинга) параметров состояния маслонаполненного трансформатора при расчете его ИТС и остаточного эксплуатационного ресурса.

3. Разработаны нечетко-логические предиктивные модели для определения типа прогнозируемого в трансформаторе дефекта с применением наиболее эффективных методов интерпретации результатов АРГ (ИЕС, Дорненбурга, треугольника Дюваля), выполнена их верификация на ряде независимых примеров из практики эксплуатации силового трансформатора

4. Разработан обобщенный алгоритм предиктивной и оперативной оценки состояния, расчета ИТС и остаточного эксплуатационного ресурса единичного силового трансформатора.

5. Сформирована базовая структура, ключевые функции и состав информационного обеспечения ИАС поддержки принятия решений по длительной надежной и безопасной эксплуатации маслонаполненного трансформатора.

6. Разработано прикладное программное обеспечение, представляющее собой вычислительное ядро системы поддержки принятия решений по безопасной эксплуатации маслонаполненного трансформатора в составе энергетических объектов ЭЭС и реализующее разработанные модели и алгоритмы на единой вычислительной платформе.

11. Подтверждение опубликованных результатов диссертации в научной печати

По теме диссертационной работы опубликована 19 статей, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 публикаций в материалах конференций и в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science, 10 публикаций в прочих изданиях, получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

12. Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам

Полученные результаты соответствуют поставленной цели диссертации. Сформулированные в диссертации научные задачи решены полностью.

13. Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. В чем заключается необходимость реализации предиктивной аналитики на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения?

2. На рисунках 2.3 – 2.5 второй главы диссертационной работы приведены функции принадлежности входных переменных с указанием, что «Функции принадлежности для входных переменных, полученных с помощью инструмента нечеткой логики..». Прошу пояснить в чем заключаются данные принципы, каким образом определен вид функций принадлежности, пороговые уровни?

3. Чем объясняется классификация лингвистических переменных (стр. 53) по четырем зонам: Нормальное (N), Низкое (A), Среднее (B) или Высокое (C)?

4. Каким образом были определены априорные вероятности принадлежности силового трансформатора к каждому из возможных состояний? Насколько чувствительным является Байесовский подход для методов с меньшей частотой измерений и ретроспективой, чем АРГ?

5. В каком режиме должна применяться разработанная система мониторинга и диагностики для обеспечения оптимальной эксплуатации силовых трансформаторов?

Замечания существенно не влияют на научную, практическую значимость результатов диссертации и носят уточняющий, рекомендательный характер.

14. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

Диссертационная работа Яхья А.А. отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» №842 от 24 сентября 2013 г. (ред. 21.04.2016).

По п.9 Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором самостоятельно исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение достоверности и оперативности методов и средств мониторинга и диагностики электрооборудования.

По п.10 Диссертация написана автором самостоятельно, обладает единством, содержит научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и рекомендации по использованию научных выводов.

По п.11-13. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из списка рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Количество публикаций автора в этих изданиях составляет 5 статей.

По п.14. Диссертация отвечает требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

15. Заключение

Приведенные замечания не снижают актуальности и значимости научно-квалификационной работы Яхья А.А. В ней на основании выполненных автором самостоятельно исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение достоверности и оперативности методов и средств мониторинга и диагностики электрооборудования. Диссертация написана хорошим языком, прошла широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях, автореферат и публикации полностью раскрывают ее содержание.

С учётом вышеизложенного считаю, что представленная работа «Совершенствование моделей предиктивной диагностики и оценки состояния трансформаторного оборудования энергообъектов» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а ее автор Яхья Аммар Абдулазиз Яхья заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент
доцент кафедры «Автоматизированные
электрические системы»

Дмитриев
Степан
Александрович

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»,

18.03.22

кандидат технических наук по
специальности 05.14.02 – Электрические
станции и электроэнергетические системы,
доцент

Сведения:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина».

Юридический адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Телефон: +7 (343) 375-44-44

Эл. адрес: sa.dmitriev@urfu.ru

Должность: доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы»

Ф.И.О.: Дмитриев Степан Александрович

ПОДПИСЬ *Дмитрий*
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ
МОРОЗОВА В.А.

Копия получена 28.03.2022 г.
Сотсков *Юсупов*

С отзывом от Накомлетт 28.03.2022 г. *Яхья А.А.*