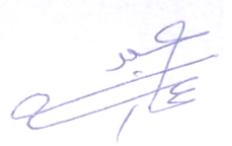


На правах рукописи



ЯХЪЯ АММАР АБДУЛАЗИЗ ЯХЪЯ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРЕДИКТИВНОЙ
ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Левин Владимир Михайлович,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Назарычев Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, кафедра «Электроэнергетики и электромеханики», профессор;

Дмитриев Степан Александрович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, кафедра «Автоматизированных электрических систем», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Защита диссертации состоится «14» апреля 2022 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» февраля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных экономических условиях важной задачей электроэнергетики остается обеспечение надежности электроснабжения потребителей. Повышенные требования по надежности предъявляются ко всей системе передачи и распределения электрической энергии, важнейшим элементом которой служит трансформаторное оборудование. Силовые трансформаторы (СТ) электростанций и электрических сетей представляют собой критически важное оборудование электроэнергетической системы (ЭЭС) в силу своей сложности, высокой стоимости и функциональной ответственности. Поддержание эксплуатационной надежности и предотвращение аварийных отключений трансформаторов призвана обеспечивать система технического обслуживания и ремонтов по фактическому техническому состоянию.

Вполне очевидным фактом сегодня является то, что эффективная эксплуатация объектов ЭЭС базируется на эффективной диагностике электрооборудования (в том числе и трансформаторного). Современные задачи эффективной диагностики не ограничиваются: выбором комплекса информативных контролируемых параметров оборудования, качественным их измерением в условиях эксплуатации и достоверной интерпретацией полученных результатов. Благодаря цифровой трансформации отрасли эти задачи получили значительное расширение в направлении: рационального сочетания методов on-line и off-line мониторинга СТ энергообъектов, включая технологии удаленного мониторинга, интегральной оценки состояния и прогнозирования отказа и остаточного эксплуатационного ресурса СТ, формирования математических моделей предиктивной аналитики на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения, разработки систем принятия решений и выбора эффективных эксплуатационных воздействий. Одним из существенных ограничений при формулировке и решении ряда перечисленных задач является отсутствие технической возможности применения многокомпонентного диагностирования в режиме on-line мониторинга. Указанное ограничение обусловлено рядом причин, включая, главным образом, низкий уровень контролепригодности отдельных функциональных узлов и элементов конструкции СТ. С одной стороны это затрудняет разработку моделей оперативной и предиктивной оценки технического состояния и требует дополнительных исследований, а с другой, делает не очевидной необходимость создания универсальных многокомпонентных моделей на единой аппаратно-алгоритмической платформе.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в формирование и развитие традиционного направления научно-практических исследований в области диагностики трансформаторного оборудования внесли труды следующих отечественных и зарубежных ученых: П.М. Сви, В.В. Соколова, А.Г. Овсянникова, А.Н. Назарычева, А.И. Таджибаева, Г.В. Попова, В.Н. Осотова, Ю.Н. Львова, М.Ю. Львова, И.В. Давиденко, Л.А. Дарьяна, А.П. Долина, В.Г.

Гольдштейна, А.Ю. Хренникова, В.П. Вдовико, В.П. Васина, В.А. Русова, М. Duval, F. Jakob, P. Noble, J.J. Dukarm, O. Shutenko, I. Jakovenko, Sdood Abd Al-Gbar, Nor Asian Muhammad, Enwen Li, Zakir Husain, Shun Yuan Wang, Leehter Yao и др. Широко известны также работы в направлении совершенствования моделей диагностики и управления техническим состоянием трансформаторного оборудования с применением методов искусственного интеллекта авторов: С.А. Дмитриева, С.Е. Кокина, Левина В.М., В.З. Манусова, А.И. Хальясмаа и др.

Не смотря на многочисленные и всеобъемлющие исследования задача совершенствования математических моделей оперативной и предиктивной оценки технического состояния СТ, а также систем поддержки принятия решений по обеспечению их надежной эксплуатации по-прежнему является достаточно острой и актуальной.

В диссертационной работе предложены новые технические решения по обеспечению надежной эксплуатации СТ в составе энергетических объектов ЭЭС за счет совершенствования диагностических моделей, алгоритмов принятия решений и их программной реализации.

Объект исследования – трансформаторное оборудование, установленное и функционирующее на объектах ЭЭС: подстанциях электрических сетей, тепловых и гидравлических станциях.

Предмет исследования – математические модели и алгоритмы оценки технического состояния СТ, правила принятия решений по их надежной эксплуатации.

Цель работы. Совершенствование математических моделей оценки технического состояния силовых трансформаторов и алгоритмов принятия решений по их надежной эксплуатации в составе энергообъектов электроэнергетических систем, отличающихся свойствами предиктивности (предсказательности) и адаптивности (приспосабливаемости).

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **научные задачи:**

1. Сравнительный анализ методов и моделей для оценки технического состояния и остаточного ресурса электрооборудования (включая маслонаполненные силовые трансформаторы).

2. Выбор математического аппарата для разработки предиктивных и адаптивных моделей оценки технического состояния трансформаторного оборудования.

3. Разработка (совершенствование) математических моделей для оперативной оценки технического состояния и остаточного ресурса СМТ, исследование возможности повышения достоверности диагностических оценок.

4. Формирование структуры и функций информационно-аналитической поддержки принятия решений по обеспечению надежной эксплуатации маслонаполненного трансформаторного оборудования в составе объектов ЭЭС (электростанций и электросетевых подстанций).

5. Разработка и тестирование прикладного программного продукта «Программа распознавания дефектов в трансформаторах по результатам анализа растворенных газов».

Методы исследования. В работе использованы положения теории вероятности и математической статистики, методы Байесовской теории принятия решений, методы теории распознавания образов и нечеткие логики.

Обоснованность теоретических положений и выводов диссертации вытекает из строгости применяемых математических методов, а **достоверность** разработанных моделей подтверждается совпадением результатов с результатами опубликованных исследований других авторов, заключениями протоколов испытаний и положениями нормативных документов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

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 (ППО) для оценки технического состояния МНТО и выбора эксплуатационных воздействий, которое составляет вычислительное ядро информационно-аналитической системы поддержки принятия решений. ППО разработано в вычислительной среде LabView.2018, отличается высоким уровнем визуализации, достоверности результатов оценок и удобством применения. В нем использованы разработанные адаптивные модели и алгоритмы, а также лучшие методики интерпретации результатов АРГ СТ (РД 153-34.0-46.302-00, треугольник Дюваля).

Теоретическая значимость работы 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 и ее тестировании на примерах конкретных энергообъектов.

Практическая значимость результатов работы:

1) 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».

2) 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.

3) Разработанное прикладное программное обеспечение, реализующее усовершенствованные математические модели и алгоритмы оценки технического состояния маслонаполненного 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».

Положения, выносимые на защиту:

1. Целесообразность совершенствования математических моделей статистической Байесовской классификации состояний СТ на основе результатов АРГ обоснована необходимостью развития их потенциала в направлении повышения:

- адаптивных свойств оперативной оценки состояния к изменениям значимых эксплуатационных факторов;
- универсальности в отношении статистических свойств распределений случайных контролируемых признаков, что повышает достоверность диагностических оценок;
- многокомпонентности диагностирования (мониторинга) отдельных функциональных узлов и СТ в целом что упрощает процедуру реализации технологии удаленного диагностического мониторинга трансформаторного оборудования, эксплуатируемого в составе энергообъектов ЭЭС: электростанций и электрических сетей.

2. Разработка диагностических моделей распознавания типа прогнозируемых в СТ развивающихся дефектов на основе аппарата нечеткой логики, нечеткого логического вывода, методов машинного обучения и метода АРГ обеспечивает высокий уровень достоверности диагностических оценок, что является необходимым условием для принятия обоснованных решений по обеспечению

дальнейшей надежной эксплуатации трансформаторного оборудования на объектах ЭЭС.

3. Обобщенный адаптивный алгоритм управления техническим состоянием силового маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе оперативной (предиктивной) оценки и принятия решений по дальнейшей надежной эксплуатации и его модификации представляют собой базовый компонент формируемой информационно-аналитической системы и обеспечивают комплексное решение задачи.

4. Прикладное программное обеспечение входит в вычислительное ядро информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по эксплуатации силового трансформаторного оборудования на энергообъектах ЭЭС и обеспечивает достоверные оценки по распознаванию дефектов в СТ без участия эксплуатационного персонала, что исключает возможные ошибки диагноза, обусловленные человеческим фактором.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы: п. 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок»; п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»; п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике»

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9-ти международных и Всероссийских научных конференциях, научных семинарах и заседаниях кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 21 статья, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 публикаций в материалах конференций и в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science, 11 публикаций в прочих изданиях. В совместных публикациях доля автора составляет не менее 60%.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы, состоящий из 146 библиографических ссылок, и два приложения. Общий объем работы составляет 193 страницы машинописного текста, в том числе 35 таблиц и 84 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, представлены научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость результатов 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, представляющего собой критически важное оборудование энергообъектов ЭЭС. Рассмотрены наиболее эффективные и широко применяемые методы раннего обнаружения дефектов в СТ, дана их характеристика с точки зрения интегральной оценки индекса технического состояния (ИТС) и прогнозной оценки остаточного эксплуатационного ресурса. Выполнена оценка эффективности методов мониторинга параметров технического состояния СТ как с off-line, так и с on-line применением. Отдельно проанализирована одна из современных технологий повышения эксплуатационной надежности оборудования с использованием систем удаленного (дистанционного) мониторинга, СУМиД, основными функциями которых являются:

1. Мониторинг основного оборудования (оценка остаточного ресурса, раннее обнаружение дефектов в СТ, прогнозирование вероятности аварийных событий, отказов);

2. Возможность удаленного выключения оборудования или изменения параметров и дистанционное управление основным оборудованием.

Разработана математическая модель вероятности отказа отдельных функциональных узлов (ФУ) и СТ в целом с учетом фактических значений его ИТС:

$$Q_{\text{сМТ}} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \left(1 - e^{-\bar{\omega}_0 \cdot B_i \cdot t} \right)$$

произведены количественные расчеты с ее использованием.

Впервые предложен показатель для сравнительной оценки информативности любого из методов мониторинга параметров состояния СТ, используемых в составе программно-аппаратного комплекса СУМиД объектов электрической сети:

$$D = 100 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i}{\sum_{j=1}^m b_{ij}} \right), \%$$

Значение D представляет собой количественную меру диагностической ценности метода мониторинга параметров при определении ИТС СТ и рассчитывается через соотношение весовых коэффициентов. Здесь b_{ij} , B_i – весовые коэффициенты j -й группы контролируемых параметров и i -го ФУ соответственно. Очевидно, что при наличии в СУМиД необходимого состава контролируемых параметров, достаточного для достоверной оценки ИТС (табл.1,2), значение D составляет 100%. При отсутствии данных о параметрах мониторинга состояния по какому-либо из методов, значение D становится больше 100 %. При этом приращение количественной оценки информативности метода мониторинга:

$$\Delta D = D - 100, \%$$

характеризует повышение эксплуатационной надежности СТ на ΔD % при

реализации данного метода за счет раннего выявления и своевременного устранения опасного развивающегося дефекта. На примере реальной электрической сети, содержащей подстанции 110-35-6(10) кВ с группой из 26 СТ 110 кВ и оснащенной СУМиД, доказан положительный экономический эффект от применения мониторинга маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе метода анализа растворенных газов (АРГ).

Таблица 1 – Комбинации параметров состояния ФУ и значения их весовых коэффициентов

№ п.п	Функциональный узел	Группа контролируемых параметров	Весовые коэффициенты, о.е.	
			b_{ij}	B_i
1	Изоляционная система (ИС)	1) анализ растворенных газов 2) физико-химический анализ 3) состояние целлюлозы 4) отношение концентраций пар характерных газов	0,425 0,425 0,140 0,010	0,32
2	Магнитная Система (МС)	1) локальный нагрев бака по результатам ТВК 2) потери холостого хода ΔP_x	0,500 0,500	0,18
3	Обмотки (ОБМ)	1) состояние геометрии обмоток 2) тенденции изменения $\text{tg}\delta_{\text{цел.}}$, R_{60} (по сравнению с начальным) 3) R постоянному току обмоток ВН, НН	0,010 0,500 0,490	0,18
4	Высоковольтные вводы (ВВ)	1) состояние изоляции 2) анализ растворенных газов 3) физико-химический анализ 4) целостность конструкции	0,250 0,250 0,250 0,250	0,13
5	РПН	1) состояние масла: пробивное напряжение, $W_{\text{масла}}$ 2) состояние контактора и механизмов привода	0,334 0,666	0,1
6	Система охлаждения (СО)	1) состояние навесного оборудования и бака 2) состояние защитного оборудования	0,500 0,500	0,09

На основе использования метода АРГ для мониторинга ФУ (ИС, ВВ) уровень эксплуатационной надежности СТ повышается на 27,3%, что приводит к экономии эксплуатационных затрат группы СТ 110 кВ за период ремонтного цикла 8 лет:

$$\mathcal{E} = \Delta Z_{\text{рц}} - Z_{\text{АРГ}} = 18,1142 - 1,8488 = 16,2654 \text{ млн. руб.},$$

где: $\Delta Z_{\text{рц}}$ – суммарная экономия затрат на техническое обслуживание и ремонт 26-ти СТ 110 кВ на подстанциях рассматриваемого сетевого района на интервале одного ремонтного цикла; $Z_{\text{АРГ}}$ – суммарные затраты на off-line мониторинг с применением АРГ 26-ти СТ. Отмечается, что учет в расчетах ряда конкретных допущений не может повлиять на качественное соотношение полученных результатов.

Вторая глава посвящена выбору математического аппарата для разработки предиктивных и адаптивных моделей оценки технического состояния СТ. Выполнен сравнительный анализ методов искусственного интеллекта, нашедших широкое применение при решении задач диагностирования электрооборудования (включая маслонаполненное трансформаторное оборудование). Среди них искусственные нейронные сети, статистическая классификация и распознавание образов, нечеткие множества и нечеткая логика. На основании анализа сделан вывод о том, что синтез моделей и алгоритмов, основанных на достоинствах указанных методов искусственного интеллекта, является перспективным направлением дальнейших исследований в диссертации. На основе аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики в диссертации разработаны модели интерпретации результатов АРГ в масле СТ, реализующие метод ИЕС, отношений Дорненбурга, треугольника Дюваля. Программная реализация указанных нечетких предиктивных моделей на единой универсальной цифровой платформе LabVIEW 2018 создает идеальные условия для взаимного сравнения точности методов интерпретации АРГ, достоверности нечетких моделей диагностической оценки в соответствии с их внутренними свойствами. Верификация моделей и их программной реализации на независимых примерах из практики эксплуатации СТ, а также результатах опубликованных сторонних исследований подтвердило выводы о сравнительной точности методов интерпретации результатов АРГ, позволило получить эффективные цифровые инструменты для практического применения в системах поддержки принятия решений по эксплуатации СТ.

Одним из значимых преимуществ разработанных автором нечетких предиктивных моделей определения вида дефектов в СТ по результатам АРГ является их программная реализация на единой цифровой платформе. Это позволяет воспроизводить диагностические оценки по разным моделям с единым уровнем достоверности при вариации исходных данных. На рис.1 показаны функции принадлежности входных переменных нечеткой предиктивной модели по методу Дорненбурга, которыми являются четыре соотношения газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$.

Разработанные цифровые модели и алгоритмы предиктивной оценки типа развивающихся в СТ дефектов были подвергнуты верификации на большом массиве статистических данных АРГ. Верификация цифровых моделей и алгоритмов выполнялась с целью сравнительной оценки достоверности, получаемых с их помощью результатов, во-первых, по отношению друг к другу (сравнение друг с другом методов интерпретации), а, во-вторых, по отношению к некоторому эталонному независимому решению. В качестве эталонного решения были использованы два типа данных: 1) данные из практики эксплуатации СТ типа ТДН-250000/220 кВ Новосибирской ТЭЦ-5, подтвержденные протоколами диагностических испытаний за достаточно продолжительный период (2006 – 2013) и актами вскрытия; 2) результаты исследований из опубликованных источников с индексацией в Web of Science и Scopus.

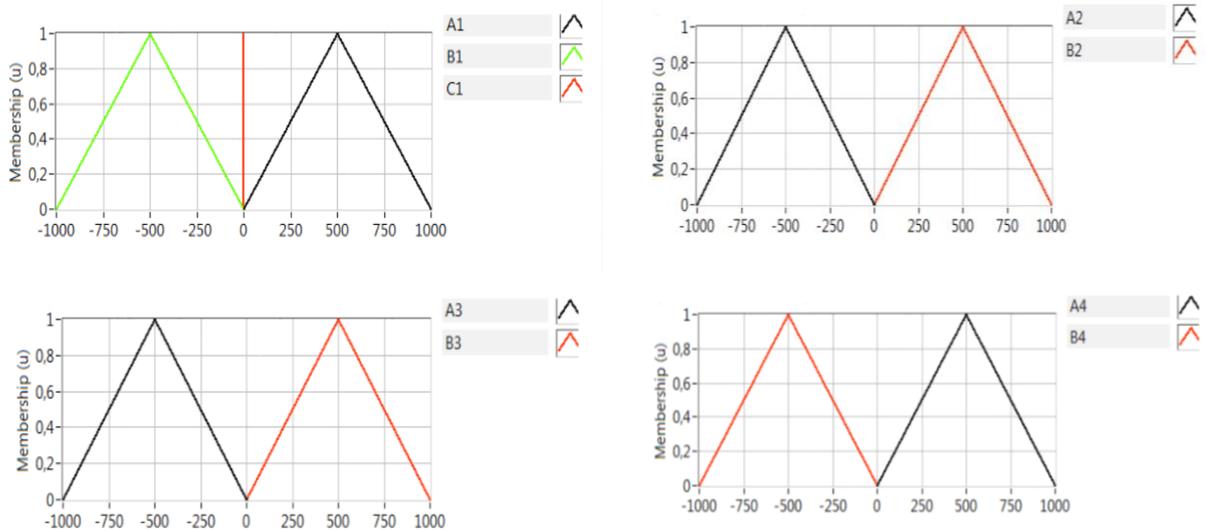


Рисунок 1 – Функции принадлежности входных переменных нечеткой модели прогнозирования типа дефекта в СТ по методу Дорненбурга

На рис.2 представлен алгоритм нечеткого прогнозирования типа дефектов в СТ по методу ИЕС.

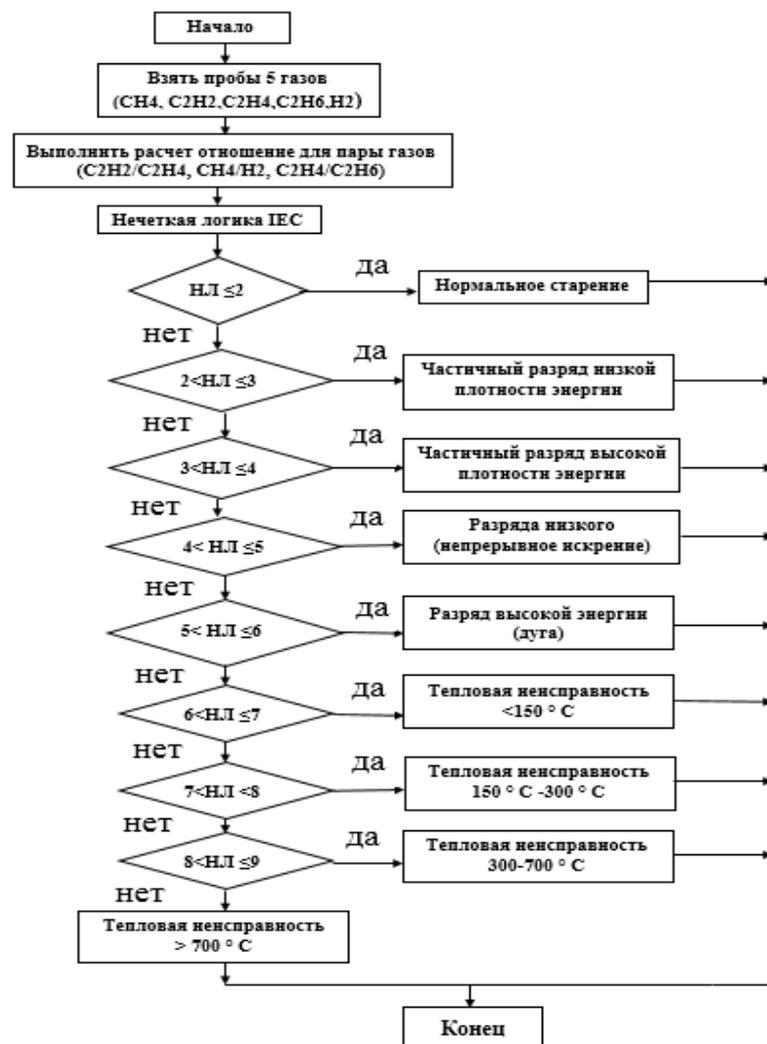


Рисунок 2 – Алгоритм нечеткого прогнозирования типа дефектов в СТ по методу ИЕС

Проведенная верификация разработанных нечетких цифровых моделей и алгоритмов расчета показала, что наиболее достоверные диагностические оценки (более 86%), как и ожидалось, позволяет обеспечить нечеткая предиктивная цифровая модель по методу треугольника Дюваля (рис.3). Это послужило основанием для обоснованного выбора указанной модели в качестве вычислительного ядра системы поддержки принятия решений, описание которой приведено в главе 5 диссертации.

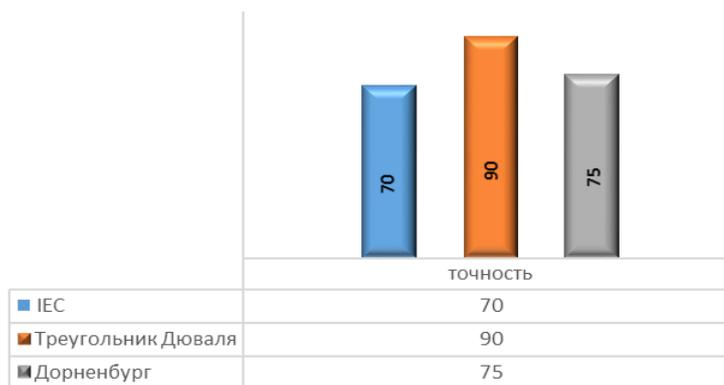


Рисунок 3 – Сравнение достоверности нечетких цифровых моделей

Третья глава посвящена совершенствованию моделей статистической Байесовской классификации дефектов в маслonaполненных СТ и их интеграции с оценкой остаточного эксплуатационного ресурса. Статистические модели на основе байесовской классификации и распознавания образов достаточно известны и успели хорошо себя зарекомендовать благодаря ряду исключительных качеств. Не смотря на значительный вычислительный и аналитический потенциал указанных моделей, он далеко не исчерпан. Развитие потенциала и совершенствование моделей видится в направлении повышения их адаптивности и достоверности, что является весьма востребованным с точки зрения интеллектуальных диагностических (мониторинговых) систем. Этому в полной мере способствуют новые возможности информационного обеспечения диагностики и цифровая трансформация отрасли. В данном контексте под адаптивностью диагностических моделей понимается свойство приспосабливаться к изменяющимся внешним факторам и условиям эксплуатации, а под достоверностью – свойство удовлетворять точности оценок на уровне заявленных или требуемых по условию задачи.

В диссертации изучен и обобщен опыт предыдущих исследований в области разработки и применения математических моделей Байесовской классификации дефектов в маслonaполненном трансформаторном оборудовании, а также сформулирована базовая методика построения предиктивных моделей оценки технического состояния СТ (рис.4).

Формирование статистических моделей для оперативной и предиктивной оценки состояния СТ на основе Байесовских решений по данным АРГ включает ряд расчетно-аналитических процедур и является весьма трудоемким.

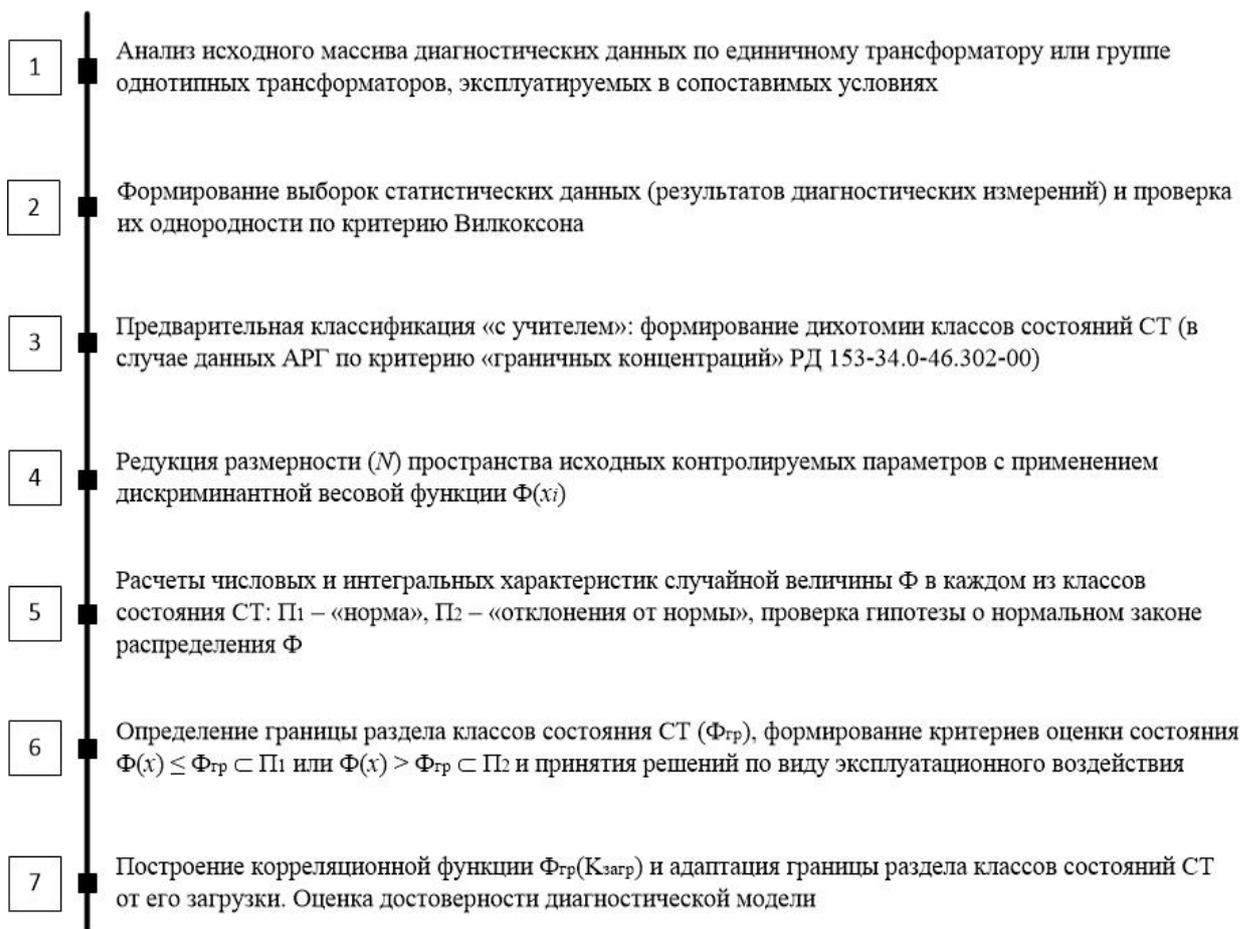


Рисунок 4 – Базовая методика формирования моделей статистической (Байесовской) классификации состояний СТ

По этой причине к ним применим термин «медленные» модели. Зато быстрый и точный результат решения полностью компенсирует затраты времени и прочих ресурсов на построение моделей.

Анализ состоятельности и достаточности сформулированной базовой методики в работе выполнен на контрольном примере для группы из 18 СТ 110 кВ района электрической сети. Матрица исходных данных содержит ретроспективу (глубиной 5 лет) из 328 протоколов АРГ, значений токовых нагрузок $I_{н.нагр}$ $I_{с.нагр}$ на шинах низкого (среднего) напряжения СТ и имеет следующую структуру (табл.2). В крайнем правом столбце указаны значения коэффициентов загрузки СТ в момент отбора проб масла на АРГ.

Таблица 2 – Структура исходной диагностической информации

Номер прот-ла	Дата	Концентрации растворенных газов в масле, ppm							$K_{загр}$ о.е.
		H2	CH4	C2H4	C2H6	C2H2	CO2	CO	
1	13.01.05	1,1	1,4	7,7	0,39	0,01	614	47,7	0,2769
...
N	17.12.09	5,1	29,2	233,7	0,15	60,1	28,1	28,1	0,3703

На рис.5 представлена совмещенная по классам состояния гистограмма частот распределения случайной величины Φ (Π_1 – «норма», Π_2 – «отклонение от нормы»), представляющей собой нелинейную свертку вида:

$$\Phi(A) = a_1 \cdot w_1 + \dots + a_n \cdot w_n = \frac{\sum_{i=1}^{n=7} \left(\frac{A_i}{A_{i\text{Гр}}} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n=7} \left(\frac{A_i}{A_{i\text{Гр}}} \right)}, \quad (1)$$

где: A_i и $A_{i\text{Гр}}$ – абсолютные концентрации газов (в %об или ppm) и установленные нормативами их пороговые значения.

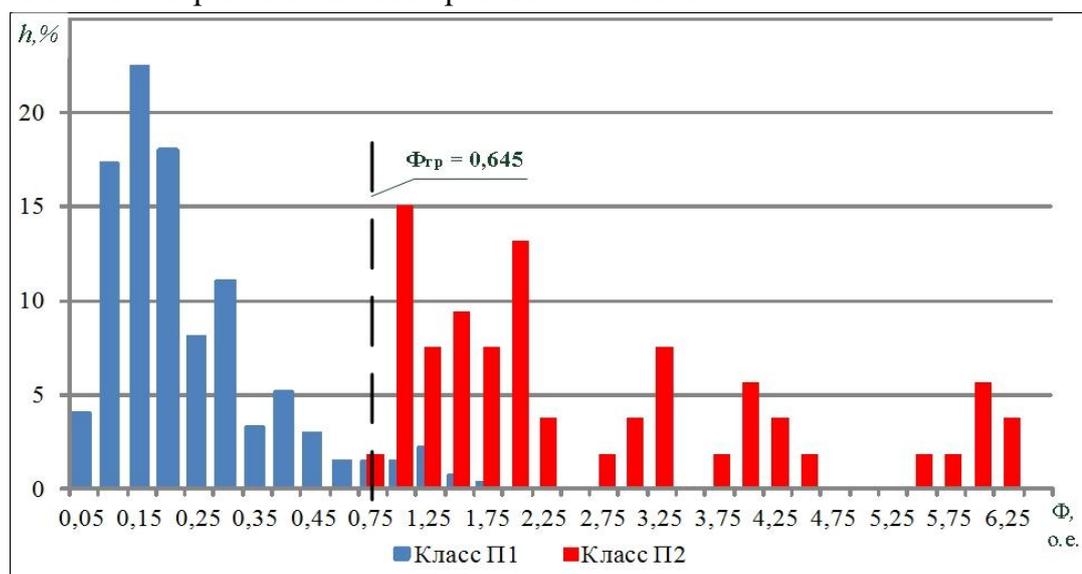


Рисунок 5 – Совмещенная гистограмма Φ для дихотомии классов Π_1 , Π_2

Получаемые модели оценки обладают рядом неоспоримых достоинств, например, таких как:

- 1) одномодальность распределений случайной величины (1) и линейная разделимость классов состояний;
- 2) высокая чувствительность к распознаваемым дефектам и достоверность оценок на уровне 97%;
- 3) возможность извлечения дополнительной диагностической информации из результатов анализа распределений случайной величины (1) и построения корреляционных функций.

Свойства адаптивности Байесовских моделей в работе реализованы через возможность настройки границы раздела классов состояний СТ по выражению (2):

$$\Phi_{\text{Гр}} \simeq M_1 + k \cdot \sigma_1, \quad (2)$$

с помощью смещения по оси значений Φ (рис.5) при вариации вычислительной константы k от 2 до 3. Подобную настройку целесообразно выполнять, ориентируя диагностическую модель на минимальную суммарную ошибку диагноза ε , которая включает в себя ошибку первого рода (ложная тревога) – ε_1 и ошибку второго рода

(пропуск дефекта) – ε_2 . Таким образом, настройка на минимум возможной суммарной ошибки распознавания дефектов в СТ $\min \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ активирует адаптивные свойства модели и повышает достоверность получаемых диагностических оценок. Кроме этого развитие свойств адаптивности Байесовских моделей связано с построением корреляционной функции $\Phi_{Гр}(K_{загр})$. Ее полиномиальная аппроксимация $\Phi_{Гр} = A \cdot \exp B \cdot K_{загр}$ представляется весьма удобным в вычислительном плане инструментом (рис. 6).

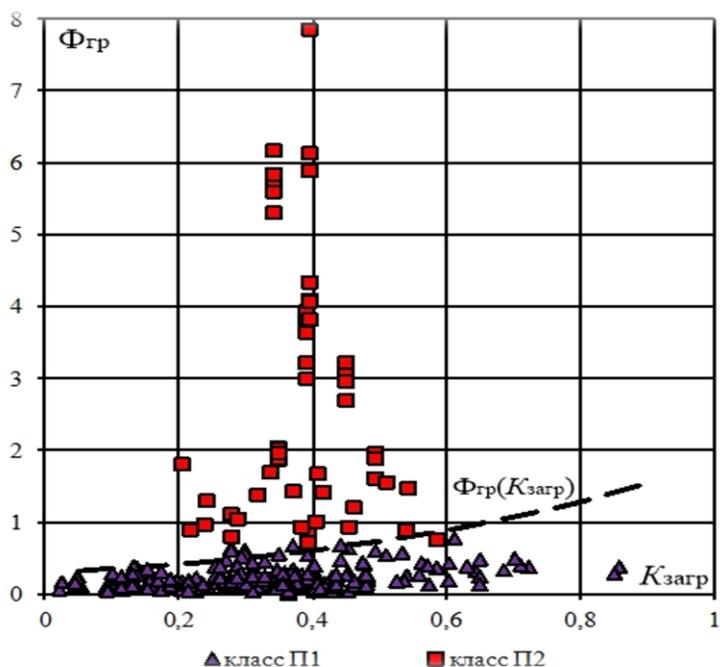


Рисунок 6 – Корреляционная функция $\Phi_{Гр}(K_{загр})$

Исследованиями установлено, что статистические распределения Φ в классах состояний Π_1 и Π_2 являются двухпараметрическими (математические ожидания: M_1, M_2 , среднестатистические отклонения: σ_1, σ_2) и подчиняются одному из законов: нормальному, логарифмически-нормальному, гамма. Это открывает ряд возможностей для проявления существенных преимуществ Байесовского классификатора при формировании границы раздела дихотомии классов состояний СТ. В работе исследовано влияние количества и состава контролируемых диагностических параметров на изменение границы раздела классов состояний. Результаты позволили сформировать практические рекомендации к настройке $\Phi_{Гр}$ на основании специальных функций, обеспечивающих максимальную достоверность модели в любых условиях применения. Установлено, что при уменьшении количества параметров, участвующих в формировании модели статистической Байесовской классификации наблюдается характерное изменение числовых и интегральных характеристик распределения Φ в классах состояний Π_1 и Π_2 . Так M_1 и σ_1 при уменьшении n имеет тенденцию к увеличению, что приводит к увеличению значения $\Phi_{Гр}$ (рис. 7). Это

объясняется различным соотношением количества вариантов в выборках протоколов АРГ для классов состояний Π_1 и Π_2 , полученных в результате стартовой классификации по критерию «граничных концентраций» для различного количества газов (n).

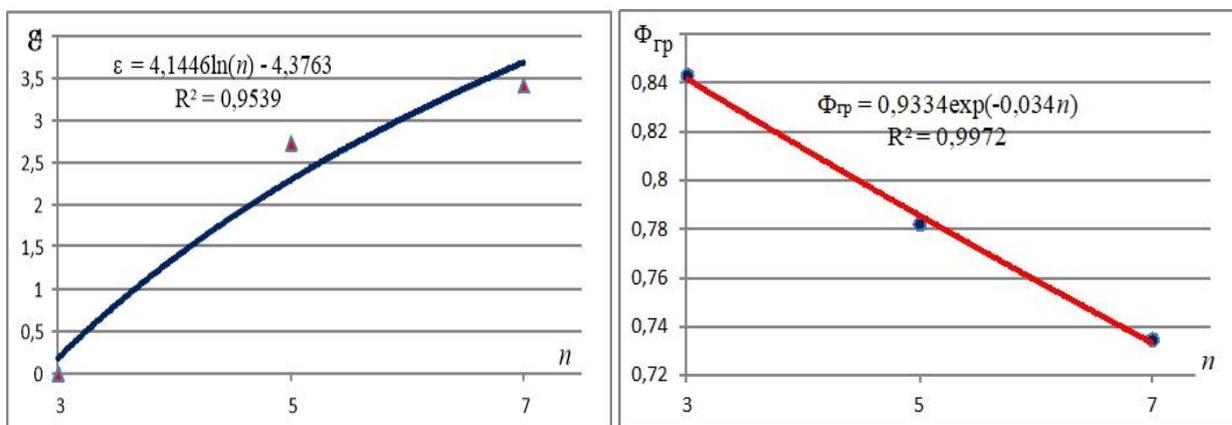


Рисунок 7 – Зависимость значений $\Phi_{гр}$ и ε от количества параметров n

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. На основе анализа задач управления эксплуатацией СТ в ЭЭС сформулированы ключевые принципы разработки ИАС, предложена ее базовая структура и набор функций (рис. 8).

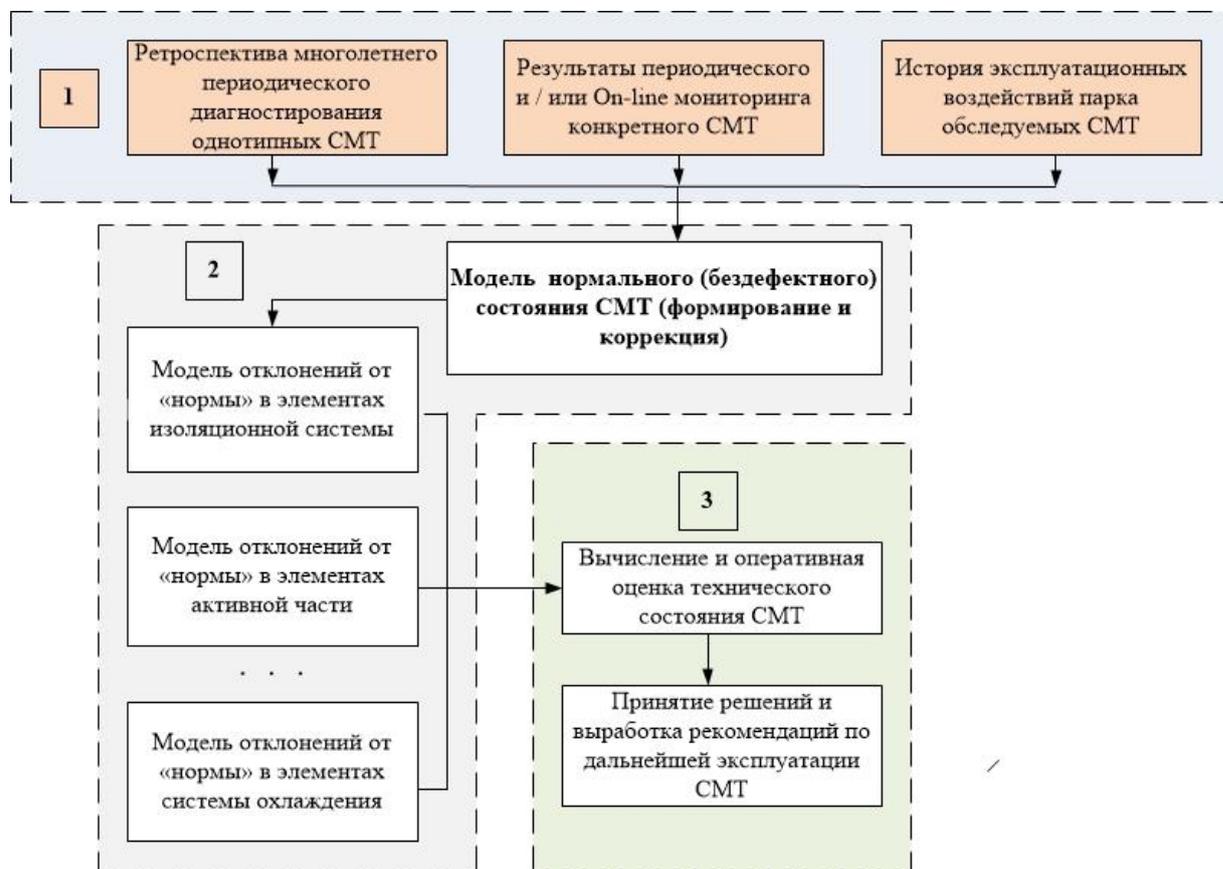


Рисунок 8 – Структурно-функциональная схема ИАС по эксплуатации СТ

Структура ИАС поддержки принятия решений по эксплуатации СТ включает три интегрированных функциональных уровня: 1 – *информация* (накопление и первичная обработка данных); 2 – *модели* (формирование и корректировка предиктивных моделей); 3 – *принятие решений* (критериальная оценка, формирование выводов и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации СТ).

Первое практическое приложение получила ИАС поддержки принятия решений по эксплуатации СТ 110 кВ района распределительной электрической сети с функцией удаленного мониторинга. В СУМиД группы маслонаполненных СТ 110 кВ, эксплуатируемых в одинаковых условиях на подстанциях электрической сети, применяется комплекс методов on-line и off-line контроля параметров состояния, достаточный не только для оперативной оценки технического состояния оборудования, но и для интегральной оценки, измеряемой значением ИТС и остаточного эксплуатационного ресурса. В диссертации разработан программный модуль, дополняющий базовую структуру ИАС по эксплуатации СТ и расширяющий ее функциональные возможности в направлении автоматизации вычислений текущих значений ИТС для каждой единицы оборудования на основе положений методики Минэнерго и имеющейся исходной информации. Периодичность вычисления ИТС СТ изменяется в соответствии с очередной актуализацией базы данных параметров состояния СТ, но не реже одного раза в год). Одновременно с ИТС по ниже приведенному алгоритму вычисляется остаточный эксплуатационный ресурс СТ (рис. 9):

1) вводятся значения ИТС СТ на начальный ($T_{p(i-1)}$) и текущий ($T_{p i}$) моменты эксплуатации;

2) рассчитывается текущее значение ресурса i -го СТ (R_i):

$$R_i = R_{i-1} \cdot \exp \left[- \frac{\text{ИТС}_{i-1} - \text{ИТС}_i}{100} \right];$$

3) рассчитывается значение остаточного ресурса СТ:

$$R_{\text{ост}i} = R_i - R_{\text{пр}}.$$

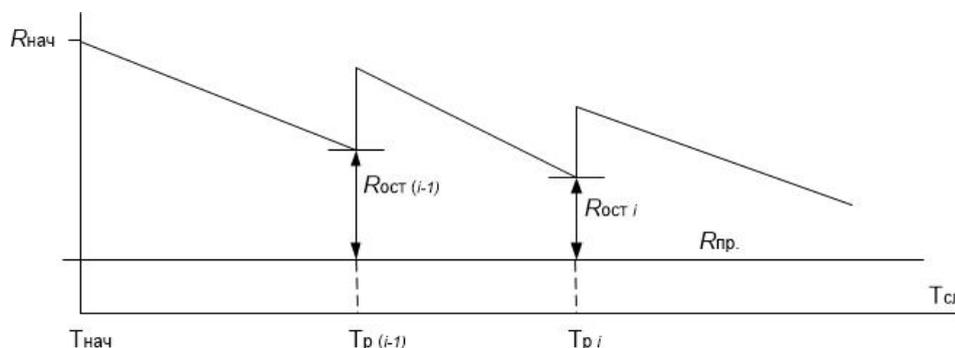
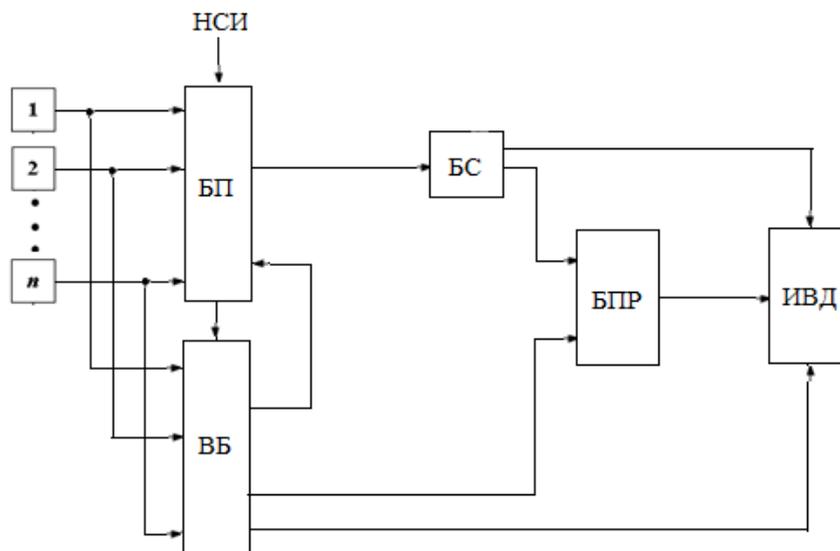


Рисунок 9 – Поддержание остаточного ресурса СТ в процессе эксплуатации

Второе приложение ИАС поддержки принятия решений разработано для блочных Т1-Т5 110 кВ Новосибирской ГЭС, для которых характерен устойчивый монотонный рост концентраций растворенных в масле СО и СО₂ в процессе

продолжительной эксплуатации. Периодическая дегазация масла из бака СТ не являлась решением проблемы, так как через некоторое время рост концентраций CO и CO_2 возобновлялся. В нормальных условиях эксплуатации СТ неограниченный рост оксидов углерода свидетельствует об ускоренной деструкции масла и/или целлюлозной изоляции, что вызывает обоснованную тревогу эксплуатационного персонала станции. В подобной ситуации эксплуатационный персонал сталкивается с вызовами вероятной угрозы безопасности ГЭС. Исключение встроенных локальных систем диагностического мониторинга СТ из участия в разрешении затянувшейся проблемной ситуации предопределял ряд указанных в работе ограничений. Для выявления причин ускоренного старения элементов изоляционной конструкции высоковольтных маслонаполненных СТ и оценки их приоритетности в ситуации Т1-Т5 НГЭС был выполнен детальный анализ с использованием одного из логико-графических методов. Разработанное в диссертации техническое решение представляет собой логико-вычислительную надстройку к встроенным локальным системам диагностического мониторинга СТ НГЭС (рис. 10).



1, 2, ..., 5 – контролируемые силовые трансформаторы; ВБ – вычислительный блок; БП – блок памяти; НСИ – нормативно-справочная информация; БС – блок сравнения; БПР – блок принятия решений (блок идентификации); ИВД – интерфейс вывода данных.

Рисунок 10 – Структурно-функциональная схема ИАС поддержки принятия решений по эксплуатации Т1-Т5 НГЭС

В пятой главе приведена разработка прикладного программного продукта «Программа распознавания дефектов в трансформаторах по результатам анализа растворенных газов». Основой для создания прикладного программного продукта (далее программа) явились модели и алгоритмы, разработанные и усовершенствованные автором в процессе выполнения исследований в рамках диссертационной работы. Программа предназначена для прогнозирования дефектов и оценки технического состояния маслонаполненного трансформаторного оборудования (МНТО) напряжением 110–750 кВ с

использованием протоколов АРГ. Программа предназначена как для установки на сервере головной подстанции сетевого района либо в центре управления сетями для обеспечения оперативной и предиктивной оценки технического состояния СТ в режиме дистанционного мониторинга, так и на локальных вычислительных устройствах электрических станций для выполнения функций on-line мониторинга СТ. Программа разработана на основе следующих программно-вычислительных компонентов и приложений: Lab View 2018; Fuzzy Logic; Simulation; Node Formula Programming и выполняет следующий комплекс служебных функций:

- выполняет ввод, хранение и обработку исходных данных;
- формирует случайные реализации статистических выборок контролируемых параметров;
- выполняет вычислительные операции по определению числовых и интегральных характеристик случайных величин;
- производит проверку статистических гипотез о принадлежности исследуемого распределения одному из стандартных законов;
- производит идентификацию наличия (отсутствия) дефекта в однотипном маслонаполненном трансформаторном оборудовании (МНТО);
- определяет достоверность оценки состояния и минимизирует возможную ошибку диагноза;
- определяет тип и характеристики прогнозируемого дефекта;
- выявляет вероятную причину развития дефекта в трансформаторе;
- формирует рекомендации для принятия решений по дальнейшей эксплуатации МНТО;
- определяет целесообразную частоту отбора проб масла на АРГ и уточняет техническое состояние твердой изоляции.

Автоматическое выполнение математических расчетов обеспечивает оперативность принятия решения, способствует сокращению времени на изучение истории эволюции технического состояния конкретной единицы МНТО, а также в значительной степени снижает вероятность ошибок персонала в результате неправильных математических расчетов и экспертных оценок.

Программа реализует следующие этапы вычислительных и логических операций:

1. Ввод данных протоколов АРГ и определение типа МНТО;
2. Определение наличия (отсутствия) неисправности (отклонения от нормы);
3. Определение типа и характеристик неисправности;
4. Определение вероятной причины неисправности;
5. Определение скорости развития неисправности;
6. Представление процедуры принятия решений;
7. Оценка состояния твердой изоляции;
8. Определение периода отбора проб масла на АРГ;
9. Формирование заключения и подготовка отчета.

Обобщенный алгоритм работы программы показан на рис. 11.

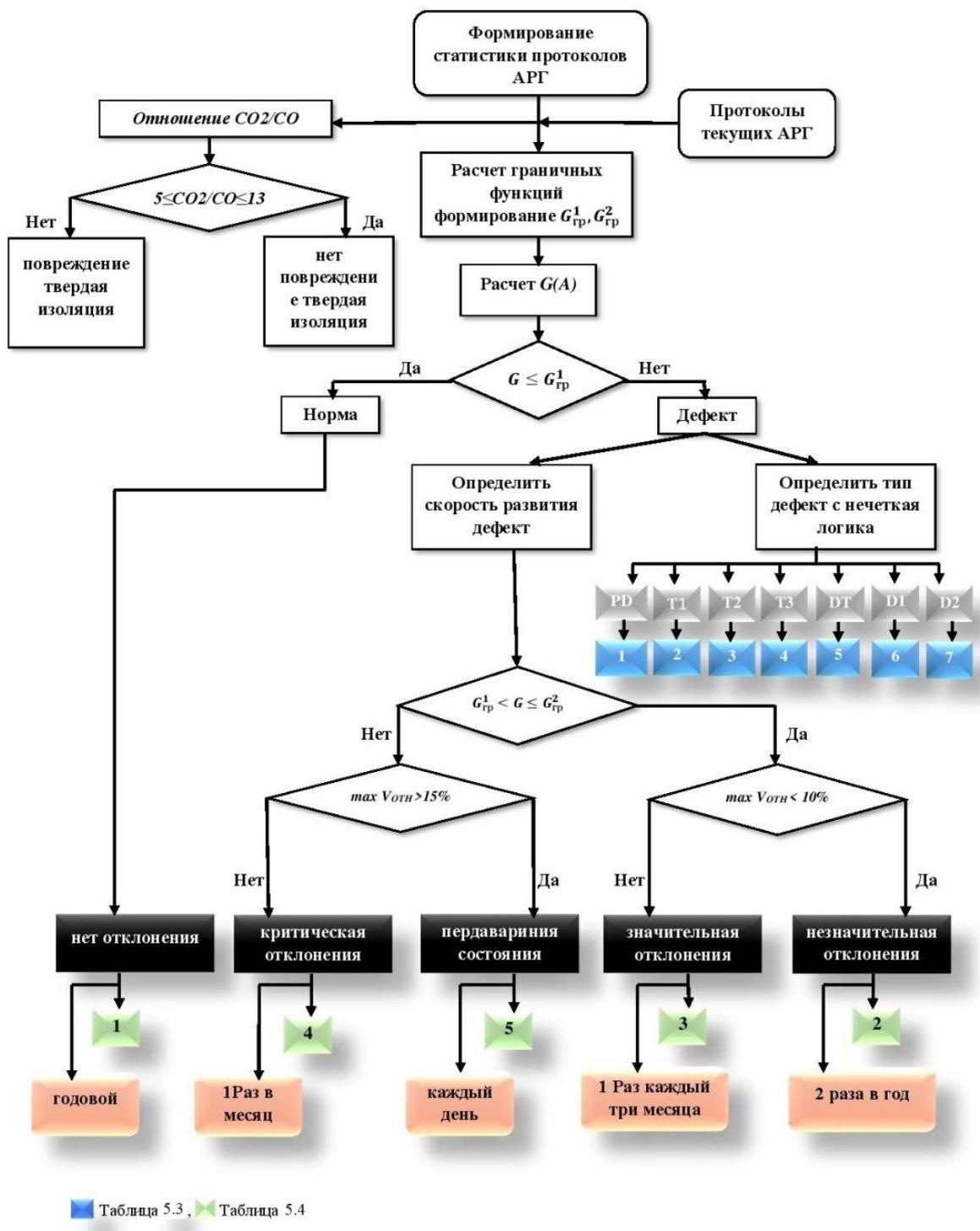


Рисунок 11 – Обобщенный алгоритм работы программы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ актуального состояния методов off-line и on-line мониторинга МНТО, представляющего собой критический вид оборудования электростанций и электрических сетей ЭЭС. Произведен аналитический обзор

математических методов искусственного интеллекта и машинного обучения с целью дальнейшего совершенствования моделей предиктивной диагностики и оперативной оценки технического состояния МНТО.

2. Впервые введен в рассмотрение индекс диагностической ценности методов контроля (мониторинга) параметров состояния МНТО при расчете его ИТС и остаточного эксплуатационного ресурса. С его применением выполнена технико-экономическая оценка, доказывающая наличие эффекта от применения систем удаленного диагностического мониторинга МНТО, на подстанциях района электрической сети.

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 СТ и результатах альтернативных сторонних исследований, опубликованных в изданиях Web of Science и Scopus.

4. Изучен и обобщен опыт в области разработки предиктивных моделей статистической (Байесовской) классификации и распознавания состояний СТ. Сделан вывод о целесообразности совершенствования статистических Байесовских моделей, алгоритмов оценки и критериев распознавания состояний СТ в направлении повышения адаптивности и достоверности диагностических оценок. Разработан обобщенный алгоритм предиктивной и оперативной оценки состояния, расчета ИТС и остаточного эксплуатационного ресурса единичного СТ.

5. Сформирована базовая структура, ключевые функции и состав информационного обеспечения ИАС поддержки принятия решений по длительной надежной и безопасной эксплуатации МНТО типового энергообъекта. С применением разработанных предиктивных моделей и алгоритмов диагностической оценки разработаны две модификации ИАС МНТО, эксплуатируемых в составе района электрической сети и в составе энергоблоков гидроэлектростанции. Предложены оригинальные программно-аналитические решения, соответствующие условиям конкретного применения ИАС.

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

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ:

1. Яхья А.А. Адаптивное управление техническим состоянием силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / В. М. Левин, А. А. Яхья // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн.. - 2018. - № 11. - С. 81-89.

2. Яхья А.А. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах / А. А. Яхья, В. М. Левин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2019. - Т. 21, № 6. - С. 11-18. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

3. Яхья А.А. О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики / В. М. Левин, К. И. Сагалакова, А. А. Яхья // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2019. – № 4 (77). – С. 147–160. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-4-147-160.

4. Яхья А.А. Оценка эффективности мониторинга технического состояния трансформаторов на основе анализа растворенных газов / В. М. Левин, А. А. Яхья // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. - 2020. - Т. 13, № 4. - С. 438-448. DOI: 10.17516/1999-494X-0235.

5. Яхья А.А. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Н. А. Черненко, А. А. Яхья // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2020. – № 2-3 (79). – С. 139–155. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

6. Yahya A.A. Adaptive management of technical condition of power transformers [Electronic resource] / V. M. Levin, A. A. Yahya // International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2020. - Vol. 10, iss. 4. - p. 3862-3868. - DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3862-3868.

7. Yahya A.A. Support for decision-making to ensure reliable operation of transformers as part of a responsible power facility [Electronic resource] / V. M. Levin, A. A. Yahya // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon): [proc.], Vladivostok, 6–9 Oct. 2020. – Vladivostok: IEEE, 2020. – 6 p. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.

8. Yahya A.A. An innovative method of fault detection in power transformers [Electronic resource] / V. M. Levin, A. A. Yahya // International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2022. - Vol. 12, iss. 2. - p. 1123-1130. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1123-1130>.

9. Yahya A.A. Predicting the technical condition of the power transformer using fuzzy logic and dissolved gas analysis method [Electronic resource] / V. M. Levin, A. A. Yahya // International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2022. - Vol. 12, iss. 2. - p. 1139-1146. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1139-1146>.

Публикации в сборниках материалов и трудов научных конференций, форумов всероссийского и международного уровня:

10. Яхья А.А. Мониторинг и диагностика трансформаторов в электроэнергетической системе для обеспечения эксплуатационной надежности / А. Яхья, В. М. Левин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : материалы 3 междунар. науч.-техн. конф.

– Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 435–440.

11. Яхья А.А. Перспективные методы и модели оценки состояния в технологии диагностического мониторинга трансформаторов ГЭС [Электронный ресурс] / В. М. Левин, К. И. Сагалакова, А. Яхья // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 6 Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, Саяногорск; Черемушки 25-26 апр. 2019 г. - Саяногорск; Черемушки: СШФ СФУ, 2019. - С. 227-233.

12. Яхья А.А. Система информационно-аналитической поддержки принятия решений по эксплуатации силовых трансформаторов = System of information and analytical support for decision-making on operation of power transformers / В. М. Левин, А. А. Яхья // Главный энергетик. – 2019. – № 9. – С. 52–62.

13. Яхья А.А. Мониторинг и оценка технического состояния трансформаторов ГЭС / К. И. Сагалакова, А.А. Яхья ; науч. рук. В. М. Левин // Дни науки НГТУ–2018 : материалы науч. студен. конф. (Итоги науч. работы студентов за 2017–2018 гг.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – С. 163–167.

14. Яхья А.А. Совершенствование моделей оценки состояния трансформаторов ГЭС в режиме On-Line мониторинга / К. И. Сагалакова, А. Яхья, В. М. Левин // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 5 Всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск; Черемушки, 26-27 апр. 2018 г. - Саяногорск : Сиб. федер. ун-т; Саяно-Шушен. фил., 2018. - С. 40-47.

15. Яхья А.А. Статистическая идентификация дефектов – инструмент интеллектуальной диагностики оборудования / В. М. Левин, А. Яхья // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности : материалы Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Омск, 4–5 окт. 2018 г. – Омск: Изд-во ОмГУПС, 2018. – С. 16–18.

16. Yahya A.A. Diagnostic Value of methods of control parameters for evaluating the technical condition of power transformers. In: Наука и молодежь [Электронный ресурс]: материалы XVII Всерос. научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (01-05 июня 2020 года, г. Барнаул): в 8 ч./АлтГТУ им. И.И. Ползунова.–Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2020.– Ч. 8. p. 149.

17. Yahya A.A. Increase reliability of monitoring power transformers with use a Bayesian classifier. Yahya A. A., Levin V.M. In: V Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», Кемерово, 2020 год, С. 415-1-415-4.

18. Яхья А. А. Адаптация предиктивной модели классификации дефектов в трансформаторах по количеству и составу контролируемых параметров / А. А. Яхья, В. М. Левин. - Текст : электронный // Борисовские чтения : материалы 3 Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Красноярск, 23–24 сент. 2021 г. – Красноярск : СФУ, 2021. – С. 192-196.

19. Левин В. М. Цифровые модели предиктивной аналитики для удаленного мониторинга трансформаторного оборудования / В. М. Левин, А. Яхья. - Текст : непосредственный // Методические вопросы исследования надежности больших

систем энергетики. Вып. 72: Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровой трансформации : в 2 кн. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2021. – Кн. 1. – С. 393-402.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство № RU 2021612127. Программа распознавания дефектов в маслонаполненных трансформаторах на основе анализа растворенных газов / **А. А. Яхья**, В. М. Левин // зарегистр. 28.01.2021. -1с.

2. Свидетельство № RU 2021616719. Программа интегральной оценки текущего технического состояния силового трансформатора / **А. А. Яхья**, В. М. Левин // зарегистр. 26.04.2021. -1с.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 X 84/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ 684 . Подписано в печать 07.02.2022 г.