

На правах рукописи



Марков Евгений Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ДИАГНОСТИКИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ
МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ**

2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ») на кафедре «Электроснабжение и электротехника».

Научный руководитель: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти

Официальные оппоненты: **Ившин Игорь Владимирович**
доктор технических наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Баширов Мусса Гумерович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский университет «МЭИ»**», г. Москва

Защита состоится 01 апреля 2025 года в 10 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.377.06, при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус 1.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.377.06
кандидат технических наук,
доцент



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Силовые масляные трансформаторы являются основным оборудованием систем электроснабжения. Их надежность влияет не только на электроснабжение потребителей, но и на экономичность работы крупных промышленных предприятий. Различные виды тепловых и электрических нагрузок часто приводят к внутренним процессам старения трансформатора и возникновению в нем развивающихся дефектов.

Система изоляции, используемая в силовых трансформаторах, представляет собой комбинацию трансформаторного масла и твердой бумажной изоляции. Ухудшение качества изоляции и старение являются двумя основными факторами развивающихся дефектов. Основными причинами старения и износа изоляции являются термические, электрические и механические процессы, а также воздействие влаги. С помощью методов хроматографического анализа растворенных газов в масле (ХАРГ) можно оценить процесс старения бумажной изоляции и трансформаторного масла, а также определить изменение степени полимеризации и содержания фурановых соединений.

Современные методы диагностики, включая хроматографический анализ газов, растворенных в масле, обладают высокой информативностью. Однако для повышения точности и надежности диагностики требуется их дальнейшее совершенствование, направленное на снижение вероятности ложноположительных и ложноотрицательных результатов. Развитие этих методов позволит сократить временные затраты на проведение анализа и уменьшить его стоимость, что, в свою очередь, повысит доступность и точность диагностики дефектов силовых масляных трансформаторов. Поэтому в сложившихся условиях представляется актуальной разработка и внедрение методик повышения точности диагностики развивающихся дефектов с помощью ХАРГ для эффективной диагностики и прогнозирования состояния силовых масляных трансформаторов. Оценка развивающихся дефектов с использованием разработанных математических моделей позволит повысить точность прогнозов и, соответственно, надежность функционирования энергосистемы в целом.

Степень разработанности проблемы. Большой вклад в развитие теории и практики исследования в области методов диагностики силовых трансформаторов внесли: Назарычев А.Н., Сви П.М., Львов Ю.Н., Гольдштейн В.Г., Вдовико В.П., Хренников А.Ю., Левин В.М.

Вопросам диагностики трансформаторного оборудования с помощью методов ХАРГ посвящены работы зарубежных и российских ученых: Dornenburg E., Rogers R.R., Duval M., Bakar N. A., Beauchemin C., Platts D., Виноградовой Л.В., Касаткиной Т.Е., Несвижского Е.И., Хальясмаа А.И., Давиденко И.В., Игнатьева Е.Б., Овсянникова Ю.М.

Цель диссертационной работы. Повышение точности определения и анализа развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов систем электроснабжения посредством совершенствования методов хроматографического анализа газов, растворенных в масле.

Решаемые задачи.

1. Обзор существующих методов интерпретации дефектов силовых масляных трансформаторов на основе хроматографического анализа растворенных газов в масле.

2. Исследование функций принадлежности, основанных на алгоритме Мамдани, для разработки нечетких моделей оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов.

3. Разработка математических моделей на основе принципов нечеткой логики для оценки и прогнозирования технического состояния силовых масляных трансформаторов за счет интеграции данных, полученных с помощью методов ХАРГ.

4. Разработка прикладных программных продуктов с упрощенным пользовательским интерфейсом, позволяющих улучшить процессы диагностики дефектов в силовых трансформаторах на основе данных хроматографического анализа.

Объектом исследования являются силовые масляные трансформаторы систем электроснабжения.

Предметом исследования являются методы и математические модели для оценки развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных газов в масле.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались теория нечеткой логики и нечетких множеств, методы компьютерного и математического моделирования. Обоснованность и достоверность полученных результатов работы определяются корректным использованием математических методов исследования и сертифицированного лицензионного программного обеспечения MATLAB с дополнительным пакетом Fuzzy logic. Результаты и выводы работы подтверждены результатами экспериментов.

Научная новизна.

1. Установлено, что для разработки нечетких моделей для определения технического состояния силовых масляных трансформаторов с помощью ХАРГ наиболее целесообразно использовать треугольную и трапециевидную функции принадлежности.

2. Разработаны математические модели оценки технического состояния силового масляного трансформатора, отличающиеся от известных обработкой диагностической информации с использованием теории нечетких множеств, предназначенные для идентификации дефектов, находящихся на границах лингвистических значений, и их классификации с учетом индивидуальной вероятности возникновения.

3. Разработана методика повышения точности диагностики развивающихся дефектов с помощью ХАРГ, основанная на совокупности используемых методов оценки развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов.

Практическая значимость диссертационной работы.

Разработанные математические модели позволяют выполнять анализ и обработку статистических данных по отказам и неисправностям силовых масляных трансформаторов, а также выявить критические точки в их эксплуатации.

Разработанные прикладные программные продукты позволяют прогнозировать потенциальные отказы силовых масляных трансформаторов, их причины и последствия, что способствует разработке мероприятий технического обслуживания и ремонта, направленных на уменьшение вероятности возникновения отказов и их устранение.

Предложенные в диссертации научно-технические решения вошли в устойчивую практику ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор» и применяются при проведении диагностических мероприятий силовых масляных трансформаторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования функций принадлежности, основанных на алгоритме Мамдани, используемые для разработки нечетких моделей оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов.

2. Математические модели на основе принципов нечеткой логики для оценки и прогнозирования технического состояния силовых масляных трансформаторов на основе результатов ХАРГ.

3. Прикладные программные продукты с упрощенными пользовательскими интерфейсами, созданные на основе нечетких математических моделей, предназначенные для повышения точности диагностики дефектов в силовых масляных трансформаторах с использованием данных ХАРГ.

4. Результаты тестирования и внедрения разработанных программных решений.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности – 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует направлениям исследований (далее выдержки из паспорта научной специальности): п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем... математическое, ... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические ... преобразователи энергии ...»; п. 4 «Исследование работоспособности ... электротехнических комплексов, ... и их компонентов в различных режимах, ... диагностика электротехнических комплексов».

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием обоснованных допущений, строгих математических методов, теории нечетких множеств, адекватность которых подтверждена результатами теоретических и прикладных исследований, а также обсуждением результатов диссертации на российских и международных конференциях и семинарах.

Апробация работы. Результаты диссертации обсуждались на научных семинарах ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»,

профильных совещаниях отдела диагностики и испытаний ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор», профильных совещаниях электротехнической лаборатории ЦЭАИ ООО «Тольяттикаучук».

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях: Достижения науки и технологий-ДНИТ-11-2023 (Красноярск, 27–28 февраля 2023 года), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Фёдоровские чтения 2023» (Москва, 2023), VI Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (Казань, 2024), 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

Публикации. По тематике исследования опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в изданиях с международным индексом цитирования Scopus, 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора в диссертационное исследование. Постановка задач была выполнена в сотрудничестве с научным руководителем. Автором лично проведены теоретические и практические исследования. Основным объемом исследований, представленных в диссертации, а также разработка следующих элементов осуществлены автором: нечеткие математические модели для выявления развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах на основании данных хроматографического анализа растворенных газов; программные продукты с упрощенным пользовательским интерфейсом, основанные на нечетких математических моделях, предназначенные для повышения точности процессов диагностики дефектов силовых масляных трансформаторов с использованием данных ХАРГ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть исследования изложена на 141 странице и содержит 46 рисунков, 34 таблицы и 6 приложений. Список используемой литературы состоит из 109 наименований на 12 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы проведен всесторонний обзор наиболее широко используемых методов диагностики дефектов силовых масляных трансформаторов на основе ХАРГ. Силовые трансформаторы, как ключевые элементы систем электроснабжения, особенно критичны для обеспечения их надежного функционирования. Поэтому своевременная диагностика дефектов силовых трансформаторов является приоритетной задачей. ХАРГ является одним из наиболее эффективных методов для превентивного обнаружения развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов, так как не требует вывода оборудования из эксплуатации.

Основное внимание уделено характеристике свойств различных методов ХАРГ, их применению и ограничениям. Рассмотрены методы обнаружения развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах, основанные на концентрациях растворенных газов в масле, ключевых газах, которые являются типичными или преобладающими при различных температурах, соотношениях ключевых газов и графического представления вида развивающегося дефекта. В исследовании рассмотрены методы Дорненбурга, Роджерса, IEC 60599, ключевого газа, номограмм, треугольника Дюваля, ETRA, РД 153-34.0-46.302-00.

Показано, что методы различаются по количеству типов дефектов, которые они могут идентифицировать, и точности этих идентификаций. Выявлено, что существующие методы обладают недостатками, такими как: недостаточной чувствительностью к ранним стадиям дефектов; недостаточными критериями оценки пограничных значений концентраций растворенных газов; зависимостью результатов от внешних факторов (температуры, влажности и др.).

В заключение подчеркнута необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов интерпретации данных по ХАРГ для повышения точности и надежности диагностики дефектов в силовых масляных трансформаторах.

Во второй главе рассматриваются подходы к выбору и обоснованию математических моделей для оценки состояния силовых масляных трансформаторов. Основное внимание уделено использованию нечеткой логики для обработки данных ХАРГ, что позволяет учитывать неопределенности и неточности, характерные для диагностики сложных технических систем. Показано, что для моделирования многофакторных задач, к которым относится и задача оценки технического состояния силовых трансформаторов, целесообразно использовать алгоритм Мамдани.

Показано, что в алгоритме Мамдани вывод на основе нечеткой логики выполняется с использованием нечеткой базы знаний:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right), \quad (1)$$

где x_i – входные переменные, описывающие текущее состояние системы (в данном случае – параметры трансформатора); $a_{i,jp}$ – термы (значения), к которым относятся входные переменные x_i в правиле j с подправилами p (например, если x_i – температура, то $a_{i,jp}$ может представлять значения «низкая», «средняя», «высокая»); w_{jp} – весовой коэффициент для правила j с подправилом p , показывающий степень важности данного правила.

Введем следующие обозначения.

1. $\mu_{jp}(x_i)$ – входная функция принадлежности для терма $a_{i,jp}$, т.е.

$$a_{i,jp} = \int_{\underline{x}_i}^{\bar{x}_i} \mu_{jp}(x_i) dx_i. \quad (2)$$

Входная функция принадлежности (2) используется для задания параметров оценки технического состояния силового масляного трансформатора.

2. $\mu_{d_j}(y)$ – выходная функция принадлежности для терма d_j для выходной переменной y (например, определенный тип дефекта трансформатора, который система выявляет), т.е.

$$d_j = \int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_{d_j}(y) dy. \quad (3)$$

Выходная функция принадлежности (3) применяется для выявления потенциальных дефектов в силовом масляном трансформаторе.

При оценке принадлежности входного вектора $x^* = (x_1^*, x_2^* \dots, x_n^*)$ термам d_j из базы знаний расчет происходит следующим образом:

$$\mu_{d_j}(X^*) = \bigvee_{p=1, \overline{k_j}} w_{jp} * \bigwedge_{i=1, \overline{n}} [\mu_{jp}(X_i^*)], \quad (4)$$

где X_i^* обозначает t-норму, если в j – м правиле используется логическая операция И, и соответствует s-норме при операции ИЛИ.

В результате выводится нечеткое множество y , которое соответствует входному вектору x^* :

$$y = \frac{\mu_{d_1}(x^*)}{d_1} + \frac{\mu_{d_2}(x^*)}{d_2} + \dots + \frac{\mu_{d_m}(x^*)}{d_m}. \quad (5)$$

На рисунке 1 представлена разработанная иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии и принятии решений по стратегии дальнейшей эксплуатации силового масляного трансформатора. Оценка технического состояния силового трансформатора производится на множестве значений входных нечетких лингвистических переменных $x_i (i = \overline{1, n})$.

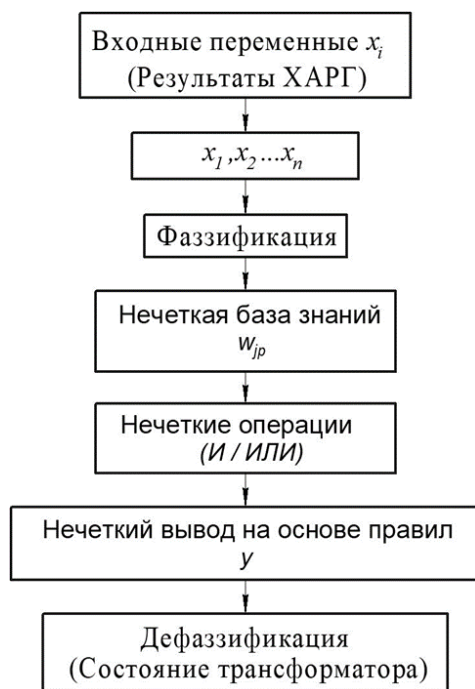


Рисунок 1 – Иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии силового трансформатора по результатам ХАРГ

В качестве примера разработана и рассмотрена нечеткая диагностическая модель согласно методике, применяемой в РФ, основанной на стандарте РД 153-34.0-46.302-00. Рассмотрены основные функции принадлежности, используемые в системах нечеткого вывода: треугольная, трапециевидная, гауссова, сигмоидная.

Определены терм-множества лингвистических переменных для концентрации характеристик газов: водород $Q_1 = \{L_1, M_1, H_1, VH_1\}$; метан $Q_2 = \{L_2, M_2, H_2, VH_2\}$; этан $Q_3 = \{L_3, M_3, H_3, VH_3\}$; этилен $Q_4 = \{L_4, M_4, H_4, VH_4\}$; ацетилен $Q_5 = \{L_5, M_5, H_5, VH_5\}$; окись углерода $Q_6 = \{L_6, M_6, H_6, VH_6\}$; двуокись углерода $Q_7 = \{L_7, M_7, H_7, VH_7\}$, где L_i – низкое значение параметра (нехарактерный газ); M_i – среднее значение параметра (малое содержание газа); H_i – значение параметра выше среднего (высокое содержание газа); VH_i – значение параметра соответствует случаю, когда $a_i > 1$ и характеризует (когда $a_i = a_{imax}$ из всех газов) то, что это основной газ.

Определены лингвистические переменные отношений концентраций пар газов $Q_i (i = \overline{8,12})$, их терм-множества и базовые формы функций принадлежности:

$$Q_8 = \{L_8, M_8, H_8\} \rightarrow \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad (6)$$

$$Q_9 = \{L_9, M_9, H_9\} \rightarrow \frac{CH_4}{H_2}, \quad (7)$$

$$Q_{10} = \{L_{10}, M_{10}, H_{10}\} \rightarrow \frac{C_2H_4}{C_2H_6}, \quad (8)$$

$$Q_{11} = \{L_{11}, M_{11}, H_{11}\} \rightarrow \frac{CO_2}{CO}, \quad (9)$$

$$Q_{12} = \{L_{12}, M_{12}, H_{12}\} \rightarrow CO. \quad (10)$$

Пример диагностических критериев определения характера дефектов, развивающихся в силовом масляном трансформаторе для терм множества $D_j^{(3)}$ приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Диагностические критерии и терм-множества для определения характера дефектов, развивающихся в силовом трансформаторе

Q_8	Q_9	Q_{10}	Характер прогнозируемого дефекта	Терм-множества дефектов
L_8	M_9	L_{10}	Нормально	$D_1^{(3)}$
L_8	L_9	L_{10}	ЧР с низкой плотностью энергии	$D_2^{(3)}$
M_8	L_9	L_{10}	ЧР с высокой плотностью энергии	$D_3^{(3)}$
M_8, H_8	M_9	M_{10}, H_{10}	Разряды малой мощности	$D_4^{(3)}, D_5^{(3)}$
M_8	M_9	M_{10}	Разряды большой мощности	$D_6^{(3)}$
L_8	M_9	M_{10}	Термический дефект низкой температуры ($<150^\circ\text{C}$)	$D_7^{(3)}$

Продолжение таблицы 1

Q_8	Q_9	Q_{10}	Характер прогнозируемого дефекта	Терм-множества дефектов
L_8	H_9	L_{10}	Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300 °С)	$D_8^{(3)}$
L_8	H_9	M_{10}	Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700 °С)	$D_9^{(3)}$
L_8	H_9	H_{10}	Термический дефект высокой температуры (> 700°С)	$D_{10}^{(3)}$

Согласно общему алгоритму, изложенному выше, решению задачи диагностирования соответствует тот класс дефекта $D_j^{(k)}$, для которого функция принадлежности имеет максимальное значение.

Настройка нечеткой модели проводится с целью определения оптимальных функций принадлежности для диагностики технического состояния силовых трансформаторов. Для настройки и верификации нечеткой модели поочередно использованы следующие функции принадлежности: треугольная, трапециевидная, гауссова и сигмоидная.

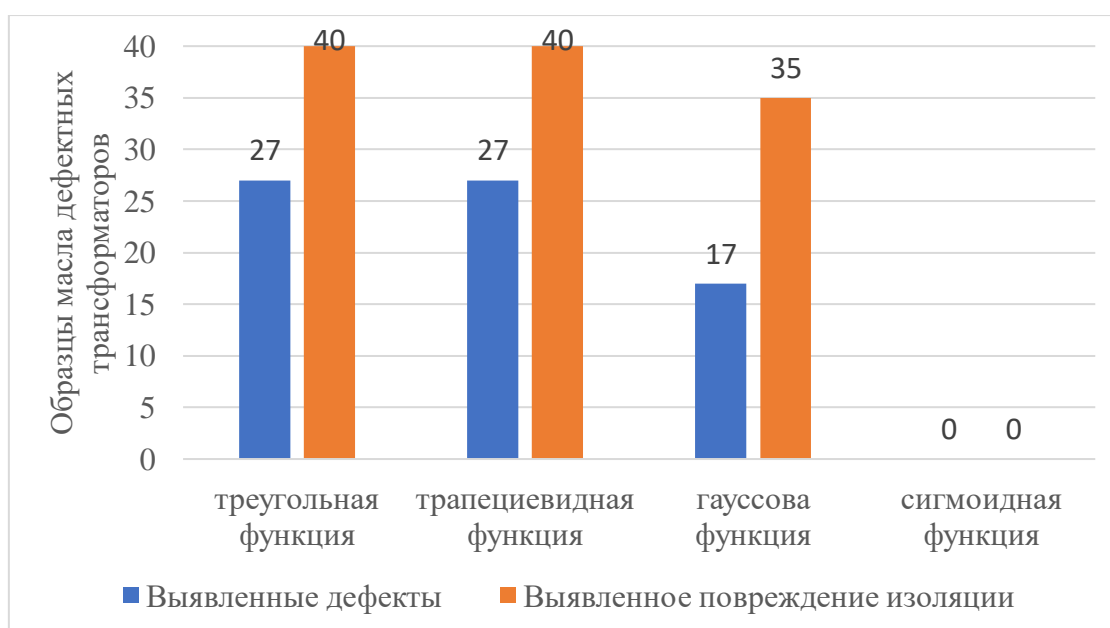


Рисунок 2 – Результаты исследования функций принадлежности

Для анализа и тестирования разработанной нечеткой диагностической модели были отобраны сорок образцов масла из баков дефектных двухобмоточных и трехобмоточных силовых трансформаторов мощностью 16-40 МВА напряжением 110 кВ. Результаты сравнения нечеткой модели с использованием четырёх различных функций принадлежности с фактическим состоянием силовых масляных трансформаторов, а также дополнительное уточнение состояния твердой изоляции, в котором использовалось отношение CO_2/CO (рисунок 2) показали, что применение треугольной и трапециевидной функций принадлежности позволяет выявить 27 характерных дефектов из 40, в то время как гауссова функция принадлежности позволила выявить 17

характерных дефектов из 40, а сигмоидная – 0 характерных дефектов из 40. Оценка состояния твердой изоляции показала, что применение треугольной и трапециевидной функций принадлежности позволяет выявить 40 состояний из 40, в то время как гауссова функция принадлежности позволила выявить 35 состояний из 40, а сигмоидная – 0 состояний из 40.

Таким образом, показано, что для разработки нечетких моделей определения технического состояния силовых масляных трансформаторов в дальнейшем следует использовать треугольную и трапециевидную функции принадлежности, которые приводят к более точным результатам расчета

В третьей главе разработаны нечеткие модели для диагностической оценки силовых масляных трансформаторов на основе ХАРГ, а также проведена верификация полученного инструментария на основе сравнения с фактическими результатами.

Для разработки нечетких моделей использовались критерии интерпретации дефектов, определенные методами Роджерса, IEC 60599 и ключевого газа. Данные методы выбраны из-за их широкого охвата типов и видов дефектов, что подтверждено анализом, представленным в главе 1. Кроме того, разработана нечеткая модель для определения остаточного ресурса бумажной изоляции на основе стандарта FIST 3-31. Данный стандарт выбран из-за его более точной дифференциации дефектов изоляции, что придает ему преимущество перед отечественными стандартами РД 153-34.0-46.302-00 и СТО 34.01-23.1-001-2017. Метод Роджерса использует четыре газовых соотношения (CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 и C_2H_2/C_2H_4) для диагностики дефектов. Модель нечеткой логики разработана с использованием MATLAB и включает три фазы: фазсификацию, нечеткий вывод и дефазсификацию. Базовый набор правил «ЕСЛИ-ТО» формирует систему диагностики, позволяющую интерпретировать пограничные случаи неисправностей.

Для оценки эффективности модели использованы образцы масла из трансформаторов мощностью 16-25 МВА и напряжением 110 кВ. Результаты диагностики показали, что нечеткая модель по методу Роджерса успешно интерпретировала дефекты в 12 из 15 случаев, что выше по сравнению с оригинальным методом Роджерса (8 из 15 случаев), т.е. точность диагностики повысилась с 53% до 80%. Фрагмент результатов исследования показан в таблице 2 (совпадения с фактическими дефектами выделены зеленым цветом).

Таблица 2 – Результаты исследования по методу Роджерса

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты применения оригинального метода Роджерса	Результаты применения нечеткого моделирования по методу Роджерса
1	ТДН-16000/110	Перегрев и искрение	Дефект не определен	Перегрев и искрение
2		Частичные и коронные разряды	Дефект не определен	Перегрев и искрение
3		Норма	Норма	Норма

Продолжение таблицы 2

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты применения оригинального метода Роджерса	Результаты применения нечеткого моделирования по методу Роджерса
13	ТДН-25000/110	Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды
14		Перегрев и искрение	Дефект не определен	Перегрев и искрение
15		Дугообразование	Дугообразование	Дугообразование

Метод ключевого газа использует входные переменные: концентрации газов H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 и CO . Выходной переменной модели является состояние трансформатора, описываемое типами дефектов. Разработанная модель, основанная на алгоритме Мамдани, использует нечеткие правила для интерпретации данных и определения дефектов. Выполнена проверка разработанной модели нечеткой логики для метода ключевого газа на образцах масла из трансформатора ТДН-40000/110-У2. Результаты показали отсутствие дефектов, что соответствует текущему состоянию нового трансформатора.

Метод ИЕС 60599 использует входные переменные: соотношения газов CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 и C_2H_2/C_2H_4 . В результате апробации разработанной модели по методу ИЕС 60599 на основе нечеткой логики на 15 образцах масла из резервуаров двухобмоточных силовых масляных трансформаторов мощностью 16-25 МВА и напряжением 110 кВ получена правильная интерпретация дефектов в 13 образцах масла из 15, в то время как оригинальный метод ИЕС 60599 верно интерпретирует только 6 образцов из 15. Таким образом, точность разработанной модели составляет 86,6 % при верификации с фактическими дефектами силовых масляных трансформаторов. Фрагмент результатов исследования показан в таблице 3 (совпадения с фактическими дефектами выделены зеленым цветом).

Таблица 3 – Результаты исследования по методу ИЕС60599

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты применения оригинального метода ИЕС 60599	Результаты применения нечеткого моделирования по методу ИЕС 60599
1	ТДН-16000/110	Перегрев и искрение	Термический дефект ($300 < T < 700$ °C)	Термический дефект ($300 < T < 700$ °C)
2		Частичные и коронные разряды	Термический дефект ($150 < T < 300$ °C)	Дефект не определен
3		Норма	Термический дефект ($150 < T < 300$ °C)	Норма

Продолжение таблицы 3

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты применения оригинального метода ИЕС 60599	Результаты применения нечеткого моделирования по методу ИЕС 60599
13	ТДН-25000/110	Частичные и коронные разряды	Дефект не определен	ЧР высокой плотности энергии
14		Перегрев и искрение	Термический дефект ($300 < T < 700$ °С)	Термический дефект ($300 < T < 700$ °С)
15		Дугообразование	Дефект не определен	Разряды малой мощности

Для оценки остаточного ресурса бумажной изоляции на основе содержания CO_2 и CO , а также фурановых включений, разработана модель нечеткой логики, реализованная в MATLAB с использованием пакета Fuzzy logic. Модель разработана с учетом рекомендаций международного стандарта FIST 3-31, который предлагает более точную дифференциацию дефектов по сравнению с отечественными стандартами. Разработаны:

- модель 1 для оценки срока службы бумажной изоляции на основе концентрации фурановых включений и скорости их образования. Входными лингвистическими переменными являются «Концентрация фурановых включений» и «Скорость образования фурановых включений в месяц». Выходной переменной является «Оценка срока службы бумажной изоляции», которая варьируется от 0 (окончание жизненного цикла) до 1 (полный ресурс);

- модель 2, которая предназначена для оценки степени износа бумажной изоляции на основе отношения CO_2 к CO и скорости образования CO . Выходная переменная «Оценка степени износа бумажной изоляции» также варьируется от 0 до 1, где 1 указывает на значительный износ.

Объединение моделей 1 и 2 позволяет определить суммарный остаточный ресурс бумажной изоляции. Для этого используются выходные значения из обеих моделей. Объединенная модель разработана с использованием 20 нечетких правил и протестирована на реальных данных трансформаторного масла.

В результате использования разработанной модели нечеткой логики с учетом рекомендаций международного стандарта FIST 3-31 для диагностики 16 образцов масла из бака ТДН-40000/110 получено, что у образцов № 1, 2 – нормальное состояние бумажной изоляции, у образцов № 3-14 – низкий порог износа бумажной изоляции, а у образцов № 15, 16 – значительный порог износа бумажной изоляции. В то время как при использовании отечественных стандартов РД 153-34.0-46.302-00 и СТО 34.01-23.1-001-2017 для диагностики указанных образцов масла получено, что все образцы бездефектны. Фрагмент результатов исследования для образцов масла №1,2 (нормальное состояние бумажной изоляции, выделено зеленым цветом), №3,4 (низкий порог износа

бумажной изоляции, выделено желтым цветом), №15,16 (значительный порог износа бумажной изоляции, выделено красным цветом) показан в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследования оценки остаточного ресурса бумажной изоляции

№ образца масла	Год выпуска	Фурановые включения (ppm)	Скорость образования фурановых включений в месяц (ppm/мес)	Соотношение $\frac{CO_2}{CO}$ (ppm)	Скорость образования CO в месяц (ppm/мес)	Оценка срока службы бумажной изоляции на основе фурановых включений в трансформаторном масле	Оценка степени износа бумажной изоляции на основе содержания CO ₂ и CO в трансформаторном масле	Суммарный остаточный ресурс бумажной изоляции
1	2013	<0,01	0	15	6	0,845	0,0967	0,129
2	2013	<0,01	0	11	0	0,845	0,281	0,126
3	2012	<0,01	0	3	23	0,845	0,77	0,321
4	2012	0,24	0,01	9	6	0,763	0,317	0,243
15	2011	4,44	0,09	5,9	21	0,127	0,563	0,672
16	2011	5,54	0,09	3,1	42	0,0953	0,769	0,749

Применение стандарта FIST 3-31 на основе аппарата нечеткой логики позволяет ранжировать степень старения бумажной изоляции и повысить точность принятия последующих управляющих решений о проведении ремонтных работ силовых масляных трансформаторов по сравнению с известными методами.

Таким образом, результаты практической реализации нечетких математических моделей, основанных на методах Роджерса, IEC 60599 и анализе ключевых газов, а также на современных подходах к оценке остаточного ресурса бумажной изоляции, показали улучшение точности диагностики функционального состояния силовых масляных трансформаторов по сравнению с оригинальным интерпретированием методов.

В четвертой главе разработаны прикладные программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах, основанные на нечетких моделях, включая модели Роджерса, ключевого газа, IEC 60599, а также определения остаточного ресурса бумажной изоляции, с использованием алгоритма Мамдани и применением нечеткой логики. Для этого проведена интеграция разработанных нечетких моделей и графического метода треугольника Дюваля в программные продукты.

Реализация графического программного продукта на основе метода треугольника Дюваля выполнена на основе разработки программного обеспечения с графическим интерфейсом пользователя (GUI) с использованием пакета App Designer в MATLAB. Для улучшения визуализации и сокращения времени на расчеты разработан программный продукт графического интерфейса (рисунок 3), позволяющий пользователю взаимодействовать с

интерфейсом с помощью мыши для настройки параметров и получения результатов диагностики. Благодаря графическому интерфейсу процесс анализа становится более удобным и доступным для операторов и инженеров, позволяя им оперативно принимать решения по обслуживанию и ремонту силовых трансформаторов на основе полученных данных.

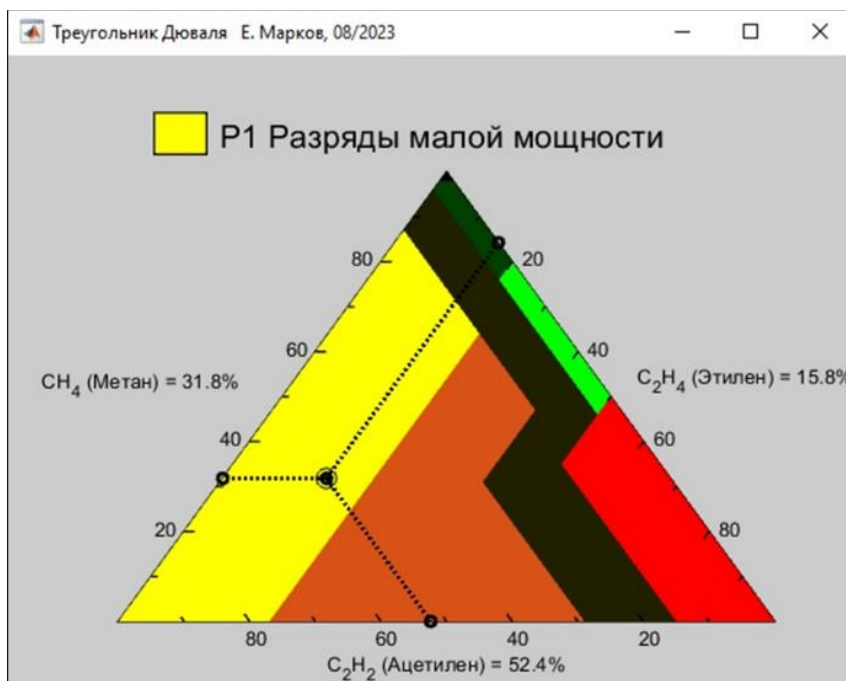


Рисунок 3 – Пользовательский интерфейс программного продукта по методу треугольника Дюваля

Апробация разработанного программного продукта проведена на тестовой выборке из 10 образцов масла трансформаторов ТРДН-25000/110. Результаты исследования образцов масла на основе графического метода треугольника Дюваля показали, что разработанный программный продукт интерпретировал развивающиеся дефекты с точностью 100%.

Выполнена реализация программных продуктов по методам IEC 60599 и Роджерса, которые основываются на алгоритме Мамдани и используют нечеткую логику для анализа данных о газах, выделяющихся из бака трансформатора.

На рисунке 4 представлен пример скриншота рабочего окна программного продукта по методу IEC 60599, иллюстрирующий непосредственно интерфейс пользователя и основные доступные функциональные возможности. Тестирование проведено на силовом трансформаторе АДЦТН-63000/220/110, который имеет фактические термические дефекты. В приведенном примере в результате расчета выявлен «Термический дефект», что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

**Программа определения развивающихся дефектов
по методу ИЕС на основе ХАРГ**

CH4	<input type="text" value="370"/>
H2	<input type="text" value="76"/>
C2H6	<input type="text" value="167"/>
C2H4	<input type="text" value="360"/>
C2H2	<input type="text" value="4"/>
<input type="button" value="Расчёт"/>	

Возможное состояние: Термический дефект (300<T<700 °С)

Рисунок 4 – Рабочий интерфейс программного продукта определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599

Разработан программный продукт, основанный на методе ключевого газа, применяющий алгоритм Мамдани и нечеткую логику для обработки данных.

На рисунке 5 представлен пример скриншота рабочего окна программного продукта, демонстрирующий пользовательский интерфейс и основные функциональные возможности. Для дефектного силового трансформатора АДЦТН-63000/220/110 выявлен «Термический дефект в масле», что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

**Программа определения развивающихся дефектов
по методу ключевого газа на основе ХАРГ**

CH4	<input type="text" value="370"/>
H2	<input type="text" value="76"/>
C2H6	<input type="text" value="167"/>
C2H4	<input type="text" value="360"/>
C2H2	<input type="text" value="4"/>
C0	<input type="text" value="190"/>
<input type="button" value="Расчёт"/>	

Дефект: ТД_в_масле

Рисунок 5 – Рабочий интерфейс программного продукта определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа

Разработан программный продукт для анализа и оценки остаточного ресурса бумажной изоляции в силовых масляных трансформаторах. Программный продукт предлагает модифицированную методологию, отраженную в современных исследованиях по продлению жизненного цикла

силовых масляных трансформаторов, а также позволяет провести анализ и получить оценку состояния изоляции на основе лабораторных данных, что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

На рисунке 6 представлен пример скриншота рабочего окна программного продукта. Тестирование выполнено для бездефектного трансформатора ТДНГ-31500/110/6. В результате расчета выявлена «Нормальная» активность старения бумажной изоляции, что подтверждается фактическим осмотром трансформатора после капитального ремонта.

Концентрация фурановых включений	Отношение CO ₂ к CO
<input type="text" value="1.36"/>	<input type="text" value="15"/>
Скорость образования фурановых включений за месяц	Скорость образования CO в месяц
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
<input type="text" value="Нормальная"/>	<input type="text" value="Нормальная"/>
Оценка срока службы бумажной изоляции	Оценка степени износа бумажной изоляции
Оценка срока службы бумажной изоляции	
<input type="text" value="Нормальная"/>	
Оценка степени износа бумажной изоляции	
<input type="text" value="Нормальная"/>	
<input type="button" value="Расчитать"/>	
<input type="text" value="Нормальная"/>	
Активность старения бумажной изоляции	

Рисунок 6 – Рабочий интерфейс программного продукта определения оставшегося ресурса бумажной изоляции

Разработанные программные продукты позволяют автоматизировать процесс оценки состояния силовых масляных трансформаторов. Интеграция данных ХАРГ в программные продукты позволяет формировать отчеты о текущем состоянии, улучшая диагностику. Упрощенный интерфейс на базе решений Matlab, Fuzzy logic и JavaScript обеспечивает удобство использования для специалистов разного уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена важная научно-техническая задача по разработке и внедрению методик улучшенной диагностики и анализа состояния силовых масляных трансформаторов на основе хроматографического анализа растворенных газов и нечеткой логики, что позволило повысить точность и надежность оценки технического состояния оборудования. В рамках проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Проведен анализ существующих методов интерпретации данных ХАРГ, таких как методы Дорненбурга, Роджерса, ИЕС 60599, ключевого газа, треугольник Дюваля, номограмм и ETRA. Установлено, что данные методы не

всегда обеспечивают однозначные результаты и могут приводить к противоречивым выводам о состоянии силовых масляных трансформаторов, что указывает на необходимость их совершенствования. Для дальнейшего анализа предложено использовать следующие методы: Роджерса – для идентификации большего количества типов дефектов; IEC 60599 – для стандартизации и унификации оценок; ключевых газов – для высокой точности определения одиночных дефектов и треугольник Дюваля – для визуализации типов дефектов.

2. Определены функции принадлежности для разработки нечетких моделей оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов. Доказано, что для реализации нечетких моделей определения технического состояния силовых масляных трансформаторов целесообразно использовать треугольную и трапециевидную функции принадлежности.

3. Разработаны нечеткие модели на основе методов Роджерса, IEC 60599, ключевого газа, а также модель определения срока службы бумажной изоляции на основе анализа фурановых включений, содержания монооксида углерода CO и диоксида углерода CO_2 в трансформаторном масле силовых трансформаторов с учетом международных норм, регулирующих их эксплуатацию. Объединение разработанных моделей позволило создать модель нечеткой логики для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов.

4. Экспериментально показано, что разработанные математические модели на основе принципов нечеткой логики для оценки и прогнозирования технического состояния силовых масляных трансформаторов имеют более высокую точность интерпретации дефектов по сравнению с оригинальными методами. Точность модели на основе метода Роджерса увеличилась с 53% до 80%, а модели на основе метода IEC 60599 – с 40% до 86,6%.

5. Разработаны прикладные программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах, использующие нечеткие модели, что соответствует современным трендам в цифровой трансформации электроэнергетики. Разработанные прикладные программные продукты функционируют через браузерный веб-интерфейс, что позволяет использовать их на различных устройствах и операционных системах (Windows, MacOS, Linux, Android), обеспечивая возможности мониторинга силовых масляных трансформаторов в различных условиях.

6. Разработанные прикладные программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах нашли применение в ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор» при проведении диагностических мероприятий силовых масляных трансформаторов и позволили повысить точность определения дефектов силового масляного оборудования на основе данных хроматографического анализа.

Таким образом, проведенное диссертационное исследование способствует совершенствованию методов диагностики силовых масляных

трансформаторов и позволит повысить точность и надежность оценки их технического состояния.

Дальнейшая работа в данной области исследования просматривается в следующих направлениях:

1. Разработка и верификация новых алгоритмов и методов интерпретации данных ХАРГ, в том числе в сотрудничестве с международными исследовательскими институтами и промышленными партнерами.

2. Расширение функциональности прикладных программных продуктов за счет интеграции дополнительных модулей и инструментов для комплексной оценки технического состояния трансформаторов.

3. Исследование и разработка подходов к использованию больших данных (Big Data) и интернета вещей (IoT) для мониторинга состояния трансформаторов в режиме реального времени.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Вахнина, В. В. Разработка программы для повышения точности диагностики развивающихся дефектов в силовых трансформаторах на основе хроматографического анализа растворенных газов в масле / В. В. Вахнина, **Е. В. Марков** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 36-42.

2. Вахнина, В. В. Разработка модели нечеткой логики по методу Роджерса для достоверного определения дефектов в силовых масляных трансформаторах / В. В. Вахнина, **Е. В. Марков** // Вопросы электротехнологии. – 2023. – № 3(40). – С. 78-86.

3. Вахнина, В. В. Разработка модели нечеткой логики для определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов систем электроснабжения / В. В. Вахнина, **Е. В. Марков**, А. Г. Сорокин // Промышленная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 14-22.

Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

1. **Марков, Е.В.** Программа для определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов по результатам ХАРГ / Е.В. Марков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661033 от 15.05.2024. Оpubл. 15.05.2024, Бюл. № 5.

2. **Марков, Е.В.** Программа для определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе нечеткой логики по методу ИЕС 60599 по результатам ХАРГ / Е.В. Марков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663348 от 05.06.2024. Оpubл. 05.06.2024, Бюл. № 6.

3. **Марков, Е.В.** Программа для определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе нечеткой логики по методу «Ключевого газа» по результатам ХАРГ / Е.В. Марков // Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2024664619 от 21.06.2024. Оpubл. 21.06.2024, Бюл. № 7.

4. **Марков, Е.В.** Программа для определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе нечеткой логики по методу «Роджерса» по результатам ХАРГ / Е.В. Марков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667822 от 30.07.2024. Оpubл. 30.07.2024, Бюл. № 8.

5. **Марков, Е.В.** Графическая программа для определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе метода треугольника Дюваля / Е.В. Марков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681035 от 04.09.2024. Оpubл. 04.09.2024, Бюл. № 9.

Другие наиболее значимые публикации

1. Вахнина, В. В. Разработка программы графического определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе метода треугольника Дюваля / В. В. Вахнина, **Е. В. Марков** // Фёдоровские чтения-2023 : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи), Москва, 15–17 ноября 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023. – С. 209-216.

2. **Марков, Е. В.** Анализ методов хроматографического анализа растворенных газов в масле силовых трансформаторах / **Е. В. Марков** // Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023 : Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. Том Выпуск 7. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2023. – С. 88-96.

3. Vakhnina, V.V. Developing fuzzy model using the key gas method to determine the defects occurring in oil power transformers / V.V. Vakhnina, **E.V. Markov** // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 451-455.

4. **Марков, Е.В.** Разработка модели нечеткой логики по методу Дорненбурга для определения дефектов в силовых масляных трансформаторах / **Е.В. Марков** // VI Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» 7-8 ноября 2024 года. Том 1. – Казань: «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), 2024. – С. 202-207.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол №2 от 21.01.2025 г.)

Подписано в печать 23.01.2025. Формат 60×84/16. Тираж 100 экз. Заказ № 3-15-25.
Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14