

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи



МАРКОВ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**Совершенствование методов хроматографического анализа
растворенных газов для повышения точности диагностики
развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Вахнина В.В.

Тольятти 2024

Введение	6
ГЛАВА 1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МАСЛЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	14
1.1 Характеристика свойств методов хроматографического анализа растворенных газов в масле, используемых для превентивного обнаружения развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах	14
1.2 Анализ характеристик метода Дорненбурга.....	15
1.3 Анализ характеристик метода Роджерса	16
1.4 Анализ характеристик метода IEC 60599	18
1.5 Анализ характеристик метода ключевого газа согласно стандарту IEEE StandARCd C57.104-2019.....	20
1.6 Анализ характеристик метода РД 153-34.0-46.302-00	22
1.7 Анализ графических методов ХАРГ	25
1.8 Постановка цели и задач исследования	33
1.9 Выводы по главе 1	35
ГЛАВА 2 ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	36
2.1 Определение структуры нечеткой математической модели силового масляного трансформатора для оценки технического состояния по результатам ХАРГ.....	37
2.2 Настройка нечеткой математической модели оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов по результатам ХАРГ	48
2.3 Выводы по главе 2.....	61

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКИХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОВ ХАРГ ДЛЯ ПРЕВЕНТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	62
3.1 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу Роджерса	63
3.1.1 Разработка нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу Роджерса в пакете Fuzzy logic программного комплекса MATLAB	63
3.1.2 Апробация разработанной модели и интерпретация результатов....	68
3.2 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа.....	71
3.3 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599	75
3.3.1 Разработка нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599 в пакете Fuzzy logic программного комплекса MATLAB	75
3.3.2 Апробация разработанной модели и интерпретация результатов....	80
3.4 Модель нечеткой логики для определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов	82
3.4.1 Модель нечеткой логики 1 – модель для оценки срока службы бумажной изоляции на основе фурановых включений в трансформаторном масле	83
3.4.2 Модель нечеткой логики 2 – модель для оценки степени износа бумажной изоляции на основе содержания CO_2 и CO в трансформаторном масле	86
3.4.3 Модель нечеткой логики 3 – модель для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов.....	88

3.4.4 Апробация полученной нечеткой модели и интерпретация результатов	91
3.5 Выводы по главе 3	93
ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ХАРГ	95
4.1 Интеграция разработанных моделей в программный продукт	95
4.2 Реализация графического программного продукта на основе метода треугольника Дюваля	96
4.2.1 Разработка программного продукта с графическим интерфейсом пользователя (GUI)	96
4.2.2 Апробация разработанного программного продукта	100
4.3 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу ИЕС 60599	102
4.4 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу Роджерса	106
4.5 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу ключевого газа	111
4.6 Реализация прикладного программного продукта на основе нечеткой модели определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов	115
4.7 Выводы по 4 главе	119
Заключение	121
Список используемой литературы	124
Приложения	136
Приложение 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	136

Приложение 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	137
Приложение 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	138
Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	139
Приложение 5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	140
Приложение 6. Справка о внедрении основных результатов научно-технической деятельности в практику ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор»	141

Введение

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 масляных 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 содержание 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 масляных 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 масляных 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 экспериментального 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. Основной объем 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.

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 показано, что методы хроматографического анализа растворенных газов являются одним из наиболее эффективных инструментов для превентивной диагностики развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах, так как не требуют вывода оборудования из эксплуатации.

Показано, что состав образующихся газов зависит от типа дефекта, и их обнаружение на ранних стадиях является важным признаком возможных неисправностей, которые могут привести к выходу из строя трансформатора.

Рассмотрены существующие методы интерпретации ХАРГ. Выявлено, что большинство из них основаны на эмпирических данных и практическом

опыте, что может приводить к вариативности результатов. Установлено, что методы интерпретации, такие как метод Дорненбурга, метод Роджерса, метод ИЕС 60599, метод ключевого газа, метод номограмм, метод РД 153-34.0-46.302-00, метод треугольника Дюваля и метод ETRA, используют различные принципы и подходы, включая концентрации газов, ключевые газы, соотношения ключевых газов и графическое представление.

Выявлены недостатки и ограничения в существующих методах, включая недостаточную чувствительность к ранним стадиям дефектов, недостаточные критерии оценки пограничных значений концентраций растворенных газов и зависимость результатов от внешних факторов. Обоснована необходимость дальнейших исследований для повышения точности и надежности диагностики. В заключении главы детализируются задачи исследования, решаемые в диссертационной работе.

Во второй главе установлено, что стандартные математические методы оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов часто приводят к неудовлетворительным результатам из-за сложности объектов и большого объема данных. Для решения этих задач наиболее подходят методы нечеткой логики и экспертные системы. Показано, что использование нечеткого логического вывода, особенно алгоритма Мамдани, является эффективным для принятия решений в этой области.

Разработана нечеткая модель в соответствии со стандартом РД 153-34.0-46.302-00. Экспериментально доказано, что треугольные и трапециевидные функции принадлежности наиболее оптимальны для создания нечетких моделей.

В третьей главе разработаны и верифицированы нечеткие модели, предназначенные для оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов. Установлено, что модель на основе метода Роджерса демонстрирует значительное улучшение точности интерпретации дефектов, повысив её с 53% до 80%. Аналогично, показано, что нечеткая модель, основанная на методе ИЕС 60599, увеличивает точность интерпретации

дефектов с 40% до 86,6%. Модель, разработанная на основе анализа ключевых газов, также подтвердила свою способность корректно определять бездефектное состояние трансформаторов.

Разработаны модели, использующие нечеткую логику для определения срока службы бумажной изоляции, основанные на анализе фурановых включений, а также содержания монооксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂) в трансформаторном масле, с учетом международных эксплуатационных норм. Обосновано, что объединение этих моделей позволило создать комплексную нечеткую модель для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции, что существенно повысило точность её оценки.

В четвертой главе разработаны прикладные программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах, основанные на нечетких моделях, с использованием алгоритма Мамдани и нечеткой логики. 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. Показано, что программы автоматизируют процесс оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов, используя данные хроматографического анализа растворенных газов в масле.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы.

В приложении приведены справка о внедрении результатов работы и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ГЛАВА 1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МАСЛЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1 Характеристика свойств методов хроматографического анализа растворенных газов в масле, используемых для превентивного обнаружения развивающихся дефектов в силовых масляных трансформаторах

Известно, что ХАРГ [65, 72, 85, 87, 102] – один из самых распространенных методов превентивной диагностики, не требующий вывода трансформаторного оборудования из эксплуатации. Он предусматривает регулярный отбор проб масла, а современные системы мониторинга отслеживают концентрации газов в реальном времени. Ключевым шагом в использовании методов ХАРГ для обнаружения дефектов является правильная диагностика дефекта, который приводит к образованию газов. Аномальные электрические или термические процессы вызывают разрушение бумажной изоляции и приводят к газообразованию. Для силовых масляных трансформаторов, являющихся критически важными элементами систем электроснабжения, применение ХАРГ имеет особое значение. Развивающиеся дефекты часто сопровождаются изменением состава и концентрации растворенных газов. Обнаружение повышенного уровня газов позволяет идентифицировать неисправности на ранних стадиях. Это особенно важно для предотвращения отказов оборудования, которые могут привести к серьезным экономическим и технологическим последствиям. Возможные процессы, приводящие к газообразованию, включают искрение, дугообразование, коронный разряд, перегрев изоляции из-за сильной перегрузки и выхода из строя системы принудительного охлаждения. При этом для силовых масляных трансформаторов необходимо учитывать такие внешние факторы, как режимы

нагрузки, климатические условия и конструктивные особенности. Характерными газами развивающихся дефектов являются водород (H_2), метан (CH_4), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), ацетилен (C_2H_2), монооксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2). Каждый тип дефекта образует газы, которые обычно являются горючими. Увеличение общего количества горючих газов (СУГ) может указывать на наличие одного или нескольких тепловых и электрических дефектов.

Следует отметить, что методы интерпретации ХАРГ основаны на эмпирических предположениях и практических знаниях, собранных экспертами по всему миру. Тем не менее, следует применять методы интерпретации с осторожностью, поскольку они указывают только на возможные дефекты.

Как правило, методы интерпретации ХАРГ основаны на определенных принципах, таких как концентрации газов, ключевые газы, отношение ключевых газов и графическое представление. Далее выполнен анализ восьми наиболее широко применяемых методов диагностики силовых масляных трансформаторов по результатам ХАРГ: метод Дорненбурга, метод Роджерса, метод IEC 60599:2022, метод ключевого газа, метод номограмм, метод РД 153-34.0-46.302-00, метод треугольника Дюваля, метод ETRA [32].

1.2 Анализ характеристик метода Дорненбурга

Отличительная черта метода Дорненбурга [33, 72] — способность выявлять развивающиеся дефекты путем анализа следующих соотношений концентраций газов: CH_4/H_2 , C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 и C_2H_2/C_2H_4 , которые используются для выявления термических дефектов, частичных разрядов с высокой и низкой плотностью энергии. Метод Дорненбурга основан на принципах термической деструкции [16, 70, 97]. В методе сформулирован подход, согласно которому соотношение газов считается верным, если концентрации газа для H_2 , CH_4 , C_2H_2 и C_2H_4 превышают вдвое значение

установленного предела для каждого газа и если концентрация C_2H_6 превышает значение установленного предела в три раза. Чтобы определить достоверность четырех соотношений, каждое последующее соотношение сравнивается с определенными значениями [72], которые показаны в таблице 1.1. Следовательно, если все четыре последовательных соотношения для определенного типа дефекта находятся в пределах заданных значений, то дефект подтверждается.

Таблица 1.1 – Классификация дефектов на основе метода Дорненбурга

Возможный развивающийся дефект	$\frac{CH_4}{H_2}$		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$		$\frac{C_2H_2}{CH_4}$		$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	
	Масло	Газовое пространство	Масло	Газовое пространство	Масло	Газовое пространство	Масло	Газовое пространство
Термический дефект	>1,0	>0,1	<0,75	<1,0	<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Частичные разряды с низкой плотностью энергии	<0,1	<0,01	Незначительное		<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Частичные разряды с высокой плотностью энергии	>0,1 <0,1	>0,01 <0,1	>0,75	>1,0	>0,3	>0,1	<0,4	<0,2

Метод Дорненбурга требует тщательного соблюдения точности измерений концентраций газов и их соотношений. Ограниченные диапазоны газовых отношений могут привести к неопределенности в интерпретации дефекта, особенно на начальных стадиях его развития.

1.3 Анализ характеристик метода Роджерса

Согласно статистике [102], наиболее широко используемым методом ХАРГ является метод Роджерса [102], который интерпретирует большее количество типов термических дефектов по сравнению с методом Дорненбурга [72]. Метод Роджерса анализирует четыре типа соотношения газов: CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 и C_2H_2/C_2H_4 . К числу достоинств метода

относится, что дефекты диагностируются с помощью простой схемы кодирования, основанной на диапазонах передаточных чисел [42, 81, 101]. Соотношения концентраций газов и их кодов указаны в таблице 1.2 [102].

Таблица 1.2 – Соотношения концентраций газов и их кодов по методу Роджерса

Соотношения газов	Значение	Код дефекта
$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\leq 0,1$	3
	0,1-1	0
	1-3	1
	≥ 3	2
$\frac{\text{C}_2\text{H}_6}{\text{CH}_4}$	< 1	0
	≥ 1	1
$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$	< 1	0
	1-3	1
	≥ 3	2
$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	$< 0,5$	0
	0,5-3	1
	≥ 3	2

Типы генерируемых дефектов в масле могут быть определены с помощью алгоритма, когда известны соотношения кодов и предполагаемых дефектов, которые указаны в таблице 1.3. Согласно методу, определяется четыре группы состояний силового масляного трансформатора: нормальное старение, частичные разряды, а также электрические и термические дефекты различной степени возникновения. Предполагаемые дефекты силового масляного трансформатора согласно методу Роджерса представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Соотношение кодов и предполагаемых дефектов по методу Роджерса

Коды				Предполагаемый дефект
$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_6}{\text{CH}_4}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	
0	0	0	0	Норма

Продолжение таблицы 1.3

Коды				Предполагаемый дефект
$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	
3	0	0	0	Частичные разряды с низкой плотностью энергии
3	0	0	1, 2	Частичные разряды с высокой плотностью энергии
0	0	0	1	Непрерывный частичный разряд
0	0	1, 2	1, 2	Разряды большой мощности
0	0	2	2	Разряды малой мощности
1, 2	0	0	0	Термический дефект низкой температуры (менее 150°C)
1, 2	1	0	0	Термический дефект в диапазоне низких температур (150-200°C)
0	1	0	0	Термический дефект в диапазоне температур (200-300°C)
0	0	1	0	Термический дефект
1	0	1	0	Блуждающие токи в обмотках
1	0	2	0	Блуждающие токи в магнитопроводе и баке

Следует отметить эффективность метода, так как он сопоставляет результаты многочисленных исследований отказов с газовым анализом каждого случая. Однако наряду с достоинствами метода [102], в нем присутствуют следующие недостатки:

- некоторые значения соотношений газов не соответствуют диагностическим кодам, присвоенным различным дефектам.

- поскольку метод не учитывает растворенные газы ниже нормальных значений концентрации, возможно неправильное интерпретирование данных.

1.4 Анализ характеристик метода IEC 60599

Метод соотношений IEC 60599 [87] напоминает метод Роджерса, но исключает отношение C_2H_6/CH_4 , что указывает лишь на ограниченный

температурный диапазон диагностики деструкции бумажной изоляции. Известно, что оставшиеся три соотношения газов имеют разные диапазоны по сравнению с методом Роджерса. В методе рассматриваются четыре состояния: нормальное старение, частичные разряды с низкой и высокой плотностью энергии, термические и электрические дефекты различной степени возникновения [87]. Характер прогнозируемых дефектов и соотношения газов, согласно методу ИЕС 60599, показаны в таблице 1.4 [87].

Таблица 1.4. – Классификация дефектов на основе метода ИЕС 60599

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов		
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Частичные разряды с низкой плотностью энергии	<0.1	<0.1	≤ 1
Частичные разряды с высокой плотностью энергии	0.1-3	<0.1	≤ 1
Разряды малой мощности	>0.1	0.1-3	$\geq 1 < 3$
Разряды большой мощности	0.1-3	0.1-1	≥ 3
Термический дефект низкой температуры (менее 150°C)	<1	0.1-1	1-3
Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°C)	<0.1	≥ 1	≤ 1
Термический дефект в диапазоне температур (300-700°C)	<0.1	≥ 1	1-3
Термический дефект высокой температуры (более 700°C)	<0.1	≥ 1	≥ 3

Недостатком метода ИЕС 60599 является то, что полученные с помощью метода ИЕС 60599 результаты часто нуждаются в подтверждении другими методами диагностики для обеспечения полной картины состояния оборудования. Достоинством метода ИЕС 60599 является то, что данный метод интегрируется с другими стандартами и рекомендациями ИЕС, обеспечивая согласованный подход к оценке состояния трансформаторного оборудования.

1.5 Анализ характеристик метода ключевого газа согласно стандарту IEEE StandARCd C57.104-2019

Метод ключевого газа согласно IEEE StandARCd C57.104-2019 [65] представляет собой метод определения развивающихся дефектов по газам, которые являются типичными или преобладающими при различных температурах. Метод ключевого газа соотносит ключевые газы с различными типами дефектов, используя процентное соотношение горючих газов.

Принцип метода ключевого газа основан на анализе газов, выделяющихся из бумажной изоляции в процессе термического или электрического воздействия, возникающего при неисправности силового масляного трансформатора. Данные газы являются индикатором повышенной температуры, вызванной развитием дефекта. Метод ключевого основывается на анализе отдельных газов, а не их соотношений.

Электрические и термические воздействия, такие как дугообразование малой или большой энергии, частичные разряды, перегрев приводят к нарушению диэлектрических свойств масла и деструкции бумажной изоляции. К основным газам для обнаружения дефектов относятся: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 [71, 94, 105].

Для оценки дефектов в трансформаторах рассматриваются четыре основных типа повреждений: термическое повреждение масла, термическое повреждение бумажной изоляции, электрическое повреждение из-за частичного разряда и электрическое повреждение из-за дугового разряда [100].

Согласно стандарту IEEE C57.104-2019 [65], различным типам повреждений соответствуют определенные газы, выделяемые в характерных пропорциях (рисунок 1.1.). Так, при термической дегградации трансформаторного масла главным образом формируется этилен (C_2H_2), составляющий более 60% выделяемых газов, а при термическом повреждении бумажной изоляции образуется до 90% угарного газа (CO). Частичные разряды

в масле сопровождаются выделением около 80% водорода (H_2), в то время как при возникновении дуговых разрядов высвобождается ацетилен, доля которого составляет 30%, с небольшим количеством водорода.

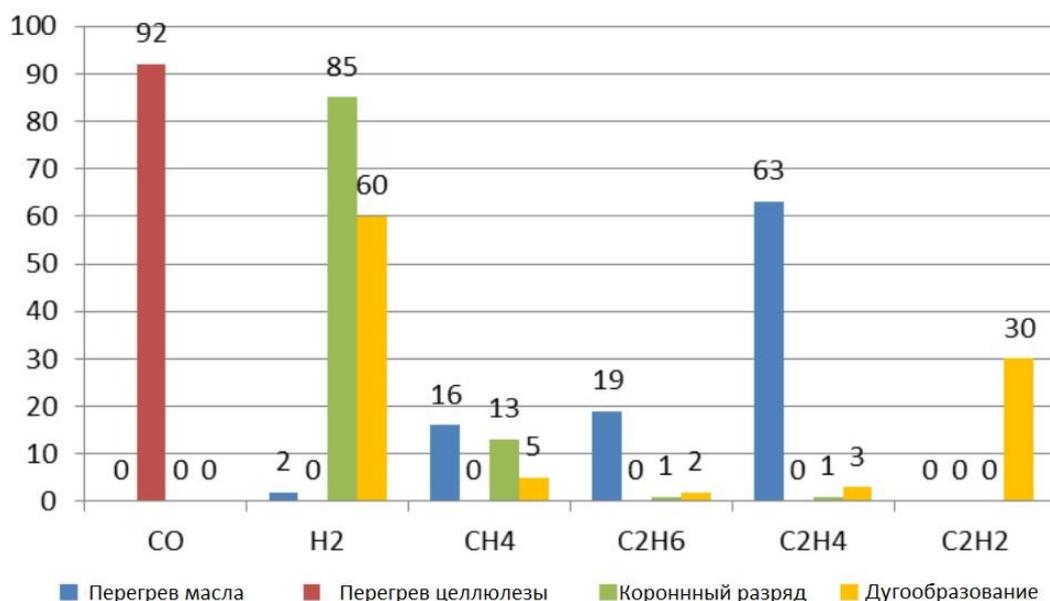


Рисунок 1.1 – Ключевые газы и их пропорции согласно дефектам

В стандарте IEEE StandARcd C57.104-2019 [65] рекомендуется использовать условия, состоящие из четырех уровней для классификации развивающихся дефектов. В таблице 1.5 приведены граничные концентрации растворенных газов, выражаемые в миллионных частях ppm ($1 \cdot 10^{-6}$) и суммы углеводородных газов (СУГ) для условий 1 - 4.

Условие 1: значение СУГ ниже указанных в таблице 1.5 значений указывает на то, что состояние силового масляного трансформатора не требует внимания.

Условие 2: значение СУГ в диапазонах, указанных в таблице 1.5, показывает уровень горючих газов, превышающий нормальный.

Условие 3: значение СУГ в диапазонах, указанных в таблице 1.5, показывает высокий уровень горючих газов. Необходимо принять дополнительные меры по диагностике трансформатора.

Условие 4: значение СУГ в диапазонах, указанных в таблице 1.5, показывает на чрезмерный уровень образования горючих газов. Продолжение работы может привести к выходу трансформатора из строя.

Таблица 1.5 – Граничные концентрации растворенных газов в масле

Условие	Концентрация растворенных газов в масле, ppm						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	СУГ
Условие 1	<100	<120	<35	<50	<65	<350	<720
Условие 2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	721-1920
Условие 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	1921-4630
Условие 4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>4630

Достоинством метода ключевого газа является точность определения одиночных дефектов силовых масляных трансформаторов. Недостатком метода является то, что случае множественных дефектов силового масляного трансформатора данным методом выявляется только доминирующий дефект. Кроме того, метод ключевого газа не дает количественной оценки серьезности обнаруженного дефекта [59, 107].

1.6 Анализ характеристик метода РД 153-34.0-46.302-00

В Российской Федерации нормативный документ РД 153-34.0-46.302-00 представляет собой официально утвержденный стандарт, который регламентирует постановку диагноза на основе хроматографического анализа растворенных газов [41]. В процессе его разработки принимали участие Ю.Н. Львов, Т.Е. Касаткина, Е.И. Несвижский (все ВНИИЭ) и Е.М. Бида (Свердловэнерго), а во втором издании также другие специалисты. Первое издание было зарегистрировано в 1989 году.

Для выявления вида дефекта согласно данной методике используются следующие отношения газов (таблица 1.6): $\frac{CH_4}{H_2}$, $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ и $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ [41]. Методика

интерпретирует три группы дефектов: частичные разряды, дуговые разряды и термические дефекты.

Таблица 1.6 – Интерпретация результатов ХАРГ

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов			Типичные примеры
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
Нормально	<0.1	0.1-1	<1	Нормальное старение
Частичные разряды с низкой плотностью энергии	<0.1	<0.1	<1	Разряды в заполненных газом полостях, образовавшихся вследствие не полной пропитки или влажности изоляции.
Частичные разряды с высокой плотностью энергии	0.1-3	<0.1	<1	То же, что и в п.2, но ведет к оставлению следа или пробой твердой изоляции.
Разряды малой мощности	>0.1	0.1-1	1-3	Непрерывное искрение в масле между соединениями различных потенциалов или плавающего потенциала. Пробой масла между твердыми материалами.
Разряды большой мощности	0.1-3	0.1-1	>3	Дуговые разряды; искрение; пробой масла между обмотками или катушками, или между катушками на землю.
Термический дефект низкой температуры (<150°C)	<0.1	0.1-1	1-3	Перегрев изолированного проводника.
Термический дефект в диапазоне низких температур (150- 300°C)	<0.1	>1	<1	Местный перегрев сердечника из-за концентрации потока. Возрастание температуры "горячей точки".
Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°C)	<0.1	>1	1-3	То же, что и в п.7, но при дальнейшем повышении температуры "горячей точки".
Термический дефект высокой температуры (>700°C)	<0.1	>1	>3	Горячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов; циркулирующие токи в сердечнике или баке.

Для дополнительной спецификации диагноза применяется отношение газов $\frac{CO_2}{CO}$. Определение характера дефекта проводится только в случае, если

содержание хотя бы одного из семи анализируемых газов в масле превышает граничную концентрацию, установленную опытным путем (таблица 1.7) [41].

Таблица 1.7 – Граничные концентрации растворенных в масле газов

Оборудование	Концентрации газов, %об.						
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Трансформаторы напряжением 110-500 кВ	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,05/0,06	0,6(0,2)/0,8(0,4)
Трансформаторы напряжением 750 кВ	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001	0,05	0,40
Реакторы напряжением 750 кВ	0,01	0,003	0,001	0,001	0,002	0,05	0,40

Необходимо учитывать, что образование CO_2 и CO в трансформаторном масле является возможным при нормальных условиях эксплуатации. Кроме того, содержание CO_2 в трансформаторном масле зависит от срока эксплуатации трансформатора и применяемого метода защиты масла от окисления.

Помимо использования соотношений газов для оценки состояния трансформатора, предусмотрено следующее деление газов на категории:

- «основные» газы, чья концентрация сравнительно максимальна относительно граничной;
- «характерные» газы, чья концентрация находится в пределах 0,1-1,0 от граничной;
- «нехарактерные» газы, концентрация которых составляет менее 0,1 от граничной.

Однако следует отметить недостаток данной методики, выявленный в исследовании [8], заключающийся в том, что в 60% случаев данная методика не способна определить тип развивающегося дефекта. Это обусловлено особенностью метода, в котором значения соотношений газов $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$, $\frac{CH_4}{H_2}$ и $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ ограничиваются значениями 0,1, 1 и 3.

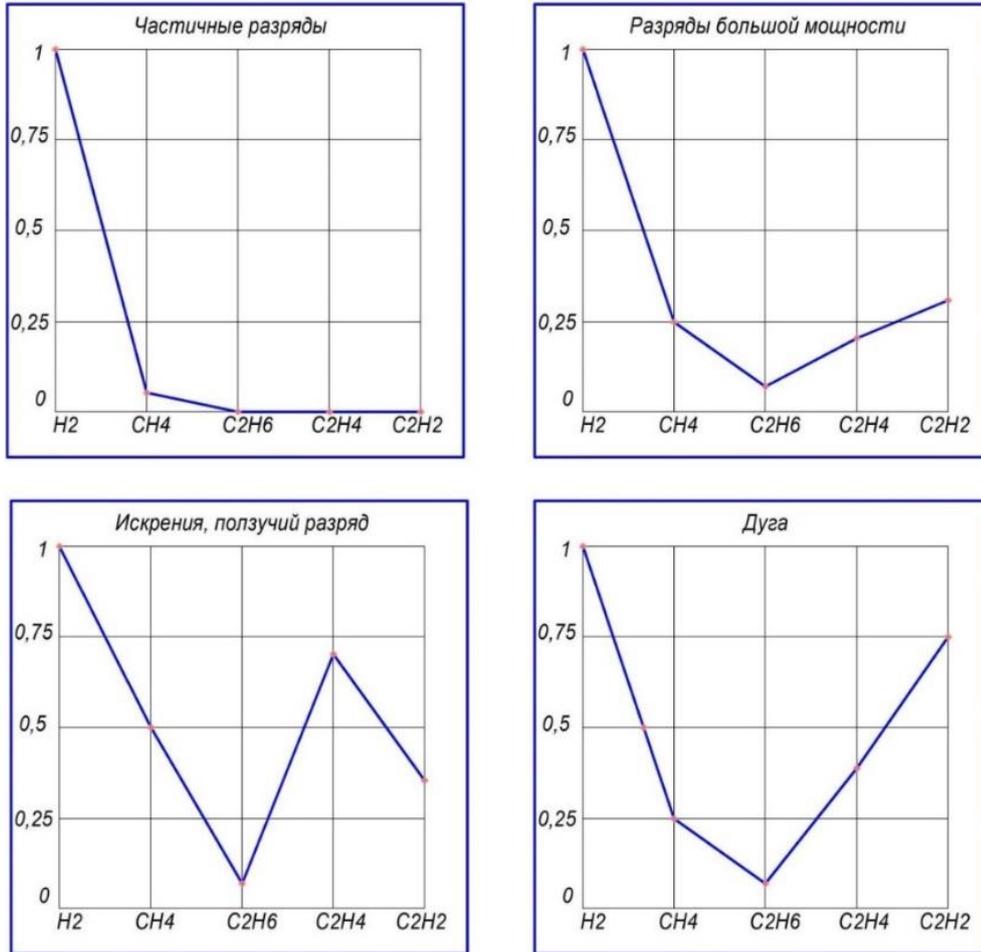
1.7 Анализ графических методов ХАРГ

Для определения типа дефекта японскими исследователями были предложены графические образы различных дефектов (номограммы) [50]. Графические образы дефектов создаются на основе концентраций пяти газов: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 . Метод был разработан на основе практического опыта, сравнивающего фактически обнаруженные в трансформаторе дефекты во время внутреннего осмотра с составом газов, определяемых методом ХАРГ. При этом изображения дефектов отражают общие зависимости в соотношениях между отдельными газами в процессе нагрева при различных температурах или при разрядных явлениях [13].

Метод использует тринадцать номограмм, которые подразделяются по типу дефекта на: электрические (рисунок 1.2), низкотемпературные тепловые (рисунок 1.3) и высокотемпературные тепловые (рисунок 1.4) [13].

Кроме того, применение номограмм для диагностики дефектов предоставляет возможность визуально оценить прогрессирование дефекта и прогнозировать его развитие. Это достигается благодаря детализированному сопоставлению концентраций газов, образующихся при различных аномальных процессах, таких как перегрев или электрические разряды. Например, повышенные концентрации ацетилена (C_2H_2) могут указывать на электрические разряды, тогда как высокий уровень этилена (C_2H_4) часто свидетельствует о тепловых дефектах при повышенных температурах. Таким образом, номограммы обеспечивают более точное разграничение между различными типами дефектов, что способствует своевременному принятию мер по их устранению и предотвращению аварийных ситуаций.

Основной газ - Водород



Основной газ - Ацетилен

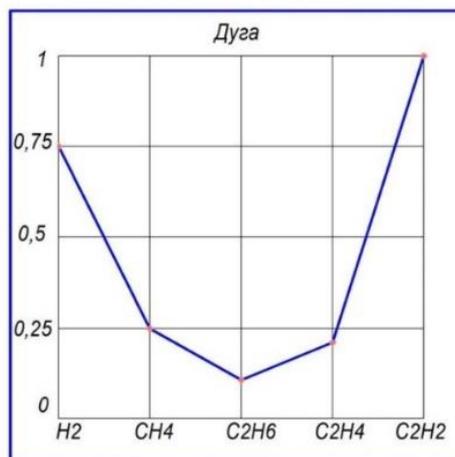


Рисунок 1.2 – Графики дефектов электрического характера

Основной газ - Метан
(нагрев в диапазоне низких температур)

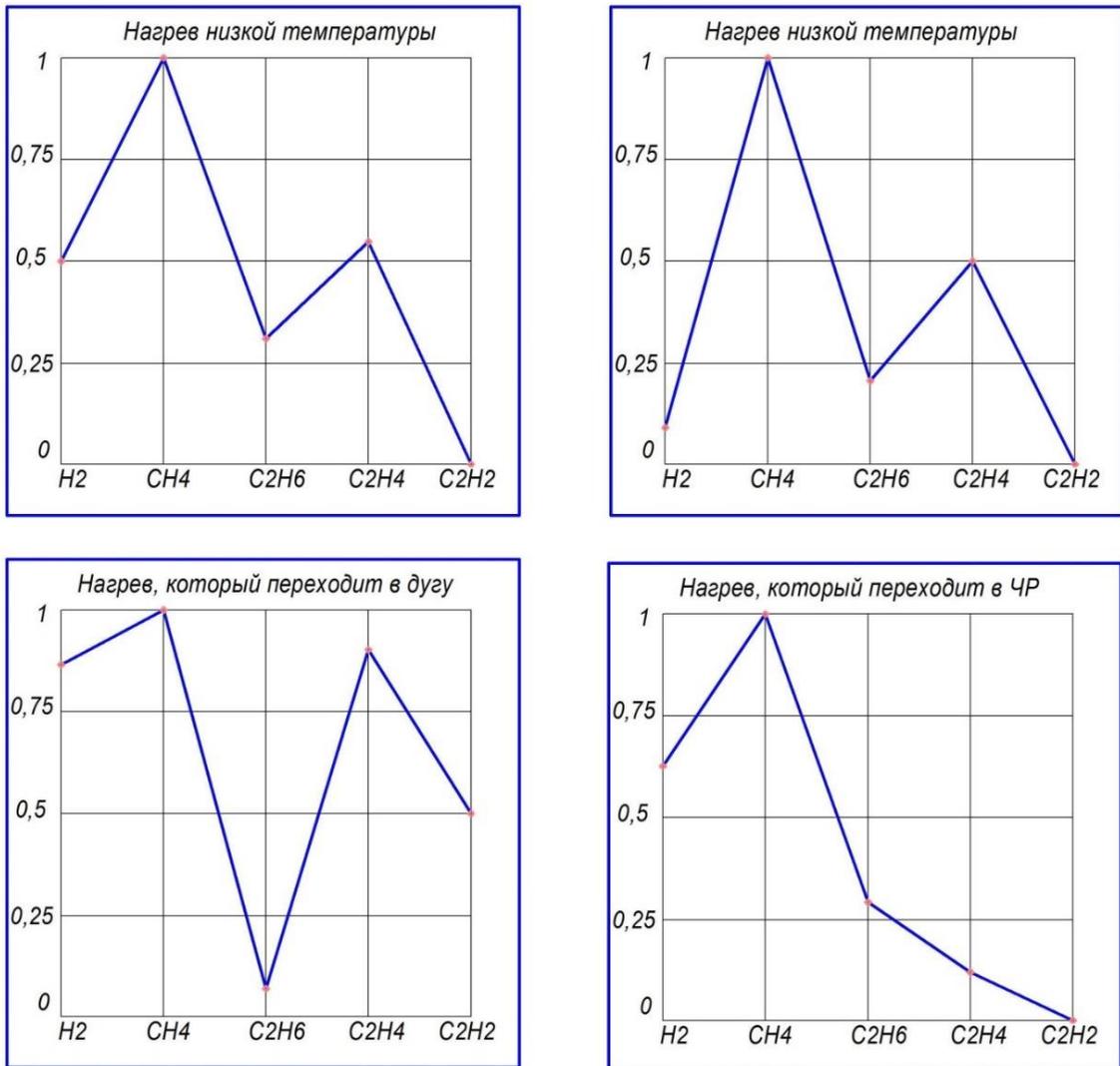


Рисунок 1.3 – Графики дефектов термического характера низкой температуры

Основной газ - Этилен
(нагрев в диапазоне высоких температур)

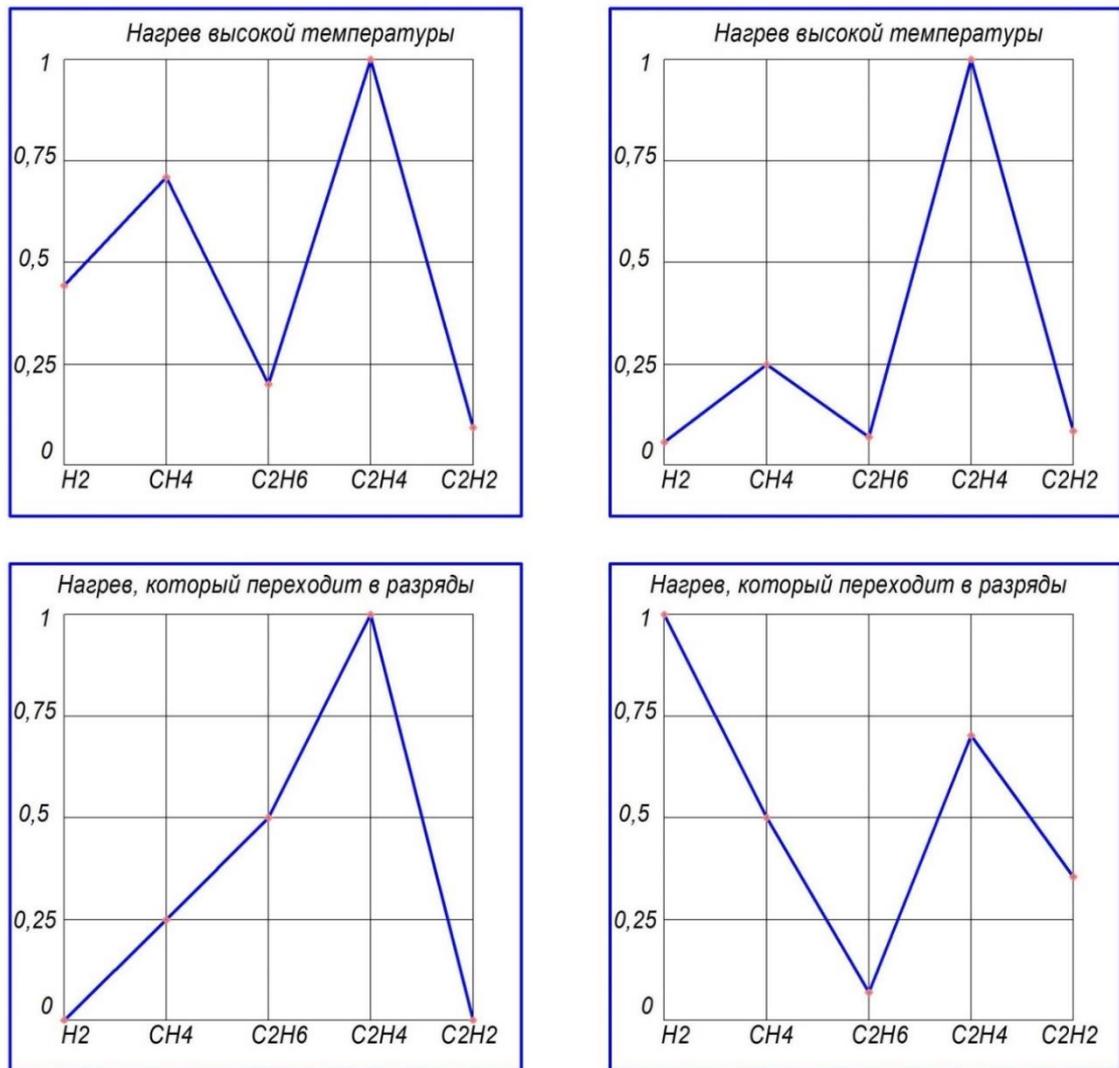


Рисунок 1.4 – Графики дефектов термического характера высокой температуры

Достоинством номографического метода [87] является повышение точности диагностики дефектов за счет сочетания газовых соотношений, характерных для неисправностей, и концепции порога ключевого газа. Графическое представление данных о газах, образующихся при дефектах, упрощает интерпретацию результатов диагностики. Однако этот метод не подходит для сложных и множественных дефектов.

Метод треугольника Дюваля для маслонеполненного высоковольтного оборудования, главным образом трансформаторов, был разработан Мишелем

Дювалем в 1974 году [74]. Он основан на использовании трёх углеводородных газов: CH_4 (метан), C_2H_4 (этилен) и C_2H_2 (ацетилен), которые выделяются при увеличении уровня газообразования в работающих силовых масляных трансформаторах. Данный метод зарекомендовал себя как точный и надёжный на протяжении многих лет и в настоящее время приобретает всё большую популярность. Одним из преимуществ метода является возможность своевременного выявления развивающегося дефекта при низком проценте ложных результатов. Недостатком данного метода является то, что он не способен определять нормальное состояние старения трансформатора, следовательно, метод треугольника Дюваля необходимо использовать в совокупности с другими методологиями ХАРГ [73].

Особенностью метода Дюваля является то, что диагностика неисправностей осуществляется на основе визуализации расположения растворенных газов на треугольной карте, как показано на рисунке 1.5.

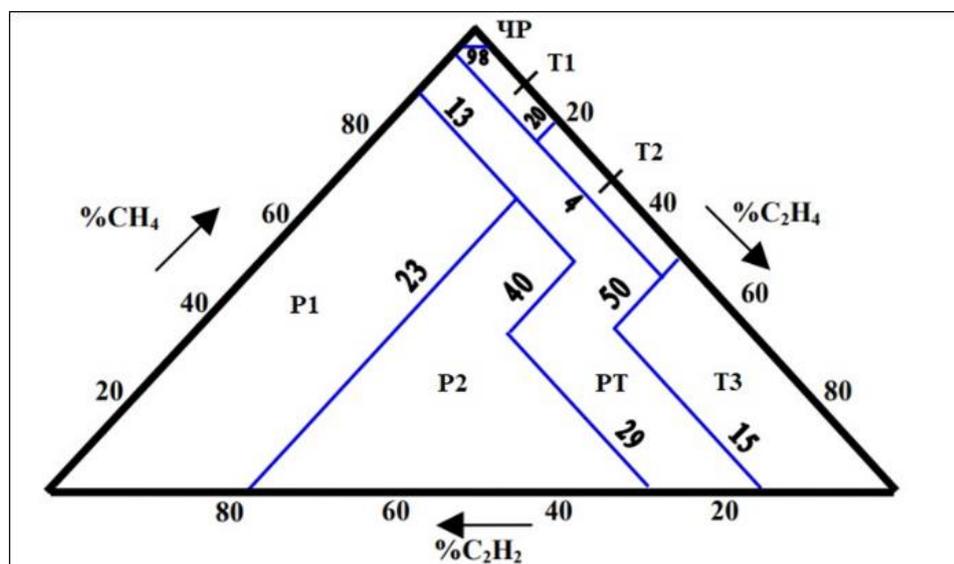


Рисунок 1.5 – Треугольник Дюваля

Как правило, обнаруживаются четыре типа дефектов, а именно: частичный разряд, разряды высокой и низкой мощности (электрический дефект), сочетание электрических и термических дефектов и точки перегрева

в различных температурных диапазонах (термический дефект) [75]. Указанные типы дефектов будут определяться в 7 отдельных зонах, показанных в таблице 1.8 [75]. Поскольку ни одна область не предназначена для нормального состояния старения трансформатора, небрежная интерпретация результатов приведет к обнаружению любого из упомянутых дефектов.

Таблица 1.8 – Виды предполагаемых дефектов по методу треугольника Дюваля

Обозначение	Вид предполагаемого дефекта	Описание дефекта
ЧР	Частичные разряды	Разряды типа холодной плазмы (короны) в газовых пузырьках или пустотах с возможным образованием парафина в бумажной изоляции
P1	Разряды низкой мощности	Частичные разряды искрового типа, вызывающие пробой, обугленные пробои в бумажной изоляции. Низкоэнергетическая дуга, вызывающая обугленные перфорации или следы на поверхности бумажной изоляции, с образованием частиц углерода в масле
P2	Разряды высокой мощности	Разряды в бумажной изоляции или масле, сопровождающиеся силовым замыканием, приводящие к значительному повреждению бумажной изоляции, образованию больших частиц углерода в масле, расплавлению металла, срабатыванию защиты и газового реле
T1	Термический дефект, $T < 300$ °C	Бумажная изоляция становится коричневатой (> 200 °C) или обугливается (> 300 °C)
T2	Термический дефект $300, < T < 700$ °C	Карбонизация бумажной изоляции, образование частиц углерода в масле
T3	Термический дефект, $T > 700$ °C	Обширное образование частиц углерода в масле, окрашивание металла (800 °C) или плавление металла (> 1000 °C)
PT	Совокупность термических и электрических дефектов	Переходные состояния между электрическими и термическими дефектами

Из проведенного анализа графического метода ХАРГ треугольника Дюваля видно, что данный метод основан на использовании трех углеводородных газов: CH_4 (метан), C_2H_4 (этилен) и C_2H_2 (ацетилен) с

последующей интерпретацией результатов по 7 видам дефектов [76]. Особенностью метода является графическое представление дефектов на треугольной карте, что предполагает возможность мониторинга развивающегося дефекта силового масляного трансформатора в динамике. Одним из достоинств метода является его способность всегда определять вид развивающегося дефекта. Тем не менее, следует отметить недостаток метода, заключающийся в невозможности определения естественного старения силового масляного трансформатора [6].

Метод ETRA был разработан Ассоциацией Исследований Электротехнологий (Япония) [96]. Он основан на использовании соотношения трёх газов: C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 , а также диагностического графика для определения характера повреждений (рисунок 1.6) [46]. На графике выделены зоны, соответствующие определённым типам дефектов [46].

Если концентрация C_2H_2 ниже аналитического предела обнаружения, и этот газ считается отсутствующим, соотношение $\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$ не рассчитывается и условно принимается равным 0,005. В этом случае можно диагностировать только нагрев оборудования до температуры 700 °С [64], поскольку интенсивное образование ацетилена (C_2H_2) в значимых концентрациях происходит при температуре 700 °С и выше.

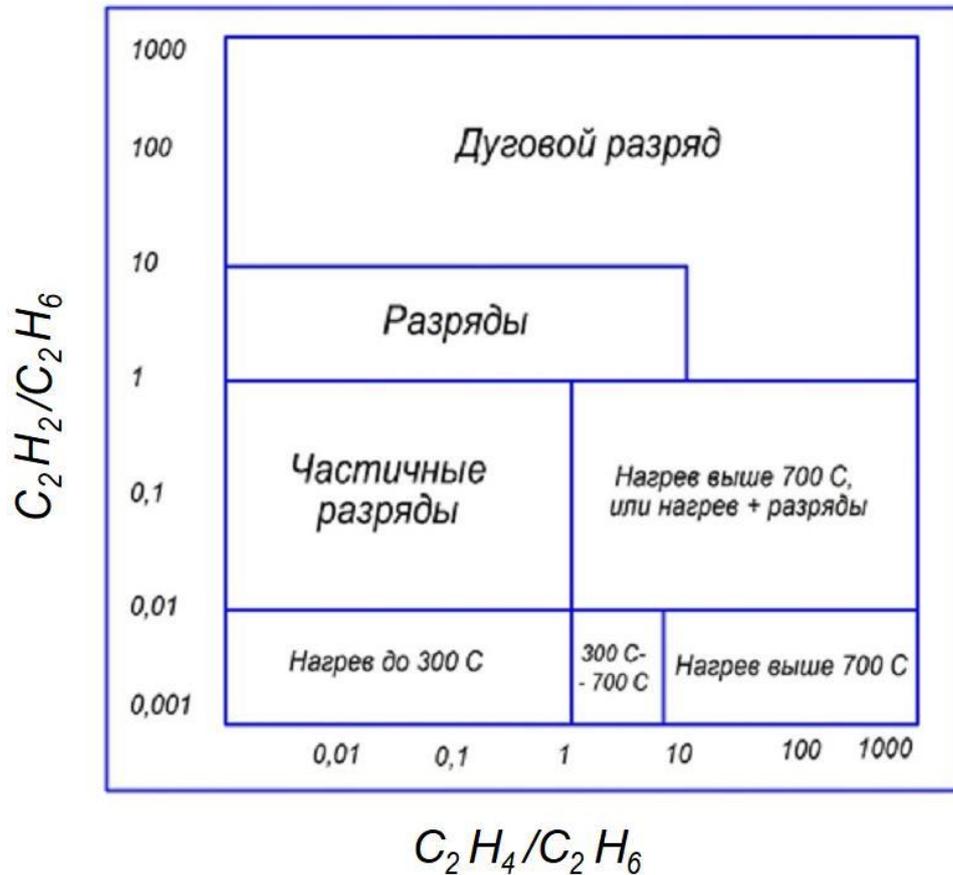


Рисунок 1.6 – Диагностический график по методу ETRA

Достоинством метода ETRA является удобное графическое представление вида развивающихся дефектов в зависимости от соотношения дефектных газов. Недостатком метода является то, что при отсутствии дефектного газа C_2H_2 возможно определить только один вид развивающегося дефекта [92, 95].

По результатам анализа для дальнейшего совершенствования и разработки математических моделей выделены следующие методы интерпретации ХАРГ: Роджерса, IEC 60599, ключевого газа, треугольник Дюваля. Данные методы выбраны, поскольку каждый из них предлагает уникальный подход к интерпретации данных о дефектах в силовых масляных трансформаторах:

- метод Роджерса основан на анализе соотношений концентраций растворённых газов и позволяет идентифицировать большое количество типов дефектов. Имеет простую схему кодирования на основе диапазонов.

- метод ИЕС 60599 предоставляет систематический подход для анализа газов, что способствует количественному рассмотрению возможных дефектов. Имеет четкие границы для определения состояний трансформаторов

- метод ключевого газа фокусируется на идентификации ключевых газов, связанных с определёнными типами аномальных явлений, что обеспечивает быстроту и простоту интерпретации одиночных дефектов.

- треугольник Дюваля используется для визуального представления соотношений газов, что позволяет легко различать типы дефектов и оценивать их развитие визуально.

Вместе эти методы охватывают широкий спектр возможных дефектов, развивающихся в трансформаторах, и предлагают разнообразные инструменты для их интерпретации.

1.8 Постановка цели и задач исследования

Анализ существующих методов хроматографического анализа растворенных газов в масле для оценки развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов позволил выявить, что существует несколько способов интерпретации данных ХАРГ, каждый из которых основывается на различных принципах и подходах. Например, методы Дорненбурга и Роджерса используют определенные концентрации ключевых газов и их соотношения, в то время как метод треугольника Дюваля опирается на графическое представление данных. Большинство методов диагностики основаны на эмпирических данных и практическом опыте, что приводит к вариативности результатов. Это требует осторожного применения и интерпретации полученных данных.

Однако в ходе анализа обнаружены следующие недостатки и ограничения в существующих методах, такие как недостаточная чувствительность к ранним стадиям дефектов, недостаточные критерии оценки пограничных значений концентраций растворенных газов, зависимость результатов от внешних факторов (температуры, влажности и др.), которые требуют дополнительного изучения и исследования. Решение данных проблем позволит повысить точность и надежность определения развивающихся дефектов по результатам ХАРГ. Поэтому требуется разработка новых и усовершенствование существующих методов интерпретации данных по ХАРГ.

Таким образом, целью диссертационной работы является повышение точности определения и анализа развивающихся дефектов силовых масляных трансформаторов систем электроснабжения.

Основные задачи исследования, соответствующие поставленной цели, определены следующим образом:

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

1.9 Выводы по главе 1

1. Показано, что диагностика на основе хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) представляет собой метод, опирающийся на измерении концентраций диагностических газов, их соотношений и сравнение с установленными граничными значениями. Процесс включает в себя отбор пробы масла, транспортировку в лабораторию, анализ и детальную интерпретацию результатов с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации оборудования.

2. Проведенный анализ методов интерпретации данных ХАРГ показал, что рассмотренные методы не всегда обеспечивают однозначные результаты и могут давать противоречивые выводы. Таким образом, требуется дальнейшее совершенствование методов интерпретации данных ХАРГ. При этом действующий нормативный документ в РФ – «Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле РД 153-34.0-46.302-00» не охватывает все параметры, которые необходимо контролировать, и интерпретирует только 40% дефектов.

3. По результатам анализа для дальнейшего совершенствования и разработки математических моделей выделены следующие методы интерпретации ХАРГ: Роджерса, ИЕС 60599, ключевого газа, треугольник Дюваля, т.к. эти методы основываются на различных подходах к интерпретации дефектов силовых масляных трансформаторах и охватывают широкий спектр развивающихся дефектов.

ГЛАВА 2 ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Прогресс в диагностике технического состояния силовых масляных трансформаторов, достигнутый благодаря ХАРГ, заключается в использовании методов математической статистики, таких как кластеризация, регрессионный анализ и многомерное шкалирование, для анализа диагностических данных. Данный подход позволяет эффективно решать ряд важных задач, включая формирование надежного образа дефекта, определение приемлемых и предельных значений концентраций растворенных газов [19], а также выявление и формализацию статистических зависимостей, важных для практики [23]. Несмотря на продвижения в этой области, принятие решений на основе распознавания состояний силовых масляных трансформаторов, включая данные ХАРГ, остается актуальной задачей, требующей новых подходов.

Сложность оценки технического состояния и риска отказов связана с большими интервалами между проведением измерений и недостаточным оснащением существующих силовых масляных трансформаторов системами мониторинга. Для решения этих задач, включая снижение неопределенности в оценке технического состояния, формирование базы знаний и повышение точности диагностики при ограниченных данных, необходимо развитие математических моделей, использующих экспертные оценки и принципы теории нечетких множеств. [14, 19, 27]. Этот подход позволяет учитывать малые объемы данных, субъективность оценок и неопределенность в определении граничных значений [1, 2, 11]. При этом альтернативные методы, такие как машинное обучение или байесовские модели, менее эффективны в условиях ограниченной информации и отсутствия регулярного мониторинга.

2.1 Определение структуры нечеткой математической модели силового масляного трансформатора для оценки технического состояния по результатам ХАРГ

Необходимость создания экспертных систем с применением методов нечеткой логики [49, 55] обусловлена реальными требованиями практики диагностики. Они позволяют учитывать не только количественные данные, но и качественные [9, 10, 24, 26], включая лингвистические параметры, такие как «удовлетворительное» или «критическое» состояние трансформатора. Такой подход дает возможность анализировать текущее состояние оборудования, опираясь на неполные или субъективные данные [55].

Также важно, что для настройки параметров моделей, основанных на нечеткой логике, применяются методы оптимизации, что позволяет объединить экспертные знания с аналитическими данными, полученными в ходе обучения моделей. Это дает возможность выявлять неоднозначные состояния силовых масляных трансформаторов, что в свою очередь улучшает точность оценки их состояния [45, 51, 54].

Таким образом, использование нечеткого вывода для оценки состояния силовых масляных трансформаторов является обоснованным и актуальным подходом. Наиболее широко используемые алгоритмы нечетких систем вывода [22, 52] показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные алгоритмы используемые в нечетких системах

Алгоритм	Сложность	Точность	Обработка данных	Эффективность
Мамдани	Средняя	Высокая	Лингвистические и числовые данные	Высокая
Такаги-Сугено	Высокая	Очень высокая	Числовые данные	Очень высокая

Продолжение таблицы 2.1

Алгоритм	Сложность	Точность	Обработка данных	Эффективность
Цукамото	Средняя	Средняя	Лингвистические данные	Средняя
Ларсен	Низкая	Низкая	Лингвистические данные	Низкая

Как отмечено в [29, 44, 63], наиболее эффективным считается алгоритм Мамдани, т.к. данный алгоритм имеет высокую точность и может обрабатывать как лингвистические, так и числовые данные.

В алгоритме Мамдани вывод на основе нечеткой логики выполняется с использованием нечеткой базы знаний:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j, \quad (2.1)$$

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; d_j – терм для выходной переменной y (например, определенный тип дефекта трансформатора, который система выявляет).

Математическое представление алгоритма Мамдани [17, 40, 44] показано в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Математическое представление алгоритма Мамдани

Описание формулы	Математическое выражение	Пояснение
Входная функция принадлежности	$a_{i,jp} = \int_{x_i}^{\bar{x}_i} \mu_{jp}(x_i) dx_i$	<p>Описывает степень принадлежности входного значения x_i к терму нечеткого множества $a_{i,jp}$.</p> <p>Например, если x_i — концентрация газа, функция принадлежности показывает значение, которое принадлежит заданному интервалу</p>
Выходная функция принадлежности	$d_j = \int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_{aj}(y) dy$	<p>Определяет степень принадлежности выходного значения y к нечеткому множеству, например, состояния трансформатора.</p>
Агрегирование нечетких правил	$\mu_{aj}(X^*) = \bigvee_{p=1,k_j} w_{jp} * \bigwedge_{i=1,n} [\mu_{jp}(X_i^*)]$	<p>Определяет, как объединяются различные правила для получения окончательного вывода</p>
Окончательное нечеткое множество y	$y = \frac{\mu_{d_1}(x^*)}{d_1} + \frac{\mu_{d_2}(x^*)}{d_2} + \dots + \frac{\mu_{d_m}(x^*)}{d_m}$	<p>Описывает нечеткое множество, полученное после применения всех правил</p>
Дефаззификация (четкий результат)	$y = \frac{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} y * \mu_y(y) dy}{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_{\bar{y}}(y) dy}$	<p>Преобразование нечеткого результата y в четкое значение (состояние трансформатора)</p>

Одной из важных задач при проектировании системы является выбор оптимального количества функций принадлежности, которые наиболее полно описывают рассматриваемый параметр. Для этого необходимо учитывать специфику задачи и необходимую точность моделирования. Следуя основным принципам построения нечеткой логической системы, рассмотрим ключевые этапы создания лингвистической модели силового масляного трансформатора для оценки его технического состояния на основе результатов ХАРГ [63].

На рисунке 2.1 представлена разработанная иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии и принятии решений по стратегии дальнейшей эксплуатации силового масляного трансформатора согласно алгоритму Мамдани [17, 31, 40]. Оценка технического состояния силового масляного трансформатора производится на множестве значений входных нечетких лингвистических переменных x_i ($i = \overline{1, n}$).

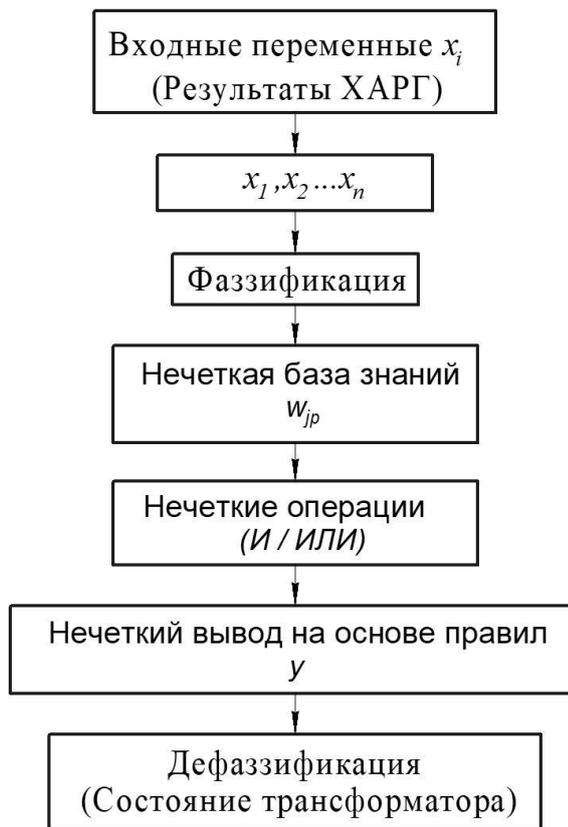


Рисунок 2.1 – Иерархическая структурная схема нечеткого логического вывода о техническом состоянии силового масляного трансформатора по результатам ХАРГ

В качестве примера ниже разработана и рассмотрена нечеткая диагностическая модель согласно методике, применяемой в РФ, основанной на стандарте РД 153-34.0-46.302-00 [41].

Информация о техническом состоянии силового масляного трансформатора, сгруппированная по видам измерений и испытаний, имеет следующую структуру математической модели по ХАРГ: $x_1, x_2 \dots x_n$ –

концентрации водорода (H_2), метана (CH_4), ацетилена (C_2H_2), этилена (C_2H_4), этана (C_2H_6), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2) соответственно.

Наиболее объективную оценку результатов диагностирования технического состояния на основе ХАРГ можно получить при представлении норм и результатов анализа в виде нечетких множеств [41]. Возможный диапазон изменения концентраций каждого из характерных газов при этом представляют нечетким множеством, состоящим из нескольких нечетких подмножеств. Функции принадлежности концентраций газов могут быть представлены в виде нечетких чисел и нечетких множеств.

В соответствии с таблицами 1.6 – 1.7 характерного состава газов [41], растворенных в масле, для различных дефектов силовых масляных трансформаторов, определяем 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 $Q_7 = \{L_7, M_7, H_7, VH_7\}$.

Концентрация каждого i -го газа представляется в виде лингвистической переменной Q_i , которая принимает лингвистические значения с терм-множествами: 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. Для лингвистической переменной Q_i ($i = \overline{1,7}$) ниже рассмотрены основные функции принадлежности, используемые в системах нечеткого вывода [56].

Треугольная функция принадлежности для трех параметров (a, b, c) имеет выражение в виде:

$$\mu(u) = \begin{cases} \frac{u-a}{b-a}, & a < u \leq b; \\ \frac{c-u}{c-b}, & b < u < c; \\ 0, & u \leq a \text{ или } u \geq c. \end{cases} \quad (2.8)$$

Графическое изображение треугольной функции принадлежности для лингвистической переменной Q_i ($i = \overline{1,7}$) показано на рисунке 2.2.

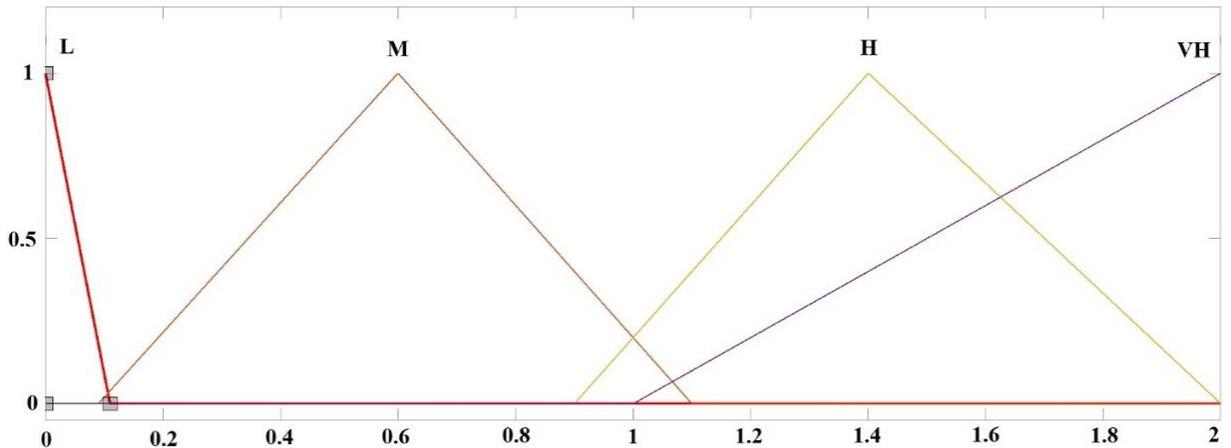


Рисунок 2.2 – Треугольная функция принадлежности для представления терм-множеств Q_i в виде нечетких множеств

Трапецевидная функция принадлежности для четырех параметров (a, b, c, d) имеет выражение в виде:

$$\mu(u) = \begin{cases} \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b; \\ 1, & b \leq u \leq c; \\ \frac{d-u}{d-c}, & c \leq u \leq d; \\ 0, & u \leq a \text{ или } u \geq d. \end{cases} \quad (2.9)$$

Графическое изображение трапецевидной функции принадлежности для лингвистической переменной Q_i ($i = \overline{1,7}$) показано на рисунке 2.3.

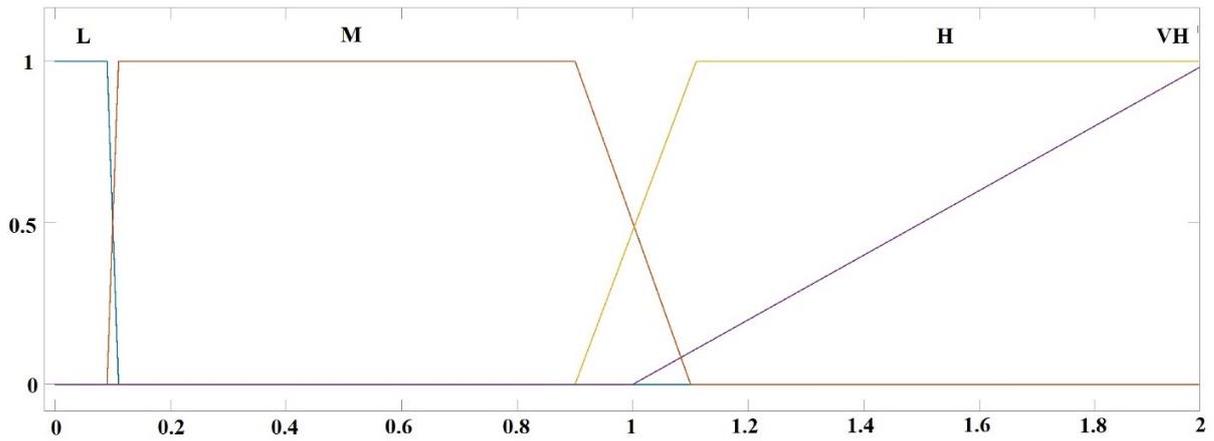


Рисунок 2.3 – Трапециевидная функция принадлежности для представления терм-множеств Q_i в виде нечетких множеств

Гауссова функция принадлежности для двух параметров (b , c) имеет выражение в виде:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right). \quad (2.10)$$

Графическое изображение гауссовой функции принадлежности для лингвистической переменной Q_i ($i = \overline{1,7}$) показано на рисунке 2.4.

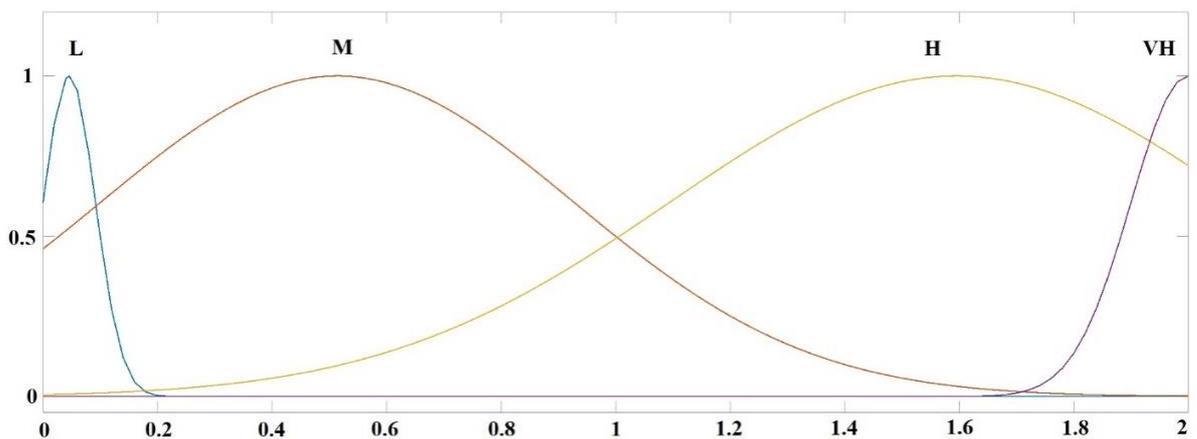


Рисунок 2.4 – Гауссова функция принадлежности для представления терм-множеств Q_i в виде нечетких множеств

Сигмоидная функция принадлежности для двух параметров (a , c) имеет выражение в виде:

$$\mu(u) = \frac{1}{1 + \exp(-a(u - c))}. \quad (2.11)$$

Графическое изображение сигмоидной функции принадлежности для лингвистической переменной Q_i ($i = \overline{1,7}$) показано на рисунке 2.5.

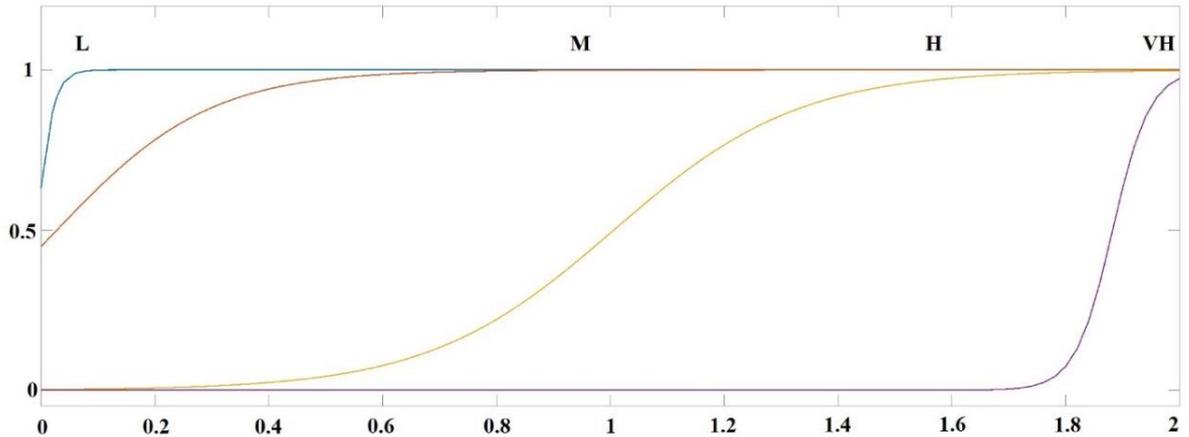


Рисунок 2.5 – Сигмоидная функция принадлежности для представления терм-множеств Q_i в виде нечетких множеств

Рассмотренные выше функции принадлежности будут применены в контексте исследования нечеткой модели в соответствии со стандартом РД 153-34.0-46.302-00 с целью определения наиболее точных функций принадлежности для диагностики технического состояния силовых масляных трансформаторов.

Идентификация вида и характера развивающихся дефектов [41] осуществляется с использованием критериев отношений концентраций пар растворенных газов. Диагностические критерии представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Диагностические критерии для определения дефектов по составу газов

Лингвистическая переменная	Состав газов									
	при электрическом разряде						при перегреве			
	дуговом		искровом		частичном		до 300 °С вкл.		300 – 700 °С	> 700 °С
	масло	бумага и масло	масло	бумага и масло	масло	бумага и масло	масло	бумага и масло	масло	масло
Q_1	VH_1	VH_1	VH_1	VH_1	VH_1	VH_1	Q_1	Q_1	Q_1	M_1
Q_2	H_2	H_2	M_2	M_2	M_2	M_2	H_2	H_2	H_2, M_2	H_2, M_2
Q_3	L_3	L_3	L_3	L_3	L_3	L_3	VH_3	VH_3	L_3	L_3
Q_4	H_4	H_4	M_4	M_4	L_4	L_4	M_4	M_4	VH_4	VH_4
Q_5	VH_5	VH_5	VH_5	VH_5	M_5	M_5	-	-	L_5	H_5, M_5
Q_6	L_6	H_6	L_6	M_6	L_6	M_6	L_6	H_6, M_6	L_6	L_6
Q_7	L_7	M_7	L_7	M_7	L_7	M_7	L_7	VH_7	L_7	L_7
Терм множества дефектов	$D_1^{(1)}$	$D_1^{(2)}$	$D_1^{(3)}$	$D_1^{(4)}$	$D_1^{(5)}$	$D_1^{(6)}$	$D_1^{(7)}$	$D_1^{(8)}$	$D_1^{(9)}$	$D_1^{(10)}$

Для построения нечеткой модели идентификации вида и характера дефекта используем соответствующие критерии, приведенные в таблице 2.3. Определим лингвистические переменные отношений концентраций пар газов Q_i ($i = \overline{8,12}$), их терм-множества и базовые формы функций принадлежности:

$$Q_8 = \{L_8, M_8, H_8\} \rightarrow \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad (2.12)$$

$$Q_9 = \{L_9, M_9, H_9\} \rightarrow \frac{CH_4}{H_2}, \quad (2.13)$$

$$Q_{10} = \{L_{10}, M_{10}, H_{10}\} \rightarrow \frac{C_2H_4}{C_2H_6}, \quad (2.14)$$

$$Q_{11} = \{L_{11}, M_{11}, H_{11}\} \rightarrow \frac{CO_2}{CO}, \quad (2.15)$$

$$Q_{12} = \{L_{12}, M_{12}, H_{12}\} \rightarrow CO. \quad (2.16)$$

Перечень терм-множеств лингвистических переменных отношений концентраций пар газов и терм-множеств дефектов для определения и прогнозирования вида и характера дефекта [41] приведен в таблицах 2.4 – 2.6.

Таблица 2.4 – Диагностические критерии и терм-множества для определения характера дефектов, развивающихся в силовом масляном 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 °С)	$D_7^{(3)}$
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)	$D_{10}^{(3)}$

Таблица 2.5 – Диагностические критерии и терм-множества для прогнозирования дефектов, развивающихся в силовом трансформаторе

Q_8	Q_9	Q_{10}	Вид дефекта	Терм-множества дефектов
M_8, H_8	H_9	-	Прогнозируется "разряд"	$D_1^{(2)}$
L_8	H_9	L_{12}	Прогнозируется перегрев масла	$D_2^{(2)}$
L_8	M_9, H_9	B_{12}	Прогнозируется перегрев твердой изоляции	$D_3^{(2)}$
M_8, H_8	H_9	-	Прогнозируется "перегрев" и "разряд"	$D_4^{(2)}$
L_8	L_9	-		

Необходимо выполнить условие, при котором следует учесть только такие отношения пар газов, в которых концентрация хотя бы одного из них была выше предельной концентрации.

По отношению $\frac{CO_2}{CO}$ дополнительно уточняется характер дефектов [41] (критерии приведены в таблице 2.6).

Таблица 2.6 – Критерии для уточнения характера дефекта

Q_{11}	Характер дефекта	Терм-множества дефектов
M_{11}	Нормальная работа	$D_1^{(4)}$
L_{11}, H_{11}	Повреждение твердой изоляции	$D_2^{(4)}, D_3^{(4)}$

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

Таким образом, использование стандартных математических методов для оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов может привести к неудовлетворительным результатам из-за сложности объектов и большого объема входных данных. Исследования показывают, что для решения данных задач наиболее подходят методы нечеткой логики и экспертные системы, основанные на знаниях. Это особенно важно при оценке технического состояния силовых масляных трансформаторов, где необходимо оперировать как числовыми, так и лингвистическими данными. В этом контексте использование нечеткого логического вывода, включая алгоритм Мамдани, представляется эффективным способом принятия решений в данной области.

2.2 Настройка нечеткой математической модели оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов по результатам ХАРГ

Настройка нечеткой модели проводится с целью определения функций принадлежности, которые будут использованы для диагностики технического состояния силовых масляных трансформаторов [43]. Для этого поочередно тестируются различные типы функций принадлежности: треугольная, трапециевидная, гауссова и сигмоидная. Данные функции позволяют отразить степень принадлежности входных данных (например, концентрации газов) к конкретным диагностическим категориям.

На основе таблиц, описывающих характерные составы газов (таблица 1.6 – 1.7) и диагностических критериев (таблица 2.4 – 2.6), были сформированы функции принадлежности для лингвистических переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$) (2.12 – 2.16), которые наглядно представлены на рисунках 2.6 – 2.9. Данные функции помогают преобразовать числовые данные в качественные оценки состояния трансформаторов, что является важным шагом в построении модели диагностики.

После тестирования различных функций принадлежности и сравнения их эффективности, будут выбраны те, которые обеспечивают наибольшую точность и стабильность при диагностике. Это позволит повысить эффективность работы системы и улучшить результаты оценки состояния силовых масляных трансформаторов. Выбор наиболее подходящих функций принадлежности играет ключевую роль в достижении высокой точности диагностики и снижении вероятности ошибочных решений [43].

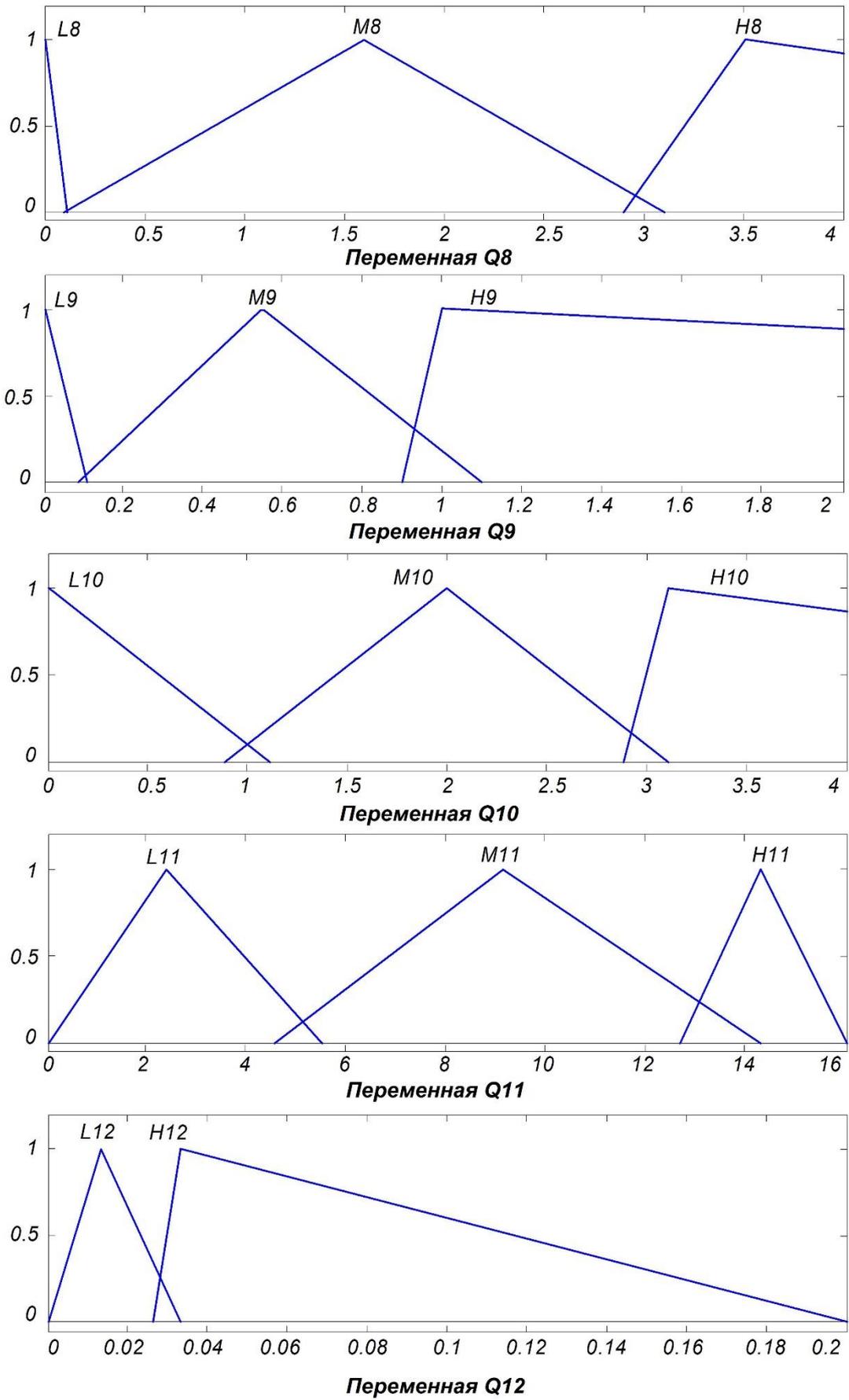


Рисунок 2.6 – Треугольные функции принадлежности для лингвистических переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$)

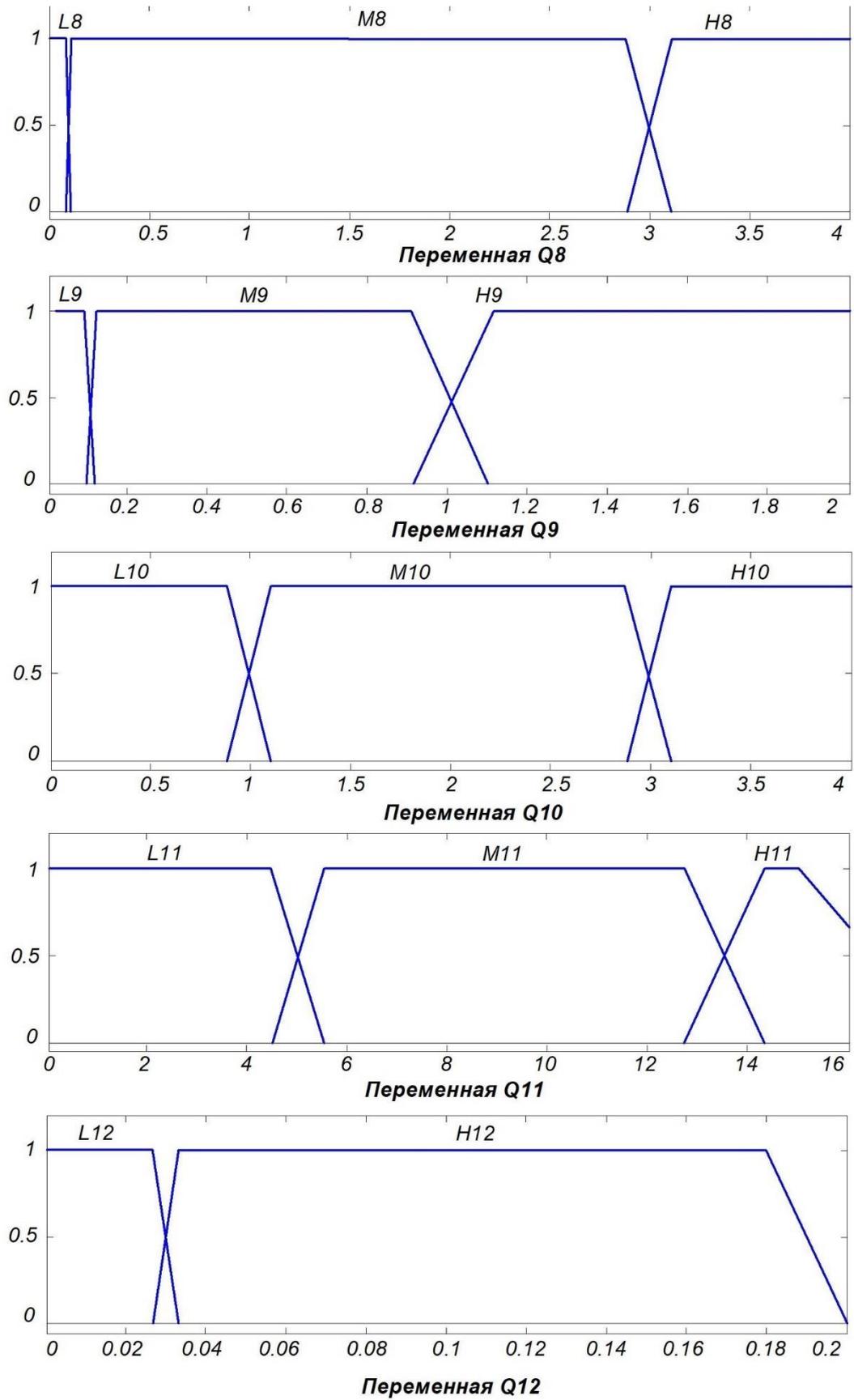


Рисунок 2.7 – Трапециевидные функции принадлежности для лингвистических переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$)

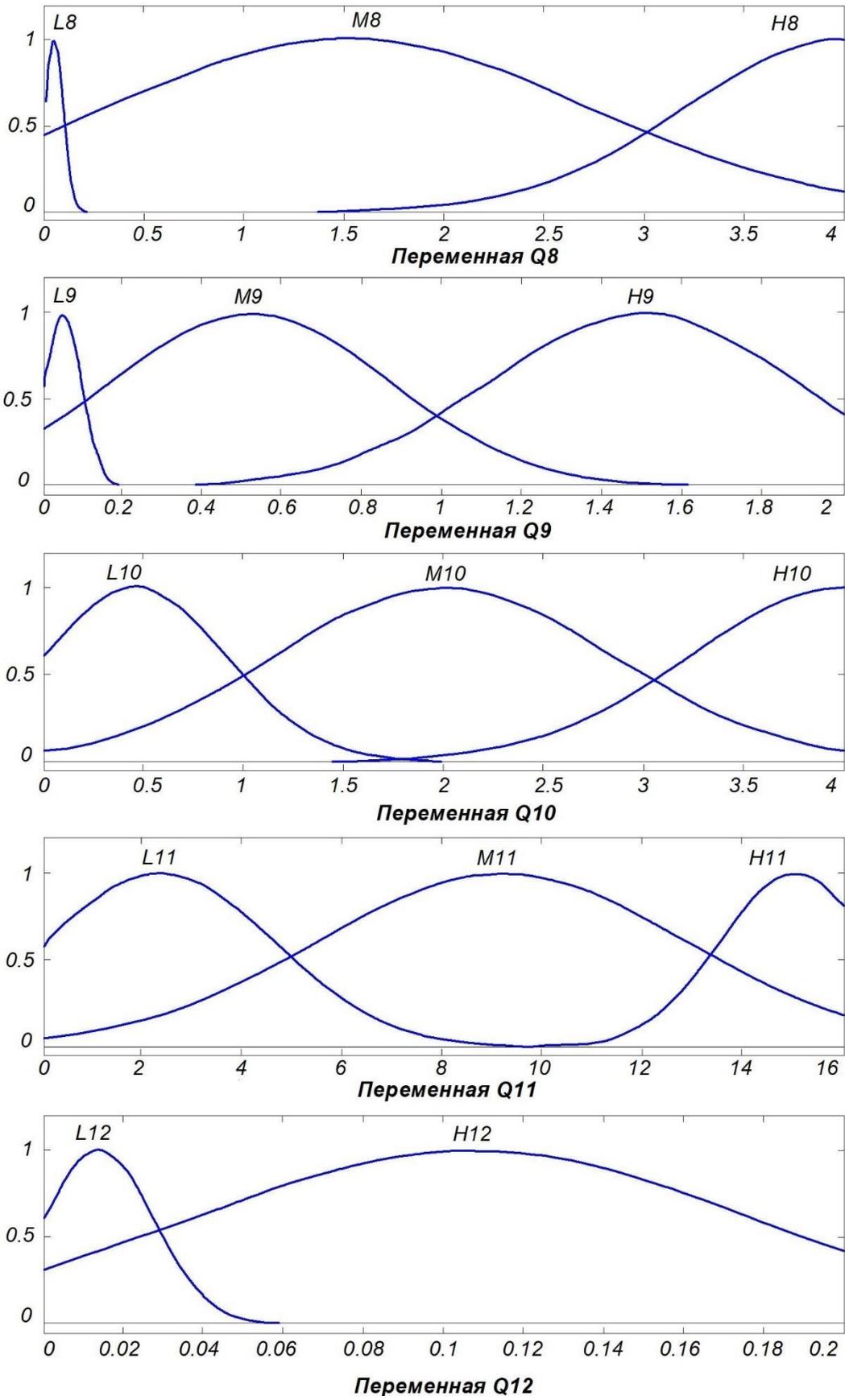


Рисунок 2.8 – Гауссовы функции принадлежности для лингвистических переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$)

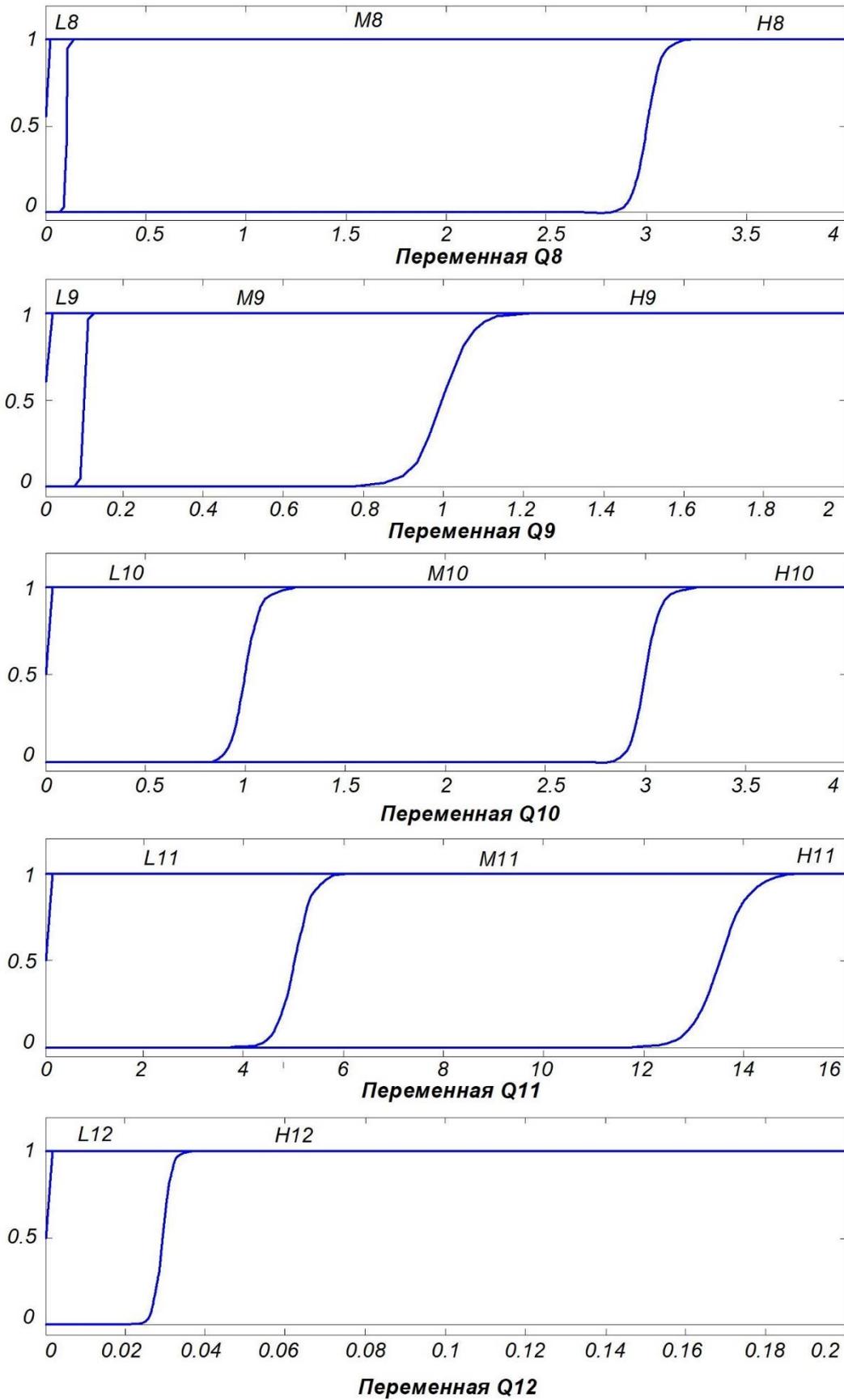


Рисунок 2.9 – Сигмоидные функции принадлежности для лингвистических переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$)

На следующем этапе формируется база лингвистических правил [93] для переменных Q_i ($i = \overline{8,12}$) в формате «ЕСЛИ-И-ТО», которые показаны на рисунках 2.10 – 2.12.

	Rule	Weight	Name
1	If Q8 is L8 and Q9 is M9 and Q10 is L10 then output1 is D1(3)	1	rule1
2	If Q8 is L8 and Q9 is L9 and Q10 is L10 then output1 is D2(3)	1	rule2
3	If Q8 is M8 and Q9 is L9 and Q10 is L10 then output1 is D3(3)	1	rule3
4	If Q8 is M8 and Q9 is M9 and Q10 is M10 then output1 is D4(3)	1	rule4
5	If Q8 is H8 and Q9 is M9 and Q10 is H10 then output1 is D4(3)	1	rule5
6	If Q8 is M8 and Q9 is M9 and Q10 is M10 then output1 is D5(3)	1	rule6
7	If Q8 is L8 and Q9 is M9 and Q10 is M10 then output1 is D6(3)	1	rule7
8	If Q8 is L8 and Q9 is H9 and Q10 is L10 then output1 is D7(3)	1	rule8
9	If Q8 is L8 and Q9 is H9 and Q10 is M10 then output1 is D8(3)	1	rule9
10	If Q8 is L8 and Q9 is H9 and Q10 is H10 then output1 is D9(3)	1	rule10

Рисунок 2.10 – Нечеткие правила для лингвистических переменных

Q_i ($i = \overline{8,12}$) терм множества $D_j^{(3)}$

	Rule	Weight	Name
1	If Q11 is M11 then output1 is D1(4)	1	rule1
2	If Q11 is L11 then output1 is D2(4)	1	rule2
3	If Q11 is H11 then output1 is D2(4)	1	rule3

Рисунок 2.11 – Нечеткие правила для лингвистических переменных

Q_i ($i = \overline{8,12}$) терм множества $D_j^{(4)}$

	Rule	Weight	Name
1	If Q8 is M8 and Q9 is H9 then output1 is D1(2)	1	rule1
2	If Q8 is H8 and Q9 is H9 then output1 is D1(2)	1	rule2
3	If Q8 is L8 and Q9 is H9 and Q12 is L12 then output1 is D2(2)	1	rule3
4	If Q8 is L8 and Q9 is M9 and Q12 is H12 then output1 is D3(2)	1	rule4
5	If Q8 is L8 and Q9 is H9 and Q12 is H12 then output1 is D3(2)	1	rule5
6	If Q8 is M8 and Q9 is H9 then output1 is D4(2)	1	rule6
7	If Q8 is H8 and Q9 is H9 then output1 is D4(2)	1	rule7
8	If Q8 is L8 and Q9 is L9 then output1 is D4(2)	1	rule8

Рисунок 2.12 – Нечеткие правила для лингвистических переменных

Q_i ($i = \overline{8,10}$) терм множества $D_j^{(2)}$

После того как все нечеткие правила изложены, нечеткая модель готова к тестированию. Для анализа и тестирования были отобраны сорок образцов масла из баков дефектных двухобмоточных и трехобмоточных силовых трансформаторов мощностью 16-40 МВА напряжением 110 кВ [7] и отправлены в лабораторию для определения соотношения растворенных в масле газов, включая водород, метан, этан, этилен, ацетилен, оксид углерода и диоксид углерода. Образцы результатов ХАРГ силовых трансформаторов рассматриваются как исходные данные для модели. Тестовая выборка дефектных трансформаторов показана в таблице 2.7. После анализа результатов, были выделены ключевые закономерности распределения газов, характерные для различных типов дефектов.

Таблица 2.7 – Образцы результатов ХАРГ дефектных силовых масляных трансформаторов

№ образца масла	Тип трансформатора	Концентрации газов, ppm						
		CH ₄	H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
1.	ТДТН-16000/110	7	5	6	0.01	0.001	153	6607
2.		49	25	69	10	0.01	117	2524
3.		65	40	87	12	0.01	95	4187
4.		38	379	7	46	198	56	2582
5.		2	10	5	2	0.0001	123	2663
6.		2	12	3	1	0.0001	91	1654
7.	ТДТН-25000/110	3	11	2	3	0.001	77	1175
8.		7	14	1	61	0.001	24	1042
9.		4	13	1	44	0.001	1051	5835
10.		0.001	7	0.0001	28	0.001	731	2333
11.		0.01	6	0.001	8	0.001	356	2373
12.		44	144	12	118	583	195	2034
13.		4	0.002	1	25	0.002	342	1304

Продолжение таблицы 2.7

№ образца масла	Тип трансформатора	Концентрации газов, ppm						
		CH ₄	H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
14.	ТДТН-40000/110	4	0.001	1	25	0.001	407	1454
15.		4	2	5	3	0.001	152	1905
16.		5	13	3	4	3	145	682
17.		2	11	2	2	0.001	514	5345
18.		0.1	1	0.1	13	0.01	423	2437
19.		27	10	49	4	0.01	195	3942
20.		0.002	0.001	0.01	6	0.001	153	2284
21.		0.001	12	0.01	26	0.002	212	1941
22.		0.001	0.01	0.01	2	0.001	143	1312
23.		0.01	22	8	1	0.001	162	1131
24.		0.01	3	0.001	1	0.001	63	1155
25.		0.01	0.1	0.001	1	0.001	124	1306
26.		0.01	0.01	0.001	0.01	0.001	236	2697
27.		ТРДН-25000/110	0.01	8	0.001	13	0.001	264
28.	2		0.01	0.0001	12	0.001	223	2125
29.	3		2	1	14	0.001	164	1062
30.	4		0.1	1	8	0.001	65	683
31.	2		7	1	1	0.001	392	3026
32.	8		40	2	1	0.001	255	1887
33.	ТРДН-40000/110	11	0.001	4	3	0.001	213	1862
34.		0.01	0.01	1	1	0.001	154	1096
35.		109	789	11	156	873	38	823
36.		90	647	10	129	638	32	733
37.		31	10	89	7	0.001	42	856
38.		9	190	25	3	0.01	66	743
39.		8	199	20	3	0.01	153	4292
40.		8	149	17	3	0.01	128	2338

После введения данных в нечеткую модель и получения результатов требуется провести анализ с целью выбора функций принадлежности. Данные функции должны наилучшим образом отражать дефектное состояние силового масляного трансформатора, приближая его к фактическому. Результаты сравнения нечеткой модели с использованием четырёх различных функций принадлежности с фактическим состоянием трансформаторов представлены в таблицах 2.8 – 2.9.

Таблица 2.8 – Результаты исследования для терм множества $D_j^{(3)}$ (характер развивающихся дефектов)

№ образца масла	Фактическое состояние	Тип предполагаемого дефекта согласно функции:			
		Треугольной	Трапециевидной	Гауссовой	Сигмоидной
1.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Не определен
2.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Не определен
3.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Не определен
4.	Дуга	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Не определен
5.	ЧР	Норма	Норма	Норма	Не определен
6.	ЧР	Норма	Норма	Норма	Не определен
7.	Термический дефект	Термический дефект (<150 °С)	Термический дефект (<150 °С)	Не определен	Не определен
8.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
9.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
10.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
11.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
12.	Дуга	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Не определен

Продолжение таблицы 2.8

№ образца масла	Фактическое состояние	Тип предполагаемого дефекта согласно функции:			
		Треугольной	Трапециевидной	Гауссовой	Сигмоидной
13.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
14.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
15.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °C)	Термический дефект (150-300 °C)	Не определен	Не определен
16.	Дуга	Разряды малой мощности	Разряды большой мощности	Не определен	Не определен
17.	Термический дефект	Термический дефект (<150 °C)	Термический дефект (<150 °C)	Не определен	Не определен
18.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
19.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °C)	Термический дефект (150-300 °C)	Термический дефект (150-300 °C)	Не определен
20.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
21.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
22.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
23.	ЧР	ЧР с низкой энергии	ЧР с низкой энергии	Не определен	Не определен
24.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
25.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
26.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
27.	Дуга	Не определен	Не определен	Не определен	Не определен
28.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
29.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен
30.	Термический дефект	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Термический дефект (> 700°C)	Не определен

Продолжение таблицы 2.8

№ образца масла	Фактическое состояние	Тип предполагаемого дефекта согласно функции:			
		Треугольной	Трапециевидной	Гауссовой	Сигмоидной
31.	Термический дефект	Термический дефект (<150 °С)	Термический дефект (<150 °С)	Не определен	Не определен
32.	ЧР	Норма	Норма	Норма	Не определен
33.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Не определен	Не определен
34.	Термический дефект	Термический дефект (<150 °С)	Термический дефект (300-700 °С)	Не определен	Не определен
35.	Дуга	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Не определен
36.	Дуга	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности	Не определен
37.	Термический дефект	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Термический дефект (150-300 °С)	Не определен
38.	ЧР	ЧР с низкой энергии	ЧР с низкой энергии	Не определен	Не определен
39.	ЧР	ЧР с низкой энергии	ЧР с низкой энергии	Не определен	Не определен
40.	ЧР	ЧР с низкой энергии	ЧР с низкой энергии	Не определен	Не определен

Из таблицы 2.8 видно, 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, т.е. гауссова и сигмоидная функции принадлежности показали неудовлетворительный результат расчета характерных дефектов.

Для дополнительного уточнения состояния твердой изоляции, используется отношение $\frac{CO_2}{CO}$, в таблице 2.9 показан результат исследования для терм – множества $D_j^{(4)}$, с целью выбора функции принадлежности.

Таблица 2.9 – Результат исследования для терм – множества $D_j^{(4)}$ (состояние твердой изоляции)

№ образца масла	Состояние твердой изоляции согласно функции:			
	Треугольной	Трапециевидной	Гауссовой	Сигмоидной
1.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
2.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
3.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
4.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
5.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
6.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
7.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
8.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
9.	Норма	Норма	Не определено	Не определено
10.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
11.	Норма	Норма	Норма	Не определено
12.	Норма	Норма	Норма	Не определено
13.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
14.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
15.	Норма	Норма	Не определено	Не определено
16.	Повреждена	Повреждена	Не определено	Не определено
17.	Норма	Норма	Норма	Не определено
18.	Норма	Норма	Не определено	Не определено
19.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
20.	Повреждена	Повреждена	Не определено	Не определено
21.	Норма	Норма	Норма	Не определено
22.	Норма	Норма	Норма	Не определено
23.	Норма	Норма	Норма	Не определено
24.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
25.	Норма	Норма	Норма	Не определено
26.	Норма	Норма	Норма	Не определено
27.	Норма	Норма	Норма	Не определено
28.	Норма	Норма	Норма	Не определено

Продолжение таблицы 2.9

№ образца масла	Состояние твердой изоляции согласно функции:			
	Треугольной	Трапецевидной	Гауссовой	Сигмоидной
29.	Норма	Норма	Норма	Не определено
30.	Норма	Норма	Норма	Не определено
31.	Норма	Норма	Норма	Не определено
32.	Норма	Норма	Норма	Не определено
33.	Норма	Норма	Норма	Не определено
34.	Норма	Норма	Норма	Не определено
35.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
36.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
37.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
38.	Норма	Норма	Норма	Не определено
39.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено
40.	Повреждена	Повреждена	Повреждена	Не определено

Из таблицы 2.9 видно, что применение треугольной и трапецевидной функций принадлежности позволяет выявить 40 характерных дефектов из 40, в то время как гауссова функция принадлежности позволила выявить 35 характерных дефектов из 40, а сигмоидная - 0 характерных дефектов из 40.

В результате исследования, основанного на разработке нечеткой модели в соответствии со стандартом РД 153-34.0-46.302-00 и последующего использования треугольной, трапецевидной, гауссовой и сигмоидной функций принадлежности, экспериментально подтверждено, что наиболее точными функциями для создания нечетких моделей определения технического состояния силовых масляных трансформаторов являются треугольная и трапецевидная функции принадлежности. Дальнейшее применение этих функций принадлежности будет осуществлено при разработке математических моделей, описанных в следующей главе.

2.3 Выводы по главе 2

1. Установлено, что использование стандартных математических методов для оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов может привести к неудовлетворительным результатам из-за сложности объектов и большого объема входных данных. Это подчеркивает необходимость применения более гибких методов, которые способны учитывать как количественные, так и качественные характеристики.

2. Показано, что для решения задач оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов наиболее подходят методы нечеткой логики и экспертные системы, основанные на знаниях. Эти методы позволяют учитывать лингвистические параметры и неопределенности, что особенно важно при оценке технического состояния трансформаторов. В этом контексте использование нечеткого логического вывода, включая алгоритм Мамдани, представляется эффективным способом принятия решений в данной области.

3. В результате исследования, основанного на разработке нечеткой модели в соответствии со стандартом РД 153-34.0-46.302-00 и последующего использования треугольной, трапециевидной, гауссовой и сигмоидной функций принадлежности, показано, что наиболее точными методами реализации (функциями) для создания нечетких моделей определения технического состояния силовых масляных трансформаторов являются треугольная и трапециевидная функции принадлежности.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКИХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОВ ХАРГ ДЛЯ ПРЕВЕНТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На сегодняшний день методы интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) в масле силовых трансформаторов, такие как метод Роджерса, метод ключевого газа и другие, составляют основу диагностического анализа различных типов неисправностей оборудования. Данные методы входят в ряд международных и национальных стандартов по хроматографическому анализу растворенных газов [41, 65, 86]. Проведенные исследования за прошлые годы и недавние разработки подчеркивают актуальность перехода от интерпретации результатов ХАРГ на основе традиционных моделей, основанных на профессиональном мнении экспертов, к цифровым прогностическим моделям на основе методов нечетких множеств и нечеткой логики [20, 39, 57, 88, 98, 103, 106].

Целью исследования данной главы является разработка нечетких моделей для диагностической оценки силовых масляных трансформаторов на основе ХАРГ, а также верификация полученного инструментария на основе сравнения с фактическими результатами.

Для разработки нечетких моделей использовались критерии интерпретации дефектов, определенные следующими методами: Роджерса, ИЕС 60599 и ключевого газа. Данные методы были выбраны из-за их широкого охвата типов и видов дефектов, что подтверждено анализом, представленным в главе 1. Кроме того, была разработана нечеткая модель для определения остаточного ресурса бумажной изоляции на основе стандарта FIST 3-31 [66]. Данный стандарт был выбран из-за его более точной дифференциации дефектов изоляции, что придает ему преимущество перед отечественными стандартами РД 153-34.0-46.302-00 [41], в котором повреждение твердой изоляции определяется как дополнительное уточнение и СТО 34.01-23.1-001-

2017 [47], в котором пороговое значение фурановых включений ограничиваются значением 4 ppm.

3.1 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу Роджерса

3.1.1 Разработка нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу Роджерса в пакете Fuzzy logic программного комплекса MATLAB

Хроматографический анализ растворенных газов в масле является чувствительным и надежным методом диагностики развивающихся и потенциальных дефектов силовых масляных трансформаторов. С помощью данного метода можно выявить дефекты в большом разнообразии маслonaполненного оборудования [82]. В таблице 3.1 перечислены и сгруппированы типы дефектов по методу Роджерса [5] для разработки модели нечеткой логики.

Таблица 3.1 – Группирование дефектов по методу Роджерса

Термический дефект (ТД)	Перегрев и искрение (П)	Дугообразование (Д)	Частичные и коронные разряды (ЧР)	Норма
Небольшой перегрев <150°C	Перегрев проводников	Искрение	Частичные разряды	Норма
Перегрев 150°C-200°C	Циркуляционный ток в обмотках	Дуга	Частичные разряды с отслеживанием	-
Перегрев 200°C-300°C	Циркуляционный ток в магнитопроводе	Непрерывное искрообразование	-	-

Метод Роджерса основывается на использовании четырех соотношений газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ и $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. Диагностика дефектов осуществляется с помощью простой схемы кодирования, основанной на

диапазонах отношений, приведенных в [104]. В таблицах 3.2 и 3.3 указаны соотношения газов и переменных Fuzzy logic, а также диапазоны отношений, используемые для разработки модели нечеткой логики.

Таблица 3.2 – Соотношение газов и переменных Fuzzy logic

Соотношения газов	Переменная Fuzzy logic
CH_4/H_2	i
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	j
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	k
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	l

Таблица 3.3 – Соотношение концентраций газовых коэффициентов и кодов

Переменная Fuzzy logic	Значение	Код дефекта
i	$x < 0.1$	5
	$0.1 < x < 1.0$	0
	$1.0 < x < 3.0$	1
	$x > 3.0$	2
j	$x < 1.0$	0
	$x > 1.0$	1
k	$x < 1.0$	0
	$1.0 < x < 3.0$	1
	$x > 3.0$	2
l	$x < 0.1$	0
	$0.1 < x < 3.0$	1
	$x > 3.0$	2

Для разработки модели нечеткой логики был задействован пакет Fuzzy logic в программном комплексе MATLAB. Процесс нечеткого анализа включает три основные фазы: фаззификацию, нечеткий вывод и

дефаззификацию. Фаззификация представляет собой процесс преобразования точных входных значений в степени принадлежности лингвистическим терминам нечетких множеств. Для этого используется функция принадлежности, которая оценивает степень принадлежности каждому лингвистическому термину. Выбранная система нечеткого вывода (FIS) отвечает за выводы на основе базового набора нечетких правил лингвистических утверждений "ЕСЛИ-ТО". Типы дефектов, перечисленные в таблице 3.4, формируют базовый набор нечетких лингвистических правил для системы диагностики. Дефаззификация выполняет обратное преобразование нечетких выходных значений в точные выходные действия [109].

Таблица 3.4 – Соотношение переменных и предполагаемых дефектов по методу Роджерса

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	Дефект	Классификация
1-2	0	0	0	Небольшой перегрев <150°C	ТД_1
1-2	1	0	0	Перегрев 150°C- 200°C	ТД_2
0	1	0	0	Перегрев 200°C- 300°C	ТД_3
0	0	1	0	Перегрев проводников	П_1
1	0	1	0	Циркуляционный ток в обмотках	П_2
1	0	2	0	Циркуляционный ток в магнитопроводе	П_3
0	0	0	1	Искрение	Д_1
0	0	1-2	1-2	Дуга	Д_2
0	0	2	2	Непрерывное искрообразование	Д_3
5	0	0	0	Частичные разряды	ЧР_1
5	0	0	1-2	Частичные разряды с отслеживанием	ЧР_2
0	0	0	0	Норма	Норма

Границы принадлежности для переменных i (CH_4/H_2), j ($\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$), k ($\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$) и l ($\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$) указанные в таблице 3.3, представлены входными трапециевидными нечеткими функциями принадлежности, которые показаны на рисунке 3.1.

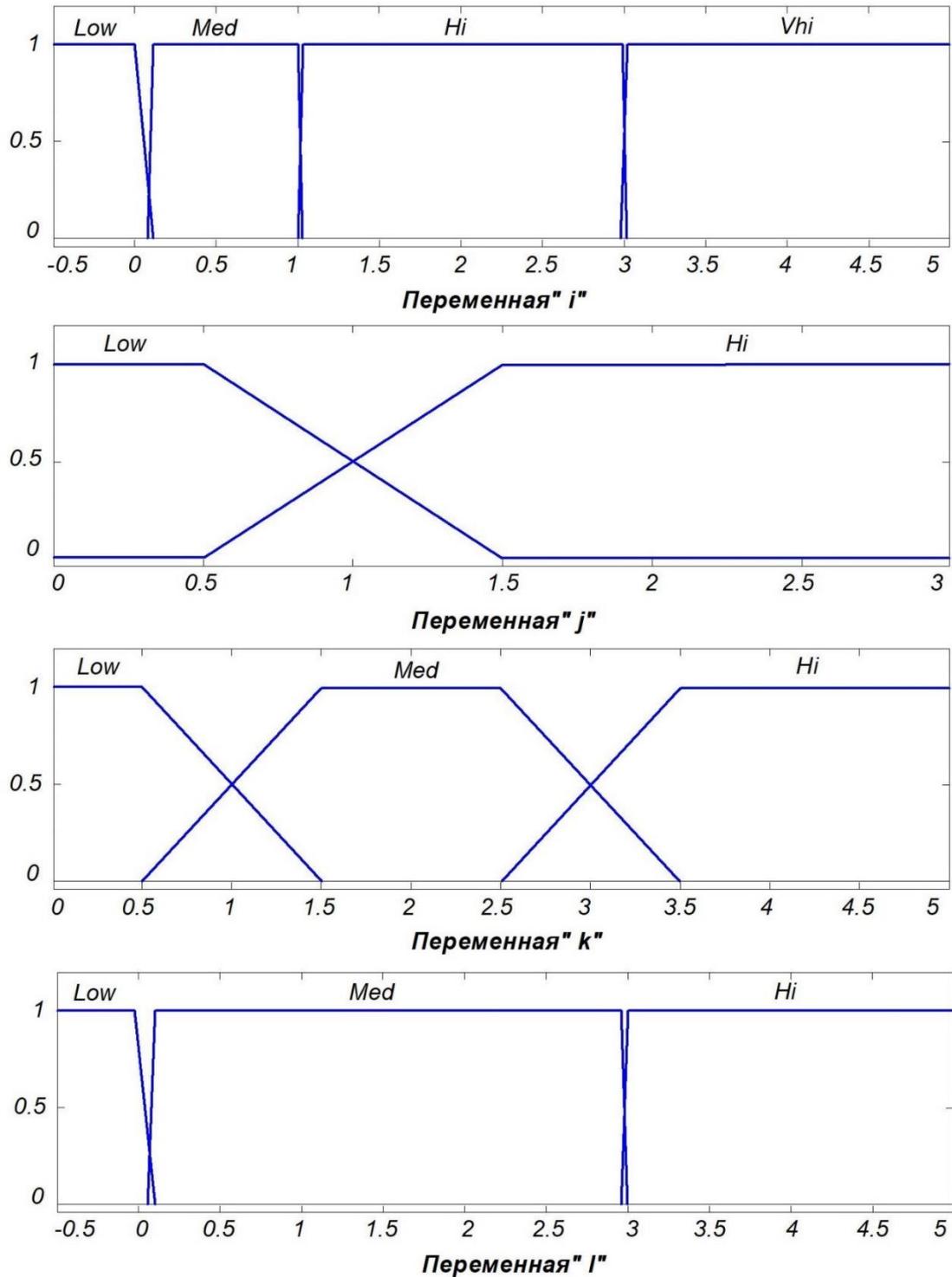


Рисунок 3.1 – Входные функции принадлежности для переменных i , j , k и l соответственно

Нечеткий вывод использует систему правил «ЕСЛИ-ТО», основанную на правилах «ЕСЛИ» антецедент и «ТО» консеквент. Нечеткий набор правил затем используется для формирования суждения о нечетких входных данных, полученных из четырех газовых отношений. Для анализа нечеткой системы вывода разработано 18 нечетких правил. Ниже приведено два примера нечетких правил, основанных на типах дефектов, перечисленных в таблице 3.4 [5]:

Правило 1: «ЕСЛИ» коэффициент I «высокий» «И» коэффициент j «низкий» «И» коэффициент k «низкий» «И» коэффициент l «низкий», «ТО» Дефект определяется как «ТД_1».

Правило 6: «ЕСЛИ» коэффициент I «средний» «И» коэффициент j «низкий» «И» коэффициент k «средний» «И» коэффициент l «низкий», «ТО» Дефект определяется как «П_1».

Хотя нечеткие правила могут казаться строго определенными, в случае газовых отношений, находящихся на границе или близко к границе между лингвистическими значениями, возникают пограничные ситуации. Эти ситуации позволяют нечеткой системе вывода, представленной редактором FIS, гибко интерпретировать принадлежность к данным правилам и классифицировать эти случаи с учетом двух различных типов неисправностей, каждый из которых имеет свою индивидуальную вероятность возникновения. [67].

Редактор FIS включает в себя операции между входными и выходными нечеткими множествами, как показано графически на рисунке 3.2. Он основан на нечетком выводе, описанном ранее.

Как показано на рисунке 3.2, каждое правило представлено набором графиков, при этом каждый столбец соответствует определенной переменной. Первые четыре столбца графиков (желтого цвета) демонстрируют функции принадлежности, на которые ссылается антецедент или часть "ЕСЛИ" каждого правила. Пятый столбец графиков (синего цвета) отображает функции

принадлежности, на которые ссылается консеквент или часть "ТО" каждого правила.

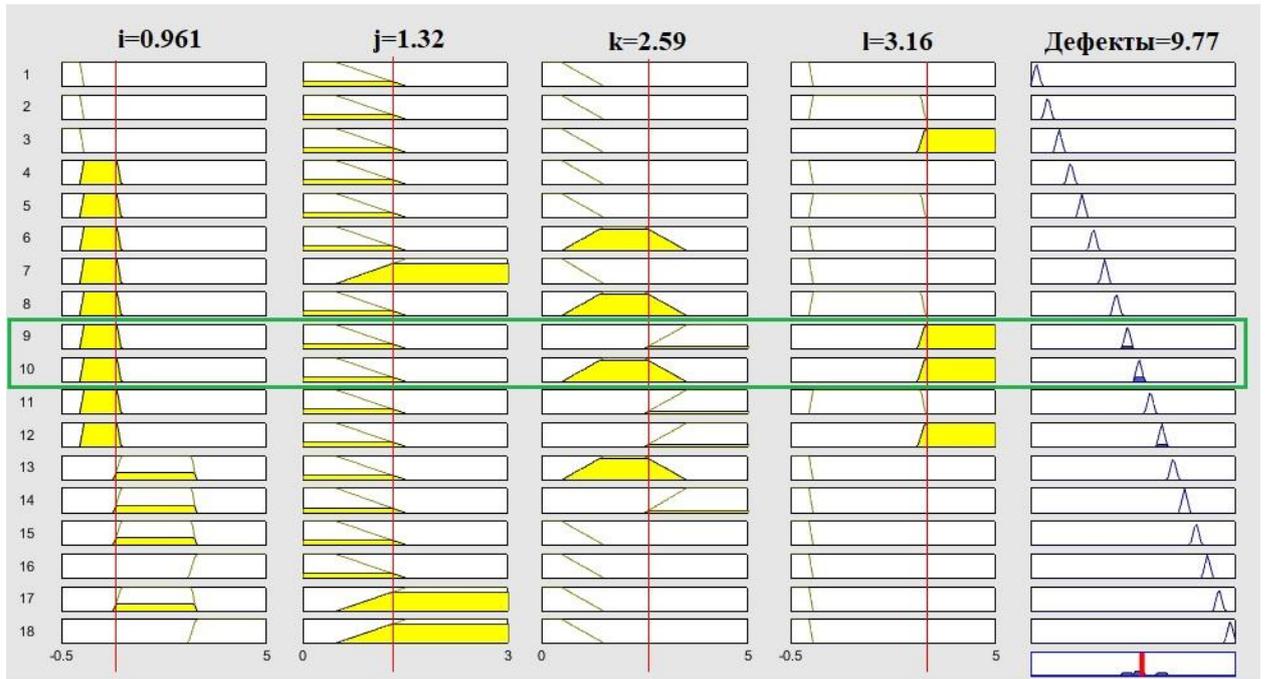


Рисунок 3.2 – Входные и выходные данные разрабатываемой нечеткой модели

Разработанная модель, основанная на методе Роджерса и применяющая нечеткую логику, способна выявлять пограничные случаи газовых отношений, находящиеся вблизи границы или на самой границе между лингвистическими значениями. Это позволяет нечеткой системе вывода, реализованной через редактор FIS, гибко интерпретировать принадлежность к данным правилам и классифицировать такие случаи по двум различным типам неисправностей с индивидуальной вероятностью возникновения. Данное свойство модели иллюстрируется на рисунке 3.2 (строки 9 и 10 выделены зеленым; в строке 10 индивидуальная вероятность возникновения дефекта выше, чем в строке 9).

3.1.2 Апробация разработанной модели и интерпретация результатов

Для оценки эффективности разработанной модели ХАРГ с использованием метода Роджерса на основе нечеткой логики и классификации

типов дефектов силовых трансформаторов выбрано пятнадцать образцов масла из резервуаров двухобмоточных силовых трансформаторов мощностью 16-25 МВА и напряжением 110 кВ. Подробные характеристики этих образцов представлены в таблице 3.5 [5].

Таблица 3.5 – Образцы результатов ХАРГ силовых масляных двухобмоточных трансформаторов

№ образца масла	Тип трансформатора	Концентрации газов, ppm				
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	ТДН-16000/110	201	702	251	743	1,2
2		57	62	74	33	30
3		34	27	8	5.5	0.4
4		173	206	47.9	75.5	68.4
5		70.6	69.4	28.7	241.5	10.3
6		342	112.4	27.7	51.7	58.9
7		173	334.5	171	812.7	37.9
8		2586.9	7.9	4.8	1.6	0.1
9	ТДН-25000/110	1679	653	81	1006	419.5
10		206.4	199	74.3	612.6	15.6
11		180.4	175.3	75.2	50.8	4.1
12		106.2	24.1	4.4	28.2	37.1
13		180.9	0.58	0.24	0.19	0.1
14		27.1	90.2	24.1	63.1	0.22
15		138.9	52.3	6.8	62.9	9.6

После ввода данных в интерфейс разработанной модели производится диагностика дефектов согласно нечетким правилам, охватывающим все типы дефектов, перечисленные в таблице 3.4. Разработанная модель, основанная на нечеткой логике, успешно выявляет определенные типы дефектов силовых масляных трансформаторов.

В таблице 3.6 представлены фактически обнаруженные дефекты, выявленные в процессе ремонта, а также результаты применения

оригинального метода Роджерса и результаты применения нечеткой логики для каждого образца масла с использованием метода Роджерса [5].

Таблица 3.6 – Результаты верификации дефектов

№ 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
4		Дугообразование	Дефект не определен	Перегрев и искрение
5		Перегрев и искрение	Дефект не определен	Перегрев и искрение
6		Дугообразование	Дугообразование	Дугообразование
7		Перегрев и искрение	Перегрев и искрение	Перегрев и искрение
8		Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды	Частичные и коронные разряды
9	ТДН-25000/110	Дугообразование	Дугообразование	Дугообразование
10		Перегрев и искрение	Дефект не определен	Перегрев и искрение
11		Термический дефект при низкой температуре	Норма	Норма
12		Дугообразование	Дугообразование	Дугообразование
13		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

Из таблицы 3.6 видно, что разработанная модель ХАРГ по методу Роджерса на основе нечеткой логики дает правильную интерпретацию в 12 образцах масла из 15 (5 столбец, выделено зеленым цветом), в то время как оригинальный метод Роджерса дает верную интерпретацию только в 8 образцах из 15 (4 столбец, выделено зеленым цветом). Таким образом, точность разработанной модели составляет 80% при верификации с

фактическими дефектами силовых масляных трансформаторов. Однако в образцах № 2, 4, 11 метод Роджерса с использованием нечеткой логики не соответствовал реальной неисправности. Причины данных отклонений требуют дополнительного исследования.

3.2 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа

Модель нечеткой логики для метода ключевого газа разработана с использованием программного комплекса MATLAB и пакета Fuzzy logic [89, 90].

Для создания модели нечеткой логики по методу ключевого газа использованы следующие входные переменные: концентрации – H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO . Выходной переменной в разрабатываемой модели на основе алгоритма Мамдани является состояние силового масляного трансформатора, которое описано следующими дефектам: термический дефект в масле (ТД_в_масле), термический дефект в бумажной изоляции (ТД_в_бумаге), частичные разряды (ЧР), дугообразование (Дуга) [65].

Графические изображения входных и выходной трапециевидных функций принадлежности (согласно таблице 1.5) для нечеткой модели по методу ключевого газа приведены на рисунке 3.3

Система нечеткого вывода и набор нечетких лингвистических утверждений «ЕСЛИ-И-ТО» используются для формирования представления о нечетких входных данных, полученных на основе значений концентрации H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO . Для анализа нечеткой системы вывода разработано 23 нечетких правила, исходя из количества входных и выходных функций принадлежности, которые показаны на рисунке 3.4.

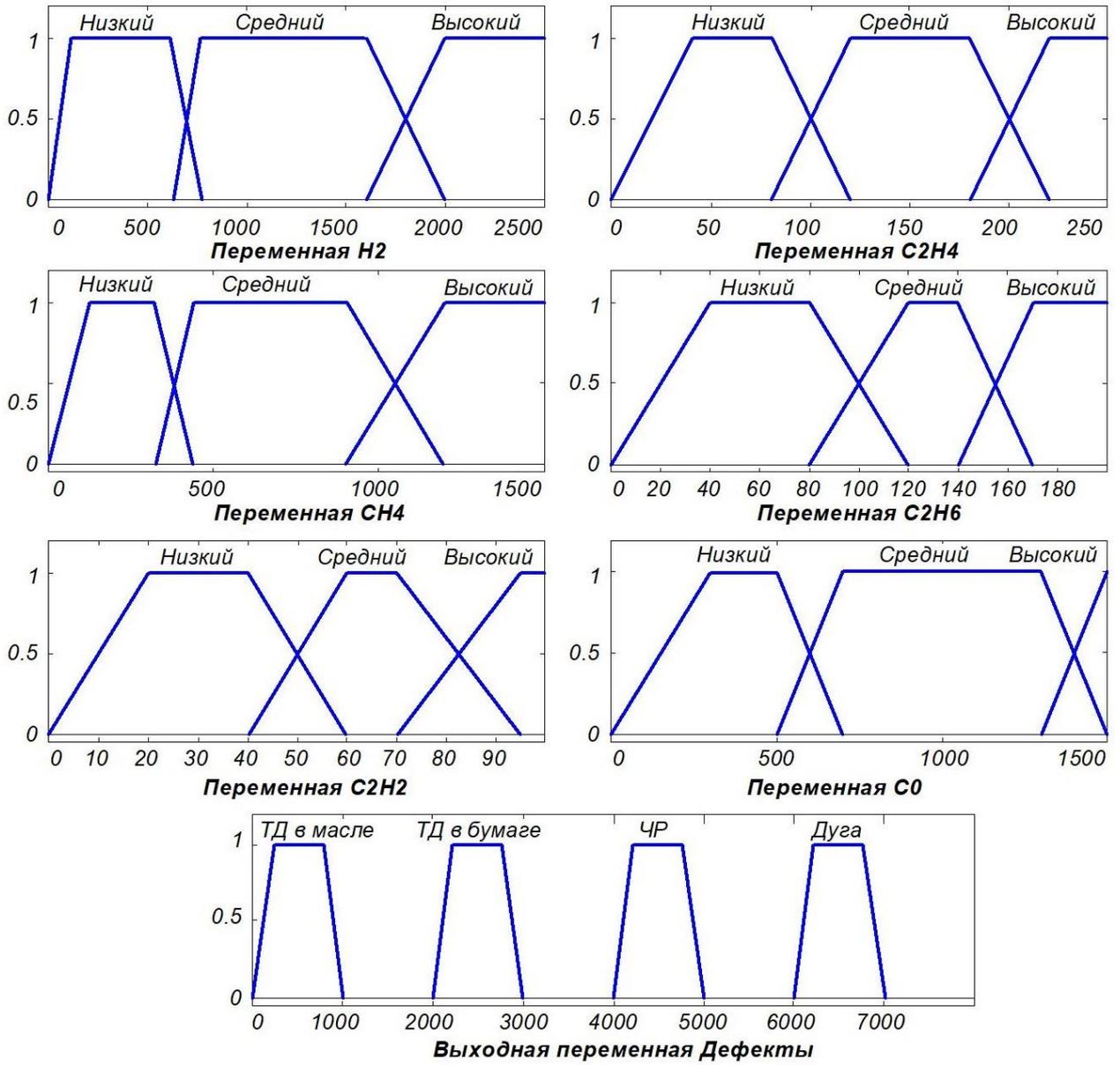


Рисунок 3.3 – Входные и выходная функции принадлежности

	Rule
1	If H2 is Низкий and CH4 is Средний and C2H4 is Высокий and C2H6 is Средний then Ошибки is ТД_в_масле
2	If CO is Высокий then Ошибки is ТД_в_Бумаре
3	If H2 is Высокий and CH4 is Средний and C2H4 is Низкий and C2H6 is Низкий then Ошибки is ЧР
4	If H2 is Высокий and CH4 is Средний and C2H2 is Средний and C2H4 is Низкий and C2H6 is Низкий then Ошибки is Дуга
5	If H2 is Высокий then Ошибки is ЧР
6	If CO is Средний then Ошибки is ТД_в_Бумаре
7	If C2H2 is Высокий then Ошибки is Дуга
8	If C2H4 is Высокий then Ошибки is ТД_в_масле
9	If CH4 is Высокий and C2H6 is Высокий then Ошибки is ТД_в_масле
10	If CH4 is Высокий and C2H6 is Средний then Ошибки is ТД_в_масле
11	If CH4 is Высокий and C2H6 is Низкий then Ошибки is ТД_в_масле
12	If CH4 is Средний and C2H6 is Высокий then Ошибки is ТД_в_масле
13	If CH4 is Низкий and C2H6 is Высокий then Ошибки is ТД_в_масле
14	If H2 is Средний and CO is Средний then Ошибки is Дуга
15	If H2 is Высокий and CO is Высокий then Ошибки is Дуга
16	If H2 is Средний and CO is Высокий then Ошибки is Дуга
17	If C2H4 is Низкий and CO is Средний then Ошибки is ТД_в_Бумаре
18	If C2H4 is Средний and CO is Высокий then Ошибки is ТД_в_Бумаре
19	If C2H4 is Средний and CO is Средний then Ошибки is ТД_в_Бумаре
20	If C2H4 is Высокий and CO is Средний then Ошибки is ТД_в_Бумаре
21	If H2 is Средний and CH4 is Средний and C2H4 is Средний and C2H6 is Средний and CO is Средний then Ошибки is ТД_в_Бумаре
22	If H2 is Высокий and CH4 is Низкий and C2H4 is Низкий and C2H6 is Низкий then Ошибки is ЧР
23	If H2 is Высокий and CH4 is Низкий then Ошибки is ЧР

Рисунок 3.4 – База правил нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа

В качестве примера, ниже рассмотрены 2 нечетких правила из 23, для которых разрабатывалась нечеткая модель [68, 91].

Правило 1. *«ЕСЛИ» концентрация водорода находится в пределах показателя «Низкий» «И» концентрация метана находится в пределах «Средний» «И» концентрация этилена находится в пределах «Высокий» «И» концентрация этана находится в пределах «Средний», «ТО» дефект определяется как «Тепловой дефект в масле».*

Правило 6. *«ЕСЛИ» концентрация монооксида углерода находится в пределах показателя «Высокий», «ТО» дефект определяется как «Тепловой дефект в бумажной изоляции».*

Для проверки работоспособности нечеткой модели проведено тестирование на основе отобранных проб трансформаторного масла с силового трансформатора ТДН-40000/110-У2 (зав. № 27184, год выпуска 2021)

со следующими значениями входных данных: H_2 – 34 ppm, CH_4 – 27 ppm, C_2H_6 – 8 ppm, C_2H_4 – 5,5 ppm, C_2H_2 – 0,4 ppm, CO – 27 ppm [108].

Выходные данные модели, как показано на рисунке 3.5 (7 столбец, в строках не найдено совпадений по приведенным правилам) не выявили развивающихся дефектов в представленном образце масла.

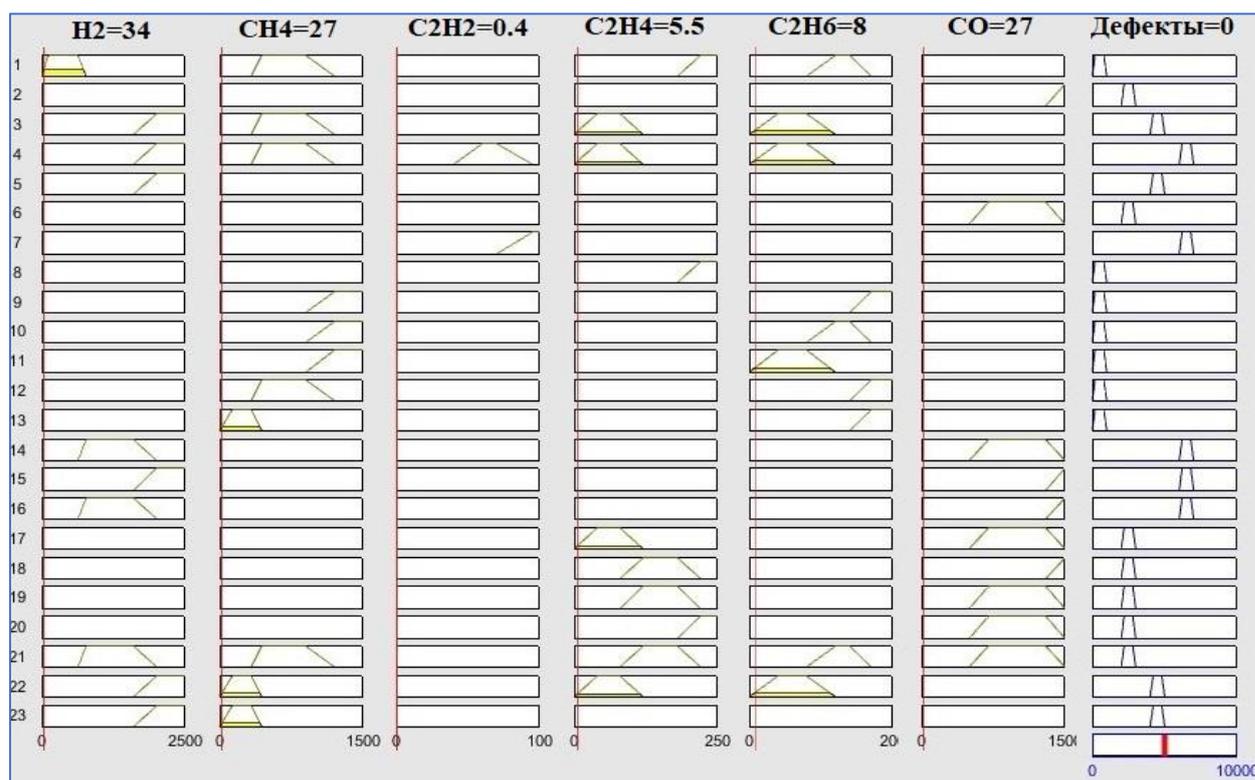


Рисунок 3.5 – Выходные данные нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа

Для проведения данного исследования использовались образцы трансформаторного масла, полученные из трансформатора без выявленных дефектов, который был недавно введен в эксплуатацию. Результаты исследования, сопоставленные с текущим состоянием трансформатора и основанные на методе анализа ключевых газов с применением нечеткой логики, демонстрируют равенство, т.е. трансформатор является бездефектным.

3.3 Нечеткая модель определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599

3.3.1 Разработка нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599 в пакете Fuzzy logic программного комплекса MATLAB

Рассматриваемый метод ИЕС 60599 использует следующие соотношения газов: CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 и C_2H_2/C_2H_4 . Пределы отношений показаны в таблице 3.7 и имеют диапазон от 0 до 3, представленный универсальным множеством U [69, 80].

Таблица 3.7 – Пределы отношений по методу ИЕС 60599

Терм-множество	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Диапазон	$U < 0,1$	$0,1 \leq U \leq 1$	$1 \leq U \leq 3$	$U > 3$

В данном методе были использованы входные треугольные функции принадлежности для построения нечеткой модели. Этот выбор обусловлен наличием четких диапазонов входных термов множеств, таких как "низкий", "средний", "высокий" и "очень высокий", что обеспечивает легкую интерпретацию результата. Входные треугольные функции принадлежности для переменных CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 и C_2H_2/C_2H_4 , использованные в нечеткой модели, представлены на рисунке 3.6.

На рисунке 3.7 показано, как сформирована выходная функция принадлежности, представляющая собой возможные дефекты трансформатора и их коды, указанные в таблице 3.8 [99], в соответствии с интерпретацией по методу ИЕС 60599.

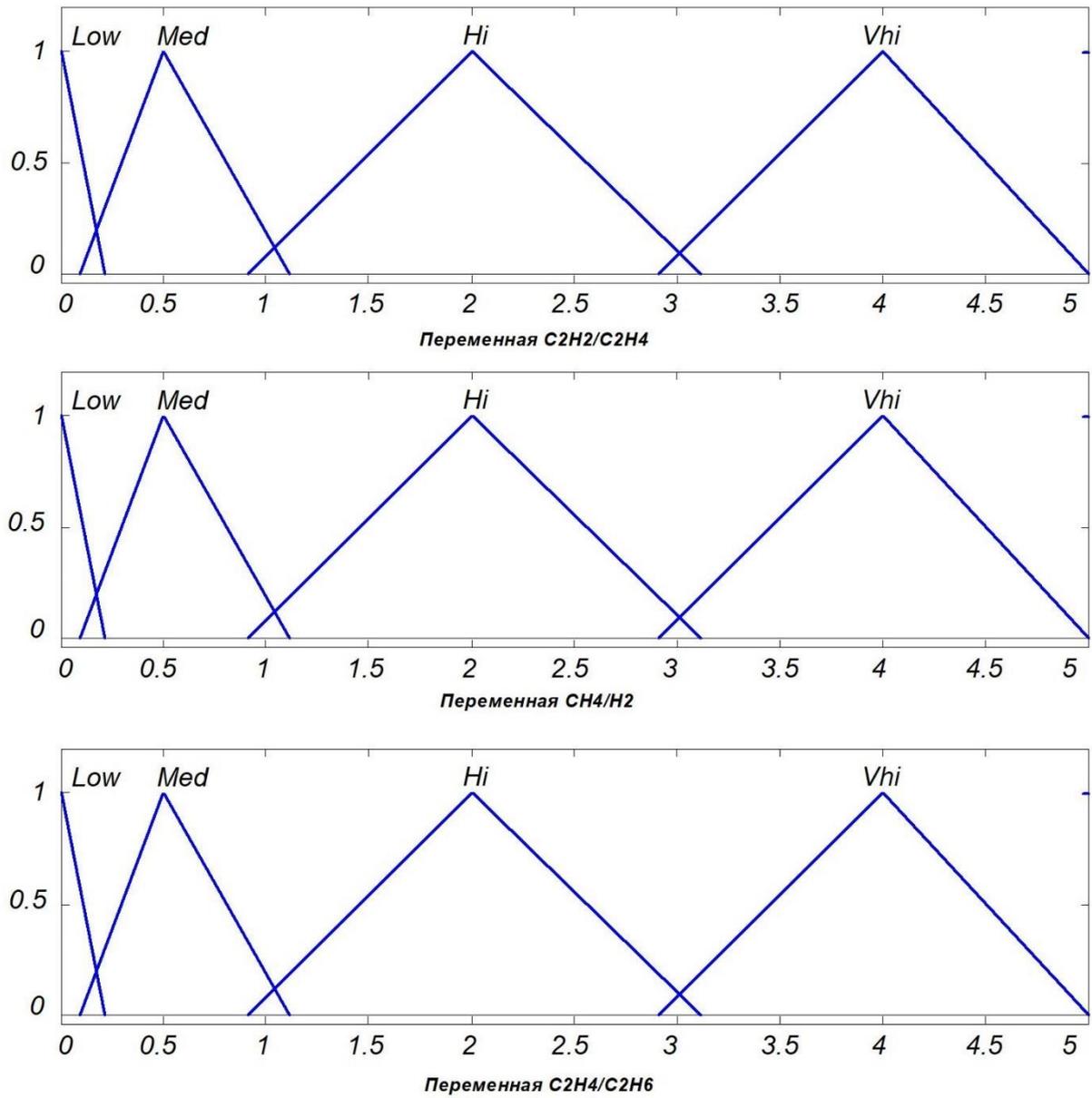


Рисунок 3.6 – Входные треугольные функции принадлежности для переменных, C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 и C_2H_4/C_2H_6

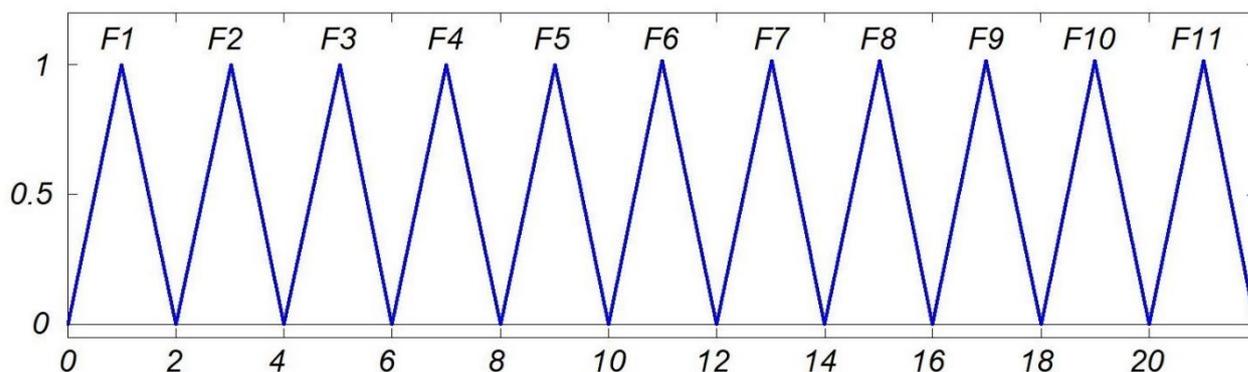


Рисунок 3.7 – Выходная функция принадлежности

Таблица 3.8 – Интерпретация возможных дефектов по методу ИЕС 60599

Выходной код	Интерпретация дефектов по методу ИЕС 60599
1	F1: ЧР низкой плотности энергии
3	F2: ЧР высокой плотности энергии
5	F3: Разряды малой мощности
7	F4: Разряды большой мощности
9	F5: Термический дефект ($T < 150 \text{ }^\circ\text{C}$)
11	F6: Термический дефект ($150 < T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$)
13	F7: Термический дефект ($300 < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$)
15	F8: Термический дефект ($T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$)
21	F11: Нормальное состояние

В рассматриваемом случае нечеткий вывод представлен двумя компонентами: antecedentes (IF) и следствием (THEN). Правила нечеткого вывода, основанные на интерпретации дефектов силовых масляных трансформаторов представлены на рисунке 3.8.

	Rule
1	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is low then Code is F11
2	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is med then Code is F11
3	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is low then Code is F1
4	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is med then Code is F1
5	If C2H2/C2H4 is med and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is low then Code is F2
6	If C2H2/C2H4 is med and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is med then Code is F2
7	If C2H2/C2H4 is hi and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is low then Code is F2
8	If C2H2/C2H4 is hi and CH4/H2 is low and C2H4/C2H6 is med then Code is F2
9	If C2H2/C2H4 is med and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is hi then Code is F3
10	If C2H2/C2H4 is med and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F3
11	If C2H2/C2H4 is hi and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is hi then Code is F3
12	If C2H2/C2H4 is hi and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F3
13	If C2H2/C2H4 is vhi and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is hi then Code is F3
14	If C2H2/C2H4 is vhi and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F3
15	If C2H2/C2H4 is med and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F4
16	If C2H2/C2H4 is hi and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F4
17	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is hi then Code is F5
18	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is low then Code is F6
19	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is med then Code is F6
20	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is vhi and C2H4/C2H6 is low then Code is F6
21	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is vhi and C2H4/C2H6 is med then Code is F6
22	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is hi then Code is F7
23	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is vhi and C2H4/C2H6 is hi then Code is F7
24	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F8
25	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is vhi and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F8
26	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is low then Code is F9
27	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is med then Code is F9
28	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is hi and C2H4/C2H6 is med then Code is F10
29	If C2H2/C2H4 is low and CH4/H2 is med and C2H4/C2H6 is low then Code is F11
30	If C2H2/C2H4 is vhi and CH4/H2 is vhi and C2H4/C2H6 is vhi then Code is F11

Рисунок 3.8 – Правила нечеткого вывода для модели по методу ИЕС 60599

Выходные данные модели, полученные с использованием алгоритма Мамдани, которые показаны на рисунке 3.9, представляют собой набор нечетких правил, которые связывают входные и выходные переменные в методе интерпретации ИЕС 60599. В данном методе логическая операция "AND" заменяется оператором минимизации, который учитывает наименьшее

значение из всех активных правил, а логическая операция "OR" заменяется оператором максимизации, который выбирает наибольшее значение из всех активных правил.

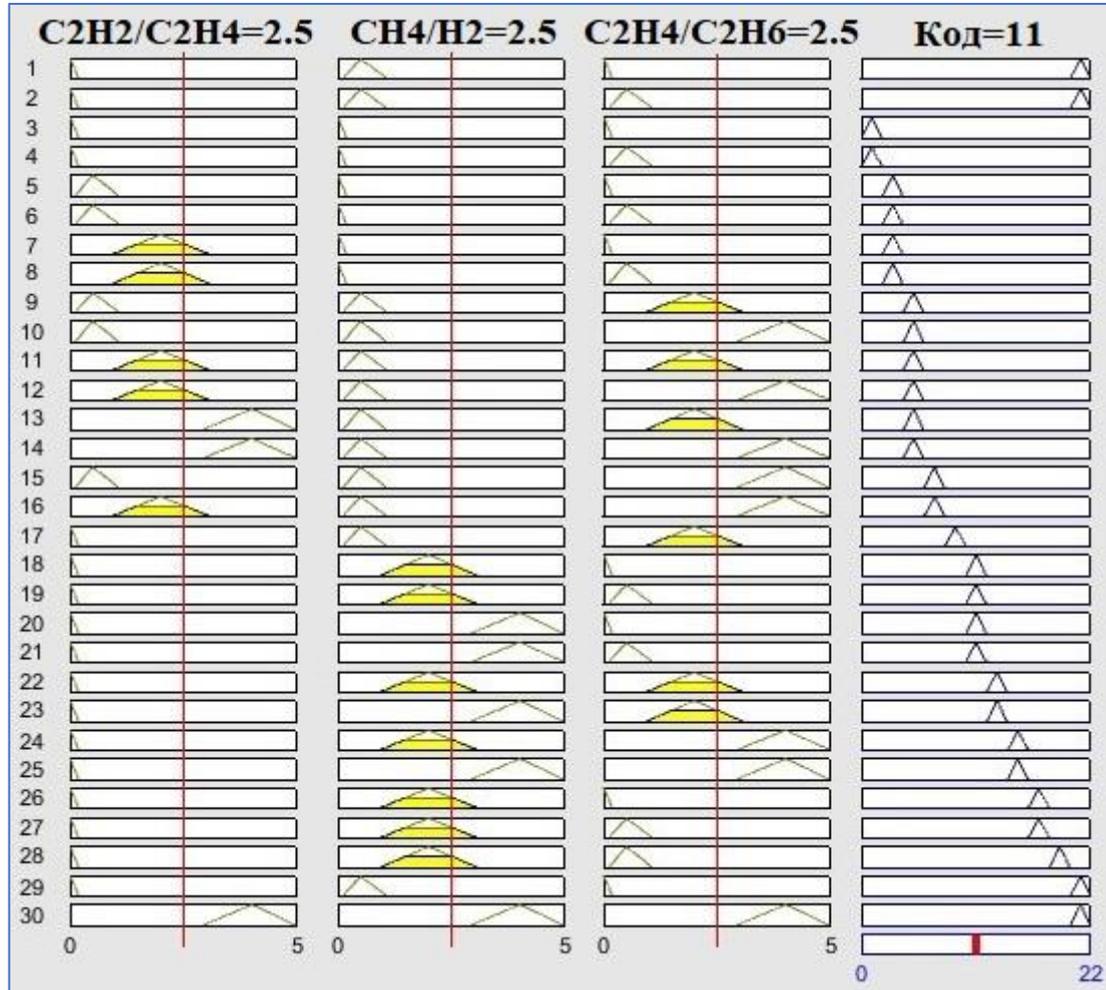


Рисунок 3.9 – Выходные данные нечеткой модели определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599

Разработанный набор нечетких правил может быть визуализирован на трехмерных поверхностных графиках, представленных на рисунке 3.10, которые отображают зависимость между входными и выходными переменными. Графики позволяют наглядно представить влияние различных комбинаций входных переменных на выходные значения.

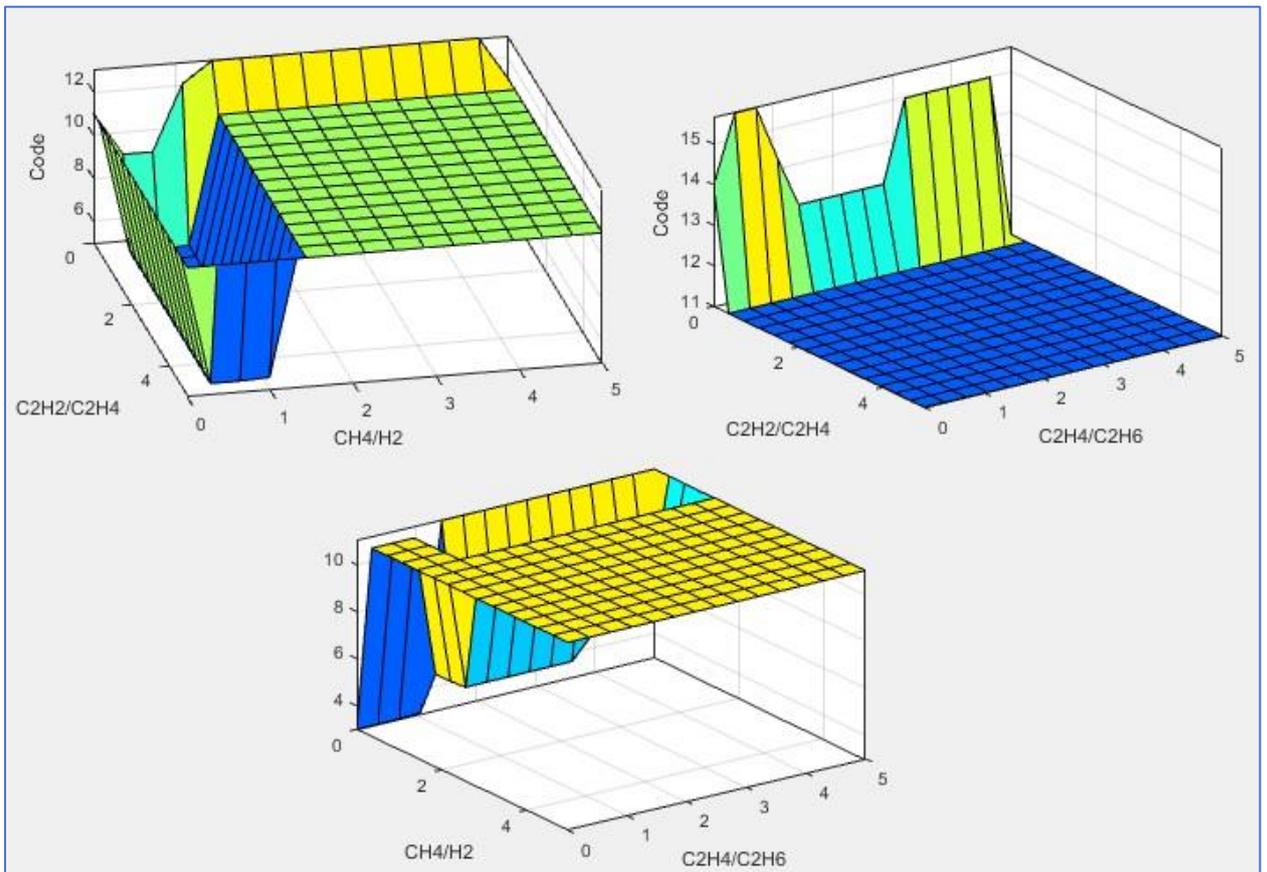


Рисунок 3.10 – Трехмерные поверхностные графики для метода ИЕС 60599

3.3.2 Апробация разработанной модели и интерпретация результатов

Для оценки эффективности разработанной модели ХАРГ с использованием метода ИЕС 60599 на основе нечеткой логики проведена верификация с пятнадцатью образцами масла из резервуаров двухобмоточных силовых масляных трансформаторов мощностью 16-25 МВА и напряжением 110 кВ, ранее использовавшимися для верификации модели по методу Роджерса и показанными в таблице 3.5.

В таблице 3.9 представлены фактически обнаруженные дефекты, выявленные в процессе ремонта, а также результаты применения оригинального метода ИЕС 60599 и результаты применения нечеткого моделирования по методу ИЕС 60599.

Таблица 3.9 – Результаты верификации дефектов

№ 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 ($300 < T < 700$ °С)	Термический дефект ($300 < T < 700$ °С)
2		Частичные и коронные разряды	Термический дефект ($150 < T < 300$ °С)	Дефект не определен
3		Норма	Термический дефект ($150 < T < 300$ °С)	Норма
4		Дугообразование	Дефект не определен	Дефект не определен
5		Перегрев и искрение	Дефект не определен	Термический дефект ($T > 700$ °С)
6		Дугообразование	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности
7		Перегрев и искрение	Термический дефект ($T > 700$ °С)	Термический дефект ($300 < T < 700$ °С)
8		Частичные и коронные разряды	Дефект не определен	ЧР низкой плотности энергии
9		Дугообразование	Дефект не определен	Разряды малой мощности
10	ТДН-25000/110	Перегрев и искрение	Дефект не определен	Термический дефект ($T > 700$ °С)
11		Термический дефект при низкой температуре	Термический дефект ($150 < T < 300$ °С)	Термический дефект ($T > 700$ °С)
12		Дугообразование	Разряды малой мощности	Разряды малой мощности
13		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

Из таблицы 3.9 видно, что разработанная модель ХАРГ по методу ИЕС 60599 на основе нечеткой логики дает правильную интерпретацию в 13

образцах масла из 15 (5 столбец, выделено зеленым цветом), в то время как оригинальный метод ИЕС 60599 верно интерпретирует только 6 образцов из 15 (4 столбец, выделено зеленым цветом). Таким образом, точность разработанной модели составляет 86,6 % при верификации с фактическими дефектами силовых масляных трансформаторов ТДН-16000/110 и ТДН-25000/110.

3.4 Модель нечеткой логики для определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов

Надежность и качество главной (экранирующие кольца, пластины из электрокартона, бумажно-бакелитовые изделия, трансформаторное масло) и продольной (бумажно-бакелитовые цилиндры, кабельная бумага) системы изоляции является одним из наиболее значимых факторов в прогнозировании состояния жизненного цикла силовых масляных трансформаторов, эксплуатируемых в системах электроснабжения. Содержание пиролизных, гидролизных и окисленных отложений внутри масляного трансформатора вызывает распад масла и бумажной изоляции, что в итоге сказывается на его диэлектрических свойствах и параметрах. В соответствии с нормативными документами [47, 48], используемыми в настоящее время, для оценки старения бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов необходим отбор образцов бумажной изоляции, которые чаще всего располагаются в труднодоступном месте и требуют вывод силового трансформатора в ремонт и его вскрытие. Поэтому в эксплуатационных условиях для прогнозирования остаточного ресурса бумажной изоляции масляного трансформатора используются косвенные методы, основанные на определении содержания оксидов углерода (монооксида углерода CO и диоксида углерода CO_2) и фурановых включений в масле [60, 61, 62].

В исследовании для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силового масляного трансформатора на основе

содержания CO_2 и CO и фурановых включений предлагается использовать модели нечеткой логики, разработанные на базе программного комплекса MATLAB в пакете Fuzzy logic [55].

В ходе разработки нечетких моделей для силовых масляных трансформаторов напряжением 110 кВ, широко применяемых в системах электроснабжения, учтены рекомендации международного стандарта FIST 3-31 [66]. Данный стандарт выделяется более точной дифференциацией дефектов, что придает ему преимущество перед отечественными стандартами РД 153-34.0-46.302-00 [41] и СТО 34.01-23.1-001-2017 [47], которые позволяют оценивать только предельно допустимое состояние бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов [4].

3.4.1 Модель нечеткой логики 1 – модель для оценки срока службы бумажной изоляции на основе фурановых включений в трансформаторном масле

Фурановые включения (2-фурфурол) образуются как продукты частичного разрушения бумажной изоляции в результате пиролизного и гидролизного воздействия на бумагу и в последующем растворяются в трансформаторном масле. Фурановые включения обычно используются для оценки срока службы бумажной изоляции [77].

В модели нечеткой логики 1 в качестве входных лингвистических переменных использованы «Концентрация фурановых включений» и «Скорость образования фурановых включений в месяц». Выходной лингвистической переменной в модели 1 на основе алгоритма Мамдани [55] является «Оценка срока службы бумажной изоляции», которая интерпретируется по шкале от 0 до 1, где 0 показывает окончание жизненного цикла бумажной изоляции, а 1 указывает на состояние бумажной изоляции со 100% оставшимся жизненным циклом. Для анализа расчетного срока службы бумажной изоляции в разработанной нечеткой модели использованы входные

и выходные терм – множества, принятые с учетом рекомендаций FIST 3-31 [66], которые приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Терм – множества для входных и выходных функций принадлежности модели нечеткой логики 1

Терм – множества входной функции принадлежности для входной лингвистической переменной				Терм – множества выходной функции принадлежности для выходной лингвистической переменной «Оценка срока службы бумажной изоляции»	
«Концентрация фурановых включений», $ppm (1 * 10^{-6})$		«Скорость образования фурановых включений в месяц», $ppm/мес (1 * 10^{-6}/мес)$			
Нормальная	0,058 – 0,292	Невысокая	0 – 0,038	Нормальный	1 – 0,68
Умеренная	0,654 – 2,021	Умеренно невысокая	0,038 – 0,075	Умеренный	0,68 – 0,33
Форсированная	2,374 – 3,277	Умеренная	0,075 – 0,11	Избыточный	0,33 – 0,18
Значительная	3,851 – 4,524	Умеренно высокая	0,11 – 0,15	Рискованный	0,18 – 0,08
Окончание срока службы	5,315 – 7,337	Высокая	>0,15	Окончание срока службы	0,08 – 0

Система нечеткого вывода и набор нечетких лингвистических утверждений «ЕСЛИ-ТО» используются для формирования представления о нечетких входных данных, полученных на основе значений фурановых включений в трансформаторном масле и значений скорости образования фурановых включений в месяц [66]. Для анализа нечеткой системы вывода разработано 25 нечетких правил, исходя из количества входных и выходных функций принадлежности.

В качестве примера, рассмотрены 3 нечетких правила из 25, для которых разрабатывалась модель нечеткой логики 1.

Правило 1. «ЕСЛИ» Концентрация фурана «Нормальная» «И» Норма фурана за месяц «Невысокая», «ТО» Оценка срока службы бумажной изоляции «Нормальный».

Правило 10. «ЕСЛИ» Концентрация фурана «Умеренная» «И» Норма фурана за месяц «Высокая», «ТО» Оценка срока службы бумажной изоляции «Рискованный».

Правило 25. «ЕСЛИ» Концентрация фурана «Окончание срока службы» «И» Норма фурана за месяц «Высокая», «ТО» Оценка срока службы

бумажной изоляции «Окончание срока службы».

Для проверки работоспособности исследуемой модели проведено тестирование на основе отобранных проб трансформаторного масла с силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1 (зав. № 27015, ПС 110/35/10 кВ Адыгейская, год выпуска 2012) со следующими значениями входных данных: «Концентрация фурановых включений» – 0,6 *ppm*, «Скорость образования фурановых включений в месяц» – 0,03 *ppm/мес*. Входные данные, как показано на рисунке 3.11 (строка 6 – правило 6 и строка 7 – правило 7), определяются двумя заданными нечеткими правилам с индивидуальными вероятностями возникновения. Выходные данные модели (строка 26) выражены результирующим нечетким множеством.

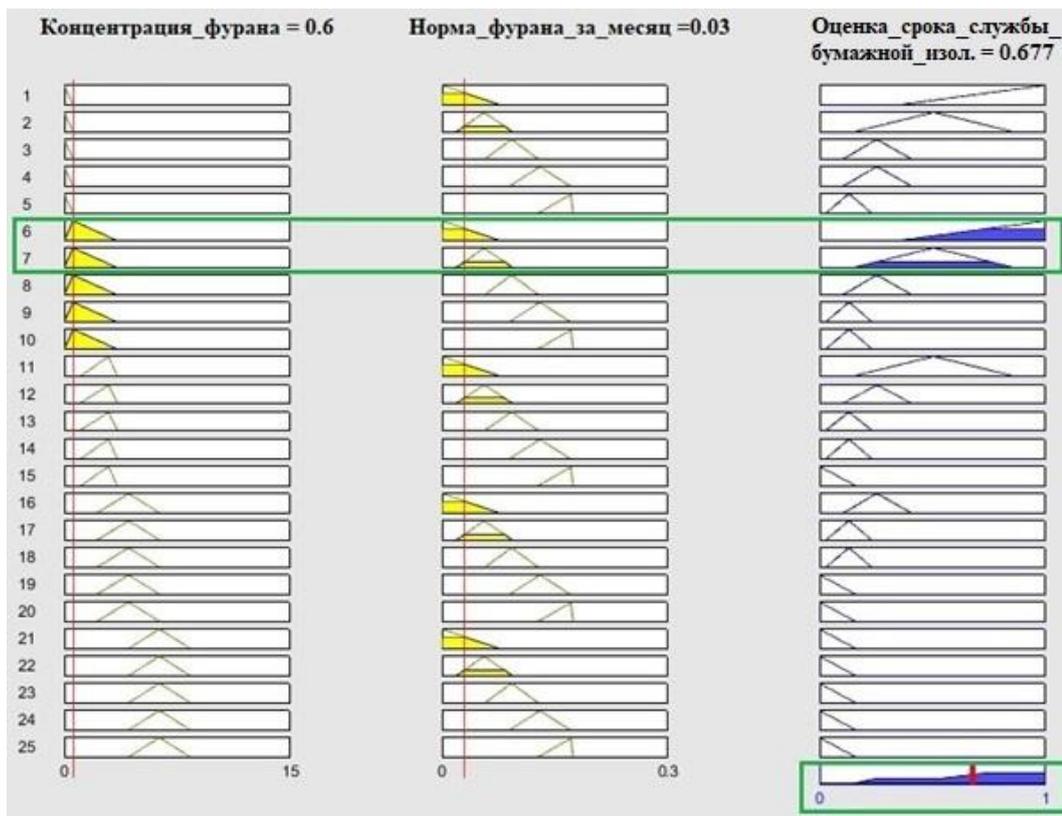


Рисунок 3.11 – Проверка работоспособности модели нечеткой логики 1

Результат дефаззификации на рисунке 3.11 (приведение нечеткого значения в четкое) выделен вертикальной красной линией и составляет 0,677, т.е. расчетный остаточный срок службы бумажной изоляции составляет 67,7%

от расчетного срока службы, который в соответствии с ГОСТ-11677-85 [18] составляет 25 лет.

3.4.2 Модель нечеткой логики 2 – модель для оценки степени износа бумажной изоляции на основе содержания CO_2 и CO в трансформаторном масле

CO и CO_2 являются основными газами, образующимися в результате разложения бумажной изоляции [65]. Для создания модели использованы следующие входные лингвистические переменные: «Отношение CO_2 к CO » и «Скорость образования CO в месяц». Выходная лингвистическая переменная «Оценка степени износа бумажной изоляции» на основе алгоритма Мамдани рассматривается в диапазоне от 0 до 1. Выходное значение, приближающееся к 1, указывает на значительную степень износа бумажной изоляции, а выходное значение близкое к 0 показывает нормальную степень износа бумажной изоляции. Для оценки степени износа бумажной изоляции в нечеткой модели использованы входные и выходное терм – множества, принятые с учетом рекомендаций FIST 3-31 [66], которые приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Терм – множества для входных и выходных функций принадлежности модели нечеткой логики 2

Терм – множества входной функции принадлежности для входной лингвистической переменной				Терм – множества выходной функции принадлежности для выходной лингвистической переменной «Оценка степени износа бумажной изоляции»	
«Отношение CO_2 к CO », $ppm (1 * 10^{-6})$		«Скорость образования CO в месяц», $ppm/мес (1 * 10^{-6}/мес)$			
Нормальное	15 – 11	Нормальная	0 – 60	Нормальная	0 – 0,15
Умеренное	11 – 7	Незначительная	60 – 150	Низкая	0,15 – 0,48
Критическое	7 – 4	Значительная	150 – 340	Высокая	0,48 – 0,65
Рискованное	4 – 0	Критическая	>340	Значительная	0,65 – 1

Для анализа модели нечеткой логики 2 – оценки степени износа бумажной изоляции разработано 16 нечетких правил, исходя из количества входных и выходной функций принадлежности (рисунок 3.12).

Предложенная модель протестирована на отобранных пробах трансформаторного масла с силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1 (зав. № 27015, ПС 110/35/10 кВ Адыгейская, год выпуска 2012), со следующими входными данными: «Отношение CO_2 к CO » – 8 *ppm*, «Скорость образования CO в месяц» – 35 *ppm/мес*. Входные данные, как показано на рис. 2, определяются одним заданным нечетким правилом (строка 9 – правило 9). Выходные данные (строка 17) выражены результирующим нечетким множеством. Результат дефаззификации выделен вертикальной красной линией и составляет 0,317, что соответствует низкой степени износа бумажной изоляции.

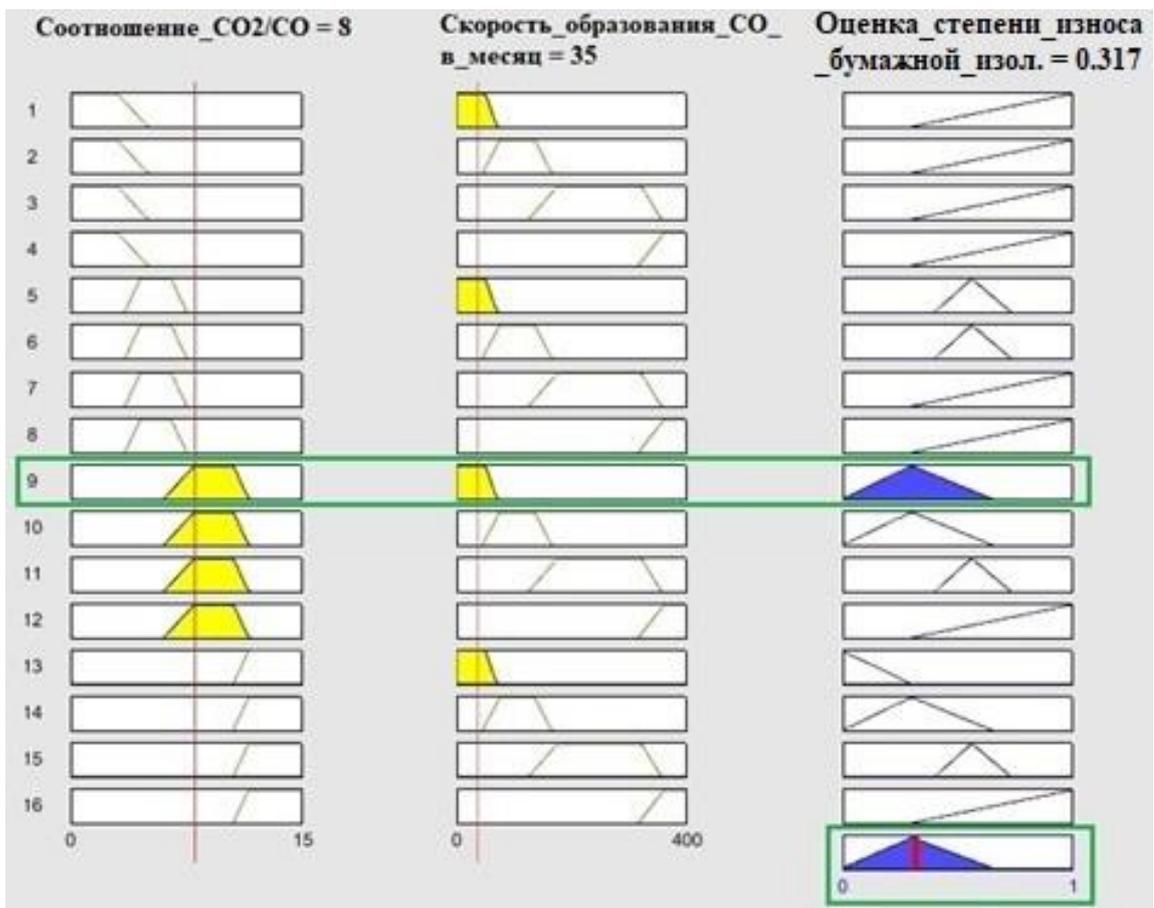


Рисунок 3.12 – Проверка работоспособности модели нечеткой логики 2

Проведенные тестовые замеры проб трансформаторного масла, отобранные из силового масляного трансформатора ТДТН-25000/110-У1, подтвердили возможность диагностической оценки расчетного остаточного срока службы бумажной изоляции и степени износа бумажной изоляции с помощью разработанных моделей нечеткой логики.

3.4.3 Модель нечеткой логики 3 – модель для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов

Объединение моделей нечеткой логики 1 и 2 позволяет определить суммарный остаточный ресурс бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов. Для оценки суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции используются полученные выходные значения из модели нечеткой логики 1 (таблица 3.10), а также выходные значения из модели нечеткой логики 2 (таблица 3.11). Набор терм-множеств выходной функции принадлежности для выходной лингвистической переменной «Определение суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов» на основе алгоритма Мамдани определен следующими значениями: «Нормальный» (от 0 до 0,15), «Низкий» (от 0,15 до 0,48), «Высокий» (от 0,48 до 0,65), «Значительный» (0,65 до 1). Графическое изображение входных и выходной треугольных функций принадлежности для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов приведено на рисунке 3.13.

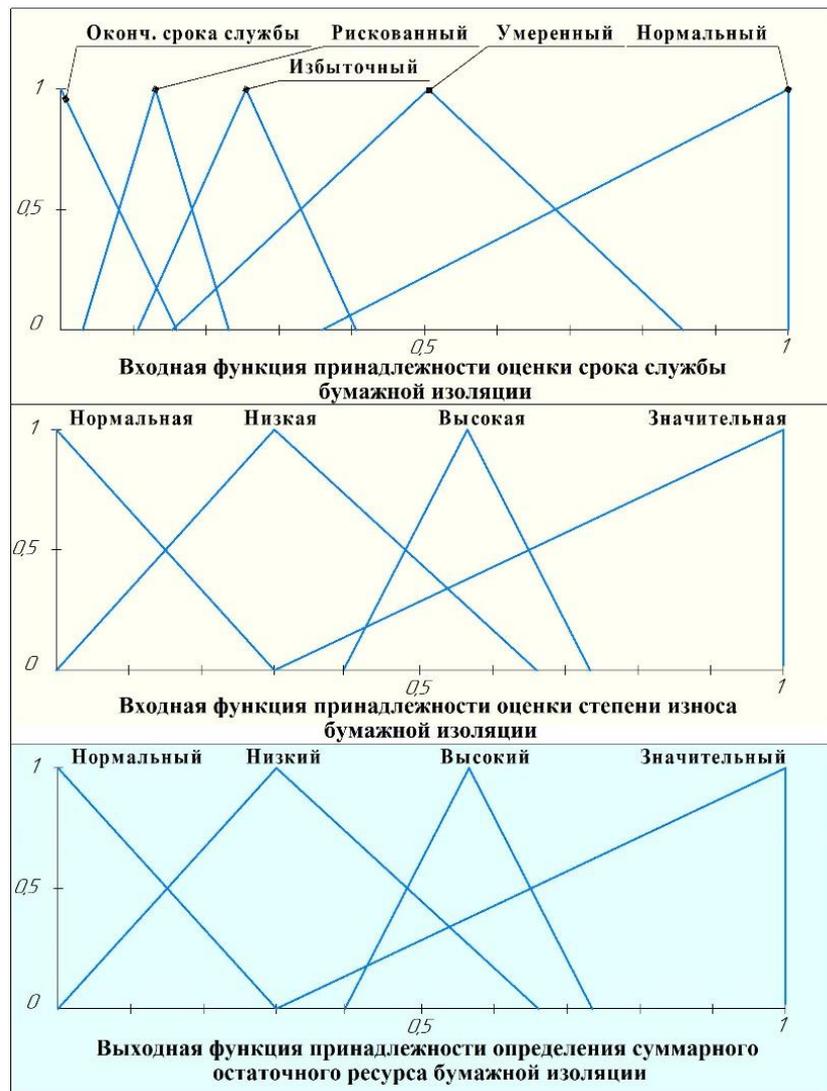


Рисунок 3.13 – Входные и выходная функции принадлежности модели нечеткой логики 3

Руководствуясь стандартом FIST-3-31 [66], разработаны нечеткие лингвистические утверждения, связывающие входные и выходную функции принадлежности модели для определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции. Исходя из количества входных и выходной функций принадлежности для модели нечеткой логики 3 разработано 20 нечетких правил (рисунок 3.14).

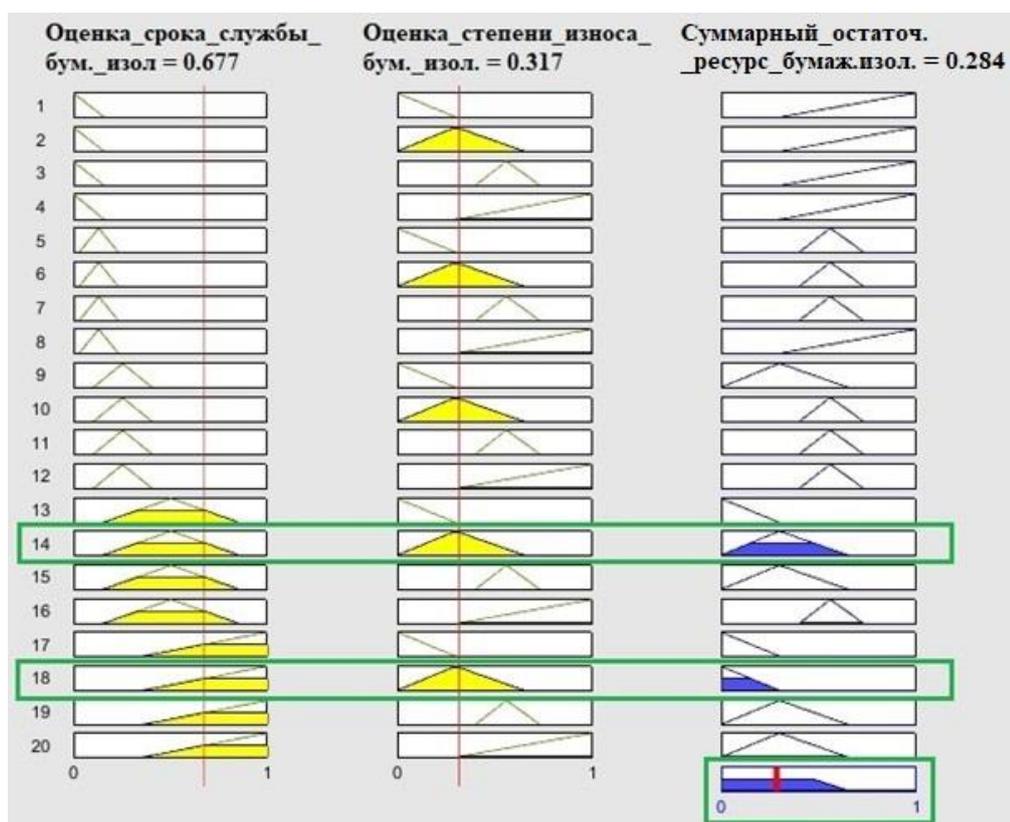


Рисунок 3.14 – Проверка работоспособности модели нечеткой логики 3

Для проверки работоспособности разработанной нечеткой модели использованы выходные значения функций принадлежности для силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1 (зав. № 27015, ПС 110/35/10 кВ Адыгейская, год выпуска 2012), полученные из нечетких моделей оценки срока службы бумажной изоляции на основе фурановых включений (значение 0,677 из рисунка 3.11) и оценки степени износа бумажной изоляции на основе содержания CO_2 и CO (значение 0,317 из рисунка 3.12). Входные данные, как показано на рисунке 3.14, определяются двумя заданными нечеткими правилами с индивидуальными вероятностями возникновения (строка 14 – правило 14 и строка 18 – правило 18). Выходные данные модели (строка 21) выражены результирующим нечетким множеством. В результате дефаззификации значение суммарного остаточного износа бумажной изоляции составило 0,284. Полученное значение соответствует низкой активности старения бумажной изоляции силового трансформатора.

3.4.4 Апробация полученной нечеткой модели и интерпретация результатов

Для оценки работоспособности разработанной модели определения суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов на основе нечеткой логики были отобраны шестнадцать образцов масла из баков силовых трансформаторов типа ТДН-40000/110 (таблица 3.12). После ввода данных в окно модели 3 выполнен расчет суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов. В таблице 3.12 приведены результаты применения нечеткой логики для каждой пробы масла.

Таблица 3.12 – Образцы трансформаторного масла и результат применения нечеткой логики для силовых трансформаторов ТДН-40000/110

№ образца масла	Заводской номер	Место эксплуатации	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	25368	ПС Бунутай	2013	<0,01	0	15	6	0,845	0,0967	0,129
2	25369	ПС Бунутай	2013	<0,01	0	11	0	0,845	0,281	0,126
3	25050	ПС Валуйки	2012	<0,01	0	3	23	0,845	0,77	0,321
4	25207	ПС Космодром Восточный	2012	0,24	0,01	9	6	0,763	0,317	0,243
5	25476	ПС Уча	2013	0,60	0,01	10,7	11	0,786	0,311	0,221

Продолжение таблицы 3.12

№ образца масла	Заводской номер	Место эксплуатации	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
6	25208	ПС Космодром Восточный	2012	0,24	0,01	9	6	0,763	0,317	0,243
7	25024	ПС Опорная	2012	0,13	0,03	11	6	0,677	0,281	0,282
8	25025	ПС Опорная	2012	1,04	0,06	12	7	0,542	0,0967	0,246
9	25477	ПС Уча	2013	0,31	0,01	11	9	0,757	0,281	0,244
10	24916	ПС ЦХП	2012	0,12	0,01	11	11	0,781	0,281	0,223
11	25277	Западно-Казахстанские ЭС	2013	0,23	0,01	11	11	0,765	0,281	0,237
12	25278	Западно-Казахстанские ЭС	2013	0,28	0,01	11	11	0,755	0,281	0,245
13	24915	ПС ЦХП	2012	0,98	0,06	4,8	9	0,541	0,599	0,357
14	24835	ПС Временная	2011	1,36	0,06	9	6	0,531	0,317	0,308
15	24772	ПС Красноармейская	2011	4,44	0,09	5,9	21	0,127	0,563	0,672
16	24663	ПС Митяево	2011	5,54	0,09	3,1	42	0,0953	0,769	0,749

Применение стандартов РД 153-34.0-46.302-00 [41] и СТО 34.01-23.1-001-2017 [47] для диагностики отобранных шестнадцати образцов масла из баков силовых трансформаторов типа ТДН-40000/110 приводит к заключению, что все отобранные образцы не превышают предельно

допустимых значений показателей по CO и CO_2 , а также фурановых включений и, следовательно, являются бездефектными. Однако, на основании значений суммарного остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов указанных образцов масла, полученных с помощью разработанной модели нечеткой логики с учетом рекомендаций международного стандарта FIST 3-31 [66], можно сделать вывод, что у образцов № 1, 2 – нормальное состояние бумажной изоляции (в таблице 3.12 выделены зеленым цветом), у образцов № 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 – низкий порог износа бумажной изоляции (в таблице 3.12 выделены желтым цветом), а у образцов № 15, 16 – значительный порог износа бумажной изоляции (в таблице 3.12 выделены красным цветом).

Таким образом, применение стандарта FIST 3-31 [66] 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 [41, 47].

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана нечеткая модель на основе метода Роджерса, результаты верификации которой показали, что она обеспечивает правильную интерпретацию дефектов с точностью 80%. В сравнении с оригинальным методом Роджерса, который правильно интерпретирует дефекты с точностью 53%, разработанная модель демонстрирует более высокую точность определения дефектов силовых масляных трансформаторов.

2. Разработана нечеткая модель на основе метода IEC 60599 результаты верификации которой показали, что она обеспечивает верную интерпретацию дефектов с точностью 86,6%, в то время как оригинальный метод IEC 60599 верно интерпретирует дефекты с точностью 40%. Таким образом, разработанная модель демонстрирует более высокую точность определения

дефектов силовых масляных трансформаторов.

3. Разработана нечеткая модель на основе метода ключевых газов. Результаты верификации экспериментально подтвердили, что данная модель корректно определяет состояние трансформатора как бездефектное в случае фактически рассмотренного бездефектного трансформатора.

4. Разработаны модели, основанные на нечеткой логике, для 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, что, в свою очередь, повысило точность определения состояния бумажной изоляции.

5. Экспериментально показано, что практическая реализация нечетких математических моделей, основанных на методах Роджерса, ИЕС 60599 и анализе ключевых газов, а также на современных подходах к оценке остаточного ресурса бумажной изоляции, существенно улучшают точность диагностики функционального состояния силовых масляных трансформаторов по сравнению с оригинальным интерпретированием методов: для модели на основе метода Роджерса точность повысилась с 53% до 80%, а для модели на основе метода ИЕС 60599 — с 40% до 86,6%. Таким образом, точность улучшилась на 27% и 46,6% соответственно. Разработанные модели, интегрирующие количественные данные хроматографического анализа растворенных газов с теоретически обоснованными предположениями о процессах старения изоляции, способствуют углубленному пониманию и раннему выявлению потенциальных дефектов, обеспечивая тем самым увеличение эффективности эксплуатации и обслуживания силовых масляных трансформаторов.

ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ХАРГ

4.1 Интеграция разработанных моделей в программный продукт

После успешной разработки и валидации нечетких моделей, представленных в главе 3 и графического метода Дюваля, представленного в главе 1, необходимо интегрировать их в программные продукты, используемые для диагностики дефектов силовых масляных трансформаторов. Данный этап включает несколько шагов [21]:

- первым шагом является проектирование пользовательского интерфейса, который обеспечит взаимодействие с разработанными моделями. Интерфейс должен быть простым, интуитивно понятным и функциональным, позволяя пользователям загружать данные ХАРГ, запускать процесс диагностики и просматривать результаты.

- далее необходимо реализовать алгоритмы нечетких моделей, которые были разработаны на предыдущих этапах. Этот шаг включает в себя написание кода на языке программирования, который эффективно выполняет анализ данных ХАРГ и выдает диагностические результаты.

- модели должны быть интегрированы с внешними источниками данных, которые могут быть необходимы для полноценной диагностики трансформаторов. Это могут быть данные с датчиков, техническая документация, а также исторические данные о предыдущих дефектах и обслуживании трансформаторов.

- после интеграции необходимо провести тестирование и отладку программного обеспечения, чтобы убедиться в его правильной работе. Это включает тестирование на различных наборах данных ХАРГ, а также проверку на наличие ошибок и неполадок в работе моделей.

4.2 Реализация графического программного продукта на основе метода треугольника Дюваля

4.2.1 Разработка программного продукта с графическим интерфейсом пользователя (GUI)

Метод треугольника Дюваля является одним из способов графического интерпретации ХАРГ [78]. Рассмотрим разработку программного продукта с графическим интерфейсом пользователя для интерпретации метода треугольника Дюваля с использованием пакета App Designer в программном комплексе MATLAB [12, 15, 25].

Метод Дюваля отличается тем, что для диагностики неисправностей используется визуализация расположения растворенных газов на треугольной карте, как показано на рисунке 4.1.

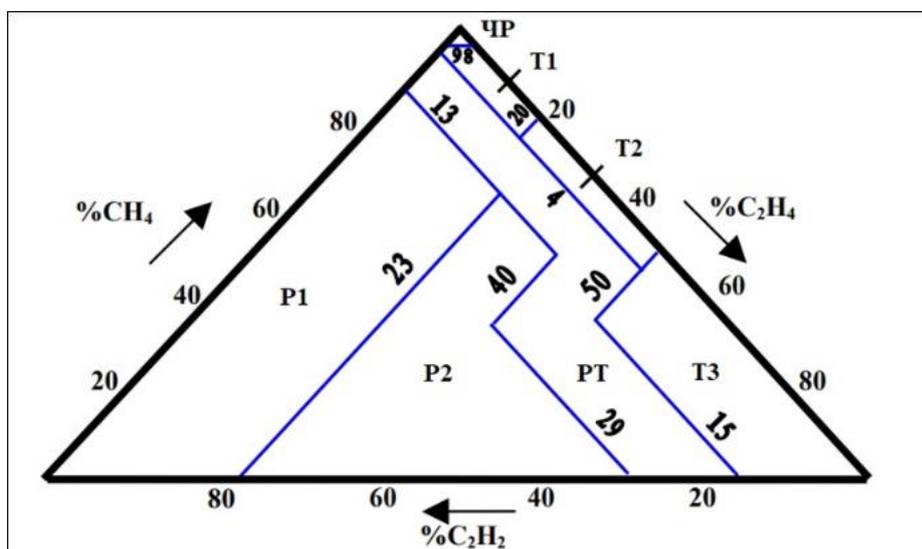


Рисунок 4.1 – Треугольник Дюваля

В типичном случае выделяются четыре категории дефектов, а именно: частичные разряды, разряды высокой и низкой мощности (электрические дефекты), сочетание электрических и термических дефектов, а также точки перегрева в различных температурных диапазонах (термические дефекты) [77,

79]. Данные категории дефектов определяются в семи различных зонах, представленных в таблице 4.1 [58]. Поскольку ни одна из этих зон не предназначена для нормального состояния старения трансформатора, неправильная интерпретация результатов может привести к обнаружению любого из упомянутых дефектов.

Таблица 4.1 – Виды предполагаемых дефектов по методу треугольника Дюваля

Обозначение	Вид предполагаемого дефекта	Описание дефекта
ЧР	Частичные разряды	Разряды типа холодной плазмы (короны) в газовых пузырьках или пустотах с возможным образованием парафина в бумажной изоляции
P1	Разряды низкой мощности	Частичные разряды искрового типа, вызывающие пробой, обугленные пробои в бумажной изоляции. Низкоэнергетическая дуга, вызывающая обугленные перфорации или следы на поверхности бумажной изоляции, с образованием частиц углерода в масле
P2	Разряды высокой мощности	Разряды в бумажной изоляции или масле, сопровождающиеся силовым замыканием, приводящие к значительному повреждению бумажной изоляции, образованию больших частиц углерода в масле, расплавлению металла, срабатыванию защиты и газового реле
T1	Термический дефект, $T < 300$ °C	Бумажная изоляция становится коричневатой (> 200 °C) или обугливается (> 300 °C)
T2	Термический дефект $300, < T < 700$ °C	Карбонизация бумажной изоляции, образование частиц углерода в масле
T3	Термический дефект, $T > 700$ °C	Обширное образование частиц углерода в масле, окрашивание металла (800 °C) или плавление металла (> 1000 °C)
PT	Совокупность термических и электрических дефектов	Переходные состояния между электрическими и термическими дефектами

Для улучшения визуализации и сокращения времени на расчеты полученных результатов ХАРГ разработан программный продукт графического интерфейса. На рисунке 4.2 показана блок-схема для программного продукта с графическим интерфейсом пользователя (GUI) [28, 83, 88].



Рисунок 4.2 – Блок схема программного продукта по методу треугольника Дюваля

Пользовательский интерфейс довольно интуитивно понятен и показан на рисунке 4.3. Цветовые области на интерфейсе соответствуют дифференциации цветов, приведённой в таблице 4.1. Взаимодействие с программным продуктом осуществляется только с помощью мыши. Курсор действует как кнопка переключения. Первый щелчок активирует ползунок и позволяет точно настроить три параметра (CH_4 , C_2H_4 и C_2H_2). После завершения настройки значений будет показана область дефекта и его

обозначение, после чего можно заморозить данную позицию, щелкнув второй раз в области треугольника.

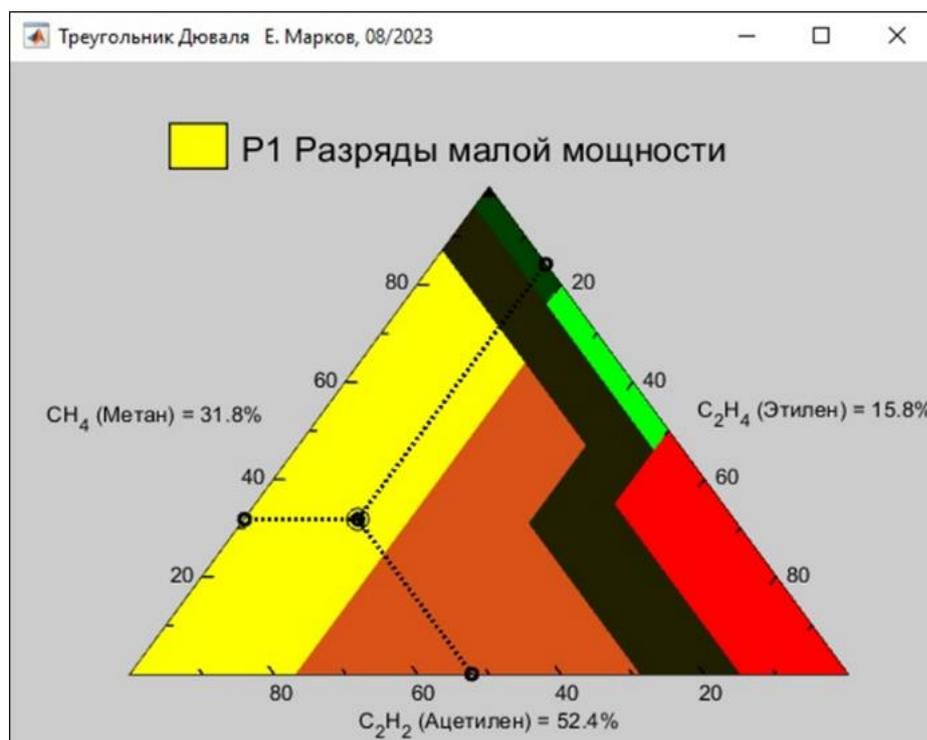


Рисунок 4.3 – Пользовательский интерфейс программного продукта по методу треугольника Дюваля

Разработанный программный продукт графического представления по методу треугольника Дюваля в среде MATLAB [38] способен быстро и четко определять вид предполагаемого дефекта силового масляного трансформатора, имеет возможность мониторинга силового масляного трансформатора в динамике его жизненного цикла.

Программный продукт существенно сокращает время расчетов, тем самым упрощает обработку больших массивов информации. Благодаря графическому интерфейсу процесс анализа становится более удобным и доступным для операторов и инженеров, позволяя им оперативно принимать решения по обслуживанию и ремонту трансформаторов на основе полученных данных.

4.2.2 Апробация разработанного программного продукта

Для оценки эффективности и корректной работы разработанного программного продукта графического представления метода треугольника Дюваля был проведен экспериментальный анализ. В рамках этого анализа были предоставлены десять образцов масла из баков трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА напряжением 110 кВ. Образцы масла приведены в таблице 4.2. Эксперимент позволил оценить работу программного продукта на реальных данных и выявить его потенциал в предсказании состояния силовых масляных трансформаторов на основе метода треугольника Дюваля. Полученные результаты имеют ключевое значение для подтверждения надежности программного продукта и его применимости в практических сценариях мониторинга состояния трансформаторов.

Таблица 4.2 – Предоставленные результаты ХАРГ силовых трансформаторов

№ образца масла	Тип трансформатора	Концентрации газов, ppm		
		CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	ТРДН-25000/110	21	12	27
2		102	162	542
3		3452	1389	7
4		7873	6991	34
5		10501	17702	749
6		164	234	691
7		85	109	315
8		11	12	38
9		129	154	236
10		1108	1779	1827

После загрузки расчетных данных в интерфейс программного продукта, выполняется процесс диагностики дефектов. В таблице 4.3 представлены фактически обнаруженные дефекты, выявленные в ходе ремонтных работ, а также результаты, полученные при использовании программного продукта графического представления. Указанные данные позволяют оценить

эффективность и точность работы разработанного программного продукта в выявлении и анализе дефектов силовых масляных трансформаторов.

Таблица 4.3. – Результаты исследования образцов масла на основе графического метода треугольника Дюваля

№ образца масла	Тип трансформатора	Фактические дефекты	Результаты графического метода треугольника Дюваля
1	ТРДН-25000/110	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
2		Следы дугообразования	Разряды малой мощности
3		Термический дефект	Термический дефект 300, <T <700 °С
4		Термический дефект	Термический дефект 300, <T <700 °С
5		Термический дефект	Термический дефект, T >700 °С
6		Следы дугообразования	Разряды малой мощности
7		Следы дугообразования	Разряды малой мощности
8		Следы дугообразования	Разряды малой мощности
9		Следы дугообразования	Разряды большой мощности
10		Следы дугообразования	Разряды большой мощности

В результате выполненного сравнения между фактическими дефектами трансформатора и разработанным программным продуктом на основе графического метода треугольника Дюваля видно, что программный продукт интерпретировал развивающиеся дефекты с точностью 100%. Как показано в таблице 4.3, разработанный программный продукт дает правильную интерпретацию в 10 образцах масла из 10. Однако для оценки окончательной точности необходимо использовать более обширный массив данных образцов трансформаторного масла.

4.3 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу ИЕС 60599

Для разработки прикладного программного продукта использовалась нечеткая модель определения развивающихся дефектов в соответствии с методом ИЕС 60599, как представлено в главе 2. Описанный подход основывается на алгоритме Мамдани и использует нечеткую логику для анализа данных о газах, выделяющихся из бака трансформатора.

Реализация программного продукта выполняется на основе алгоритма, который представляет следующую последовательность действий (рисунок 4.4):

1. Производится отбор проб пяти газов из бака трансформатора, а именно водород (H_2), метан (CH_4), этилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2) и этан (C_2H_6).

2. Осуществляется расчет отношений пар газов, таких как отношение ацетилена к этилену (C_2H_2/C_2H_4), метана к водороду (CH_4/H_2) и этилена к этану (C_2H_4/C_2H_6).

3. Производится вычисление на основе нечеткой модели с заранее определенными правилами, выполняется выполнение заданных условий.

В соответствии с заданными правилами, в основе которых лежит алгоритм Мамдани, определяется наличие дефекта. Путем анализа соотношений газов и применения заранее определенных правил на основе экспертных знаний происходит выявление признаков, свидетельствующих о развивающихся дефектах в баке трансформатора.

Программный продукт разработан с целью предоставления инструментов для прогнозирования вероятности возникновения дефектов, а также проведения оценки текущего технического состояния силовых масляных трансформаторов. Основой для алгоритмов прогнозирования служат протоколы анализа ХАРГ [97]. Программный продукт функционирует через браузерный веб-интерфейс, что позволяет использовать его на

различных устройствах и операционных системах (Windows, MacOS, Linux, Android), что обеспечивает широкий спектр возможностей для мониторинга состояния трансформаторов в различных условиях эксплуатации.

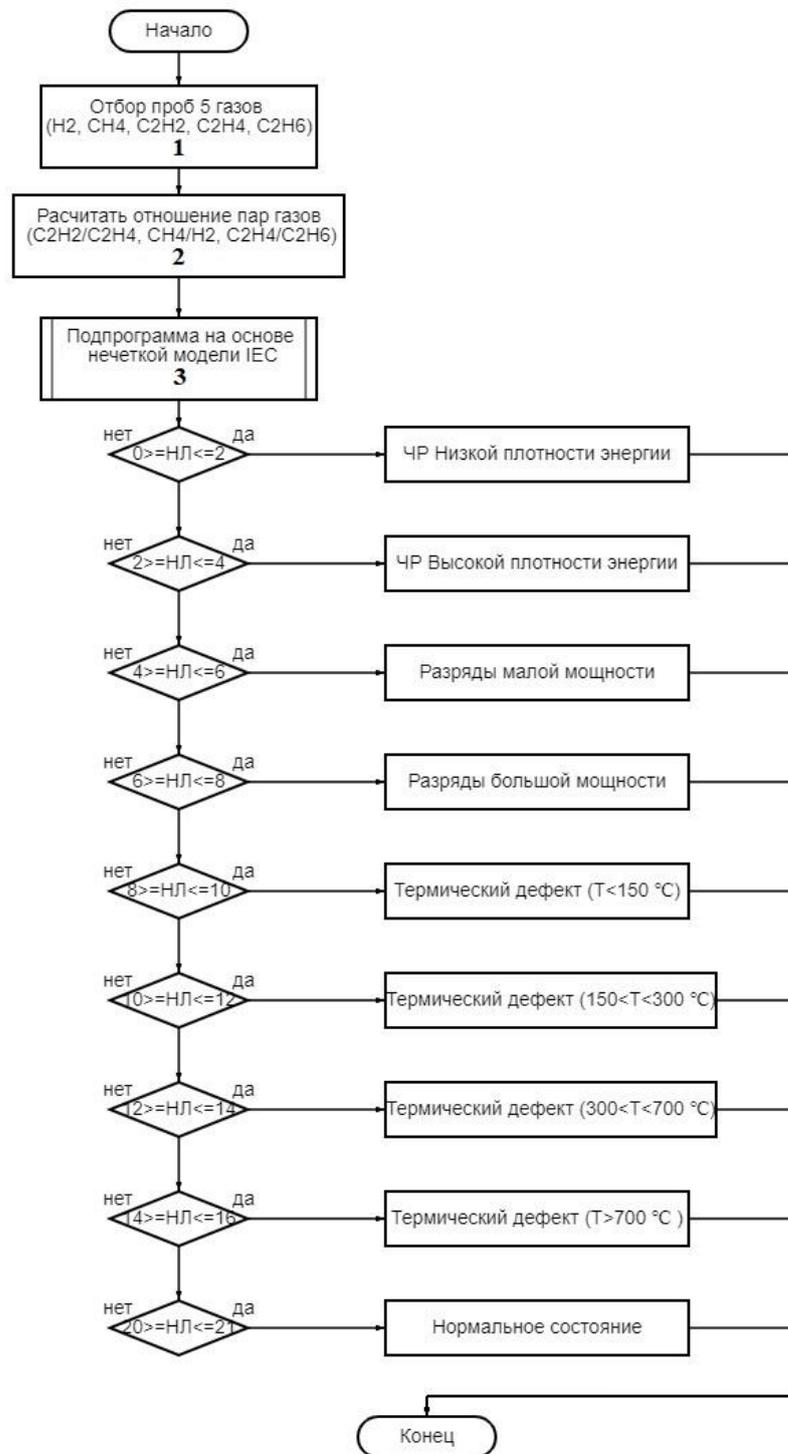


Рисунок 4.4 – Алгоритм программного продукта по методу ИЕС

Разработка комплексного программного продукта осуществлялась на базе ряда программно-вычислительных решений и инструментов, в частности, использовались MATLAB и пакет для работы с нечёткой логикой Fuzzy logic, а также язык программирования JavaScript [3, 30, 53]. В качестве демонстрации функционала и интерфейса разработанной системы на рисунке 4.5 представлен скриншот рабочего окна программного продукта, иллюстрирующий непосредственно интерфейс пользователя и основные доступные функциональные возможности.

Программа определения развивающихся дефектов по методу ИЕС на основе ХАРГ

СН4

Н2

С2Н6

С2Н4

С2Н2

Возможное состояние:

Рисунок 4.5 – Рабочий интерфейс программного продукта определения развивающихся дефектов по методу ИЕС 60599

Ввод данных осуществляется в окно программного продукта, представленное для каждого газа. Единица измерения концентрации растворенных газов, используемая в программе, имеет размерность ppm. Далее, после ввода данных необходимо нажать кнопку расчет, согласно введённым данным производится вычисление возможного развивающегося дефекта, которое показано в поле «возможный дефект».

В качестве примера использовался протокол ХАРГ дефектного трансформатора АДЦТН-63000/220/110 зав. № 15536 от 31.05.2023. Фактический осмотр трансформатора со снятием крышки бака выявил

следующие дефекты: ослабление и нагрев контактных соединений отводов НН, перегрев металлических элементов остова, следы перегрева бумажной изоляции. В протоколе ХАРГ отражены следующие концентрации растворенных газов: $CH_4 = 370 \text{ ppm}$, $H_2 = 76 \text{ ppm}$, $C_2H_6 = 167 \text{ ppm}$, $C_2H_4 = 360 \text{ ppm}$, $C_2H_2 = 4 \text{ ppm}$, $CO = 190 \text{ ppm}$, $CO_2 = 800 \text{ ppm}$. Виды возможных дефектов и их описание по методу IEC 60599 представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Виды предполагаемых дефектов согласно методу IEC 60599

Вид предполагаемого дефекта	Описание дефекта
Частичные разряды	Частичные разряды типа холодной плазмы (короны), приводящие к возможному осаждению воска на бумажной изоляции
Разряды низкой энергии	Разряды низкой энергии в масле и/или бумажной изоляции, о чем свидетельствуют большие обугленные перфорации в бумаге (проколы), обугливание поверхности бумаги (трекинг) или частицы углерода в масле; а также частичные разряды искрового типа, вызывающие точечные, обугленные перфорации (проколы) в бумаге, которые, однако, бывает трудно обнаружить
Разряды высокой энергии	Разряды высокой энергии в масле и/или бумажной изоляции, с последующим продолжением разряда, что проявляется в обширном разрушении и карбонизации бумаги, сплаве металла на концах разряда, обширной карбонизации в масле.
Термический дефект, $T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$	Термические дефекты масла и/или бумажной изоляции ниже $300 \text{ }^\circ\text{C}$ обусловлены коричневым цветом бумажной изоляции
Термический дефект $300 < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$	Термические дефекты масла и/или бумажной изоляции в диапазоне $300 < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$ обусловлены обугливанием бумажной изоляции
Термический дефект, $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$	Термические дефекты при температуре выше $700 \text{ }^\circ\text{C}$ обусловлены явными признаками карбонизации масла, окрашивания металла ($800 \text{ }^\circ\text{C}$) или расплавления металла ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$).

Пример расчета представлен на рисунке 4.6. В результате расчета выявлен «Термический дефект в диапазоне температур от $300 \text{ }^\circ\text{C}$ до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ », что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

Программа определения развивающихся дефектов по методу ИЕС на основе ХАРГ

СН4	<input type="text" value="370"/>
Н2	<input type="text" value="76"/>
С2Н6	<input type="text" value="167"/>
С2Н4	<input type="text" value="360"/>
С2Н2	<input type="text" value="4"/>

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

Рисунок 4.6 – Пример расчета развивающегося дефекта по методу ИЕС 60599

Таким образом разработанный программный продукт [35] представляет собой удобный инструмент для прогнозирования вероятности дефектов и оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов.

Адаптированный под различные операционные системы, он обеспечивает широкий спектр возможностей для мониторинга трансформаторов в различных условиях эксплуатации.

4.4 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу Роджерса

Основой для разработки программного продукта служит нечеткая модель выявления развивающихся дефектов в соответствии с методом, разработанным Роджерсом и изложенным во второй главе. Алгоритм разработанного программного продукта представлен на рисунке 4.7.

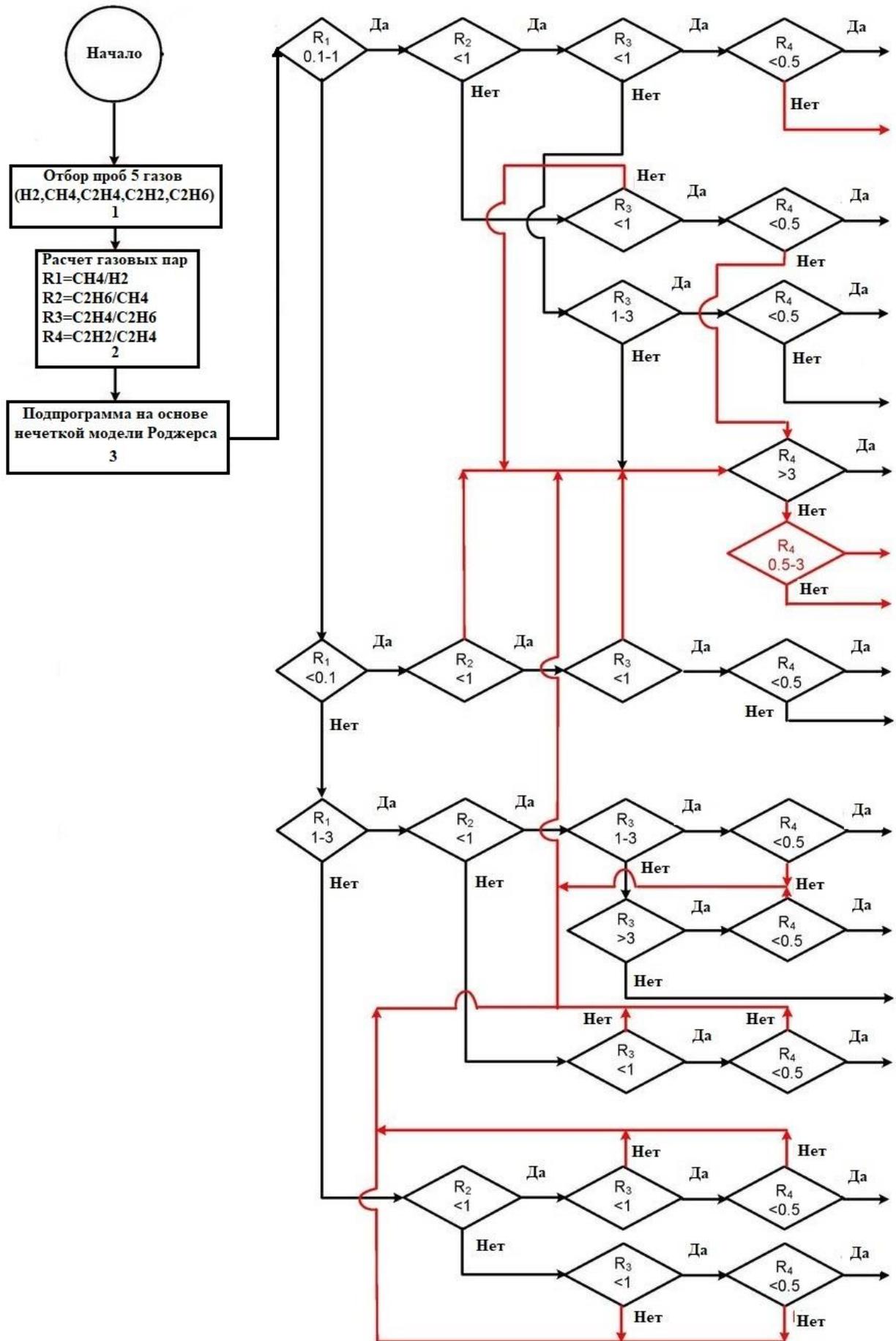


Рисунок 4.7 – Алгоритм программного продукта по методу Роджерса

Реализация программного продукта выполняется на основе алгоритма, который представляет следующую последовательность действий:

1. Проведение отбора образцов пяти газов из резервуара трансформатора, включающих H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 и C_2H_6 .

2. Выполняется расчет газовых пар, таких как соотношение CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_2/C_2H_4 .

3. Производится ввод полученных значений и их обработка с использованием нечеткой модели, основанной на лингвистических правилах. В соответствии с указанными правилами происходит классификация типов дефектов силового масляного трансформатора.

Функционирование программного продукта предполагает не только сбор и анализ данных, но и тесную интеграцию с системами поддержки решений, позволяя операторам своевременно реагировать на обнаруженные аномалии. Совместное применение метода Роджерса и нечеткой логики, в сочетании со статистикой обучения, вносит значительный вклад в прогнозирование срока службы трансформаторов и предотвращение дефектов.

Рабочий интерфейс разработанного программного продукта, показан на рисунке 4.8, который демонстрирует пользовательские и основные функциональные возможности.

Ввод данных в программный продукт осуществляется через специализированный пользовательский интерфейс, адаптированный для обработки различных типов газов. Концентрация растворенных газов в программном продукте измеряется в ppm. Для начала процесса расчета пользователю необходимо активировать соответствующую функцию путем нажатия на предназначенную для этого кнопку «Метод Роджерса». На базе введенных пользователем данных программный продукт проводит анализ, целью которого является идентификация потенциального развития дефекта. Результаты данного анализа представляются в специфическом поле, обозначенном как «возможный дефект».

Программа определения развивающихся дефектов по методу Роджерса на основе ХАРГ

CH₄

H₂

C₂H₆

C₂H₄

C₂H₂

Возможный дефект:

Рисунок 4.8 – Рабочий интерфейс программного продукта определения развивающихся дефектов по методу Роджерса

Виды возможных дефектов и их описание по методу Роджерса представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Виды предполагаемых дефектов согласно методу Роджерса

Вид предполагаемого дефекта	Механизм образования	Предполагаемые опасности
Частичные разряды	Возникновение частичных разрядов приводит к разрыву молекулярных связей в масле с образованием преимущественно H ₂ и небольших количеств CH ₄ .	Наличие высоковольтных разрядов, которые могут привести к постепенному разрушению изоляции.
Термические дефект	При температуре до 300°C преобладает образование CH ₄ и C ₂ H ₆ , свыше 300°C начинают преобладать C ₂ H ₄ и C ₂ H ₂ .	Старение изоляции может привести к ухудшению электрических свойств и снижению надежности оборудования.
Тепловые дефекты	Образование C ₂ H ₄ и C ₂ H ₂ свидетельствует о температуре более 700°C, что может быть связано с серьезными перегревами или даже дугowymi разрядами.	Высокие температуры могут привести к мгновенному выходу трансформатора из строя.

Продолжение таблицы 4.5

Вид предполагаемого дефекта	Механизм образования	Предполагаемые опасности
Дуговой разряд	C_2H_2 является продуктом термического разложения масла и изоляции при экстремально высоких температурах, характерных для дуговых разрядов.	дуговые разряды являются чрезвычайно разрушительными и могут вызвать мгновенный выход оборудования из строя.

Для наглядной демонстрации функционала программного продукта приводится анализ данных, использованных в разделе 4.3 согласно протоколу ХАРГ для дефектного трансформатора модели АТДЦТН-63000/220/110 с заводским номером 15536, датированным 31 мая 2023 года, данный пример анализа проиллюстрирован на рисунке 4.9. В результате расчета выявлен «Термический дефект», что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

Программа определения развивающихся дефектов по методу Роджерса на основе ХАРГ

CH_4
 H_2
 C_2H_6
 C_2H_4
 C_2H_2

Возможный дефект: Термический дефект

Рисунок 4.9 – Пример расчета развивающегося дефекта по методу Роджерса

Таким образом, на основе метода Роджерса, изложенного во второй главе, разработан программный продукт [37] для выявления развивающихся дефектов. Алгоритм программного продукта включает этапы отбора образцов пяти газов из резервуара трансформатора (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 и C_2H_6), расчет

газовых пар и их обработку с использованием нечеткой модели на основе лингвистических правил. Программный продукт классифицирует типы дефектов силового масляного трансформатора, обеспечивая интеграцию с системами поддержки решений для оперативной реакции на обнаруженные дефекты. Совместное применение метода Роджерса и нечеткой логики позволяет прогнозировать срок службы трансформаторов и предотвращать развитие дефектов.

4.5 Реализация прикладного программного продукта на основе модели нечеткой логики по методу ключевого газа

В основу разработки программного продукта заложена нечеткая логика, направленная на реализацию метода определения состояния оборудования по диагностическим показателям ключевого газа. Реализация программного продукта выполняется на основе алгоритма, который представляет следующую последовательность действий (рисунок 4.10):

1. Отбор выборочных данных о присутствии шести определенных газов в трансформаторном масле, в том числе водорода (H_2), метана (CH_4), этилена (C_2H_4), ацетилена (C_2H_2), этана (C_2H_6) и монооксида углерода (CO).
2. Интеграция собранных данных в пользовательский интерфейс программы, которая осуществляется путем их внесения в соответствующем окне.
3. Обработка данных посредством нечеткой логики согласно предустановленным правилам инференции.

Финальный этап алгоритма заключается в анализе полученных результатов и выявлении возможных дефектов в силовом масляном трансформаторе, учитывая газовый анализ как ключевой индикатор неполадок в рабочем состоянии трансформаторного масла.

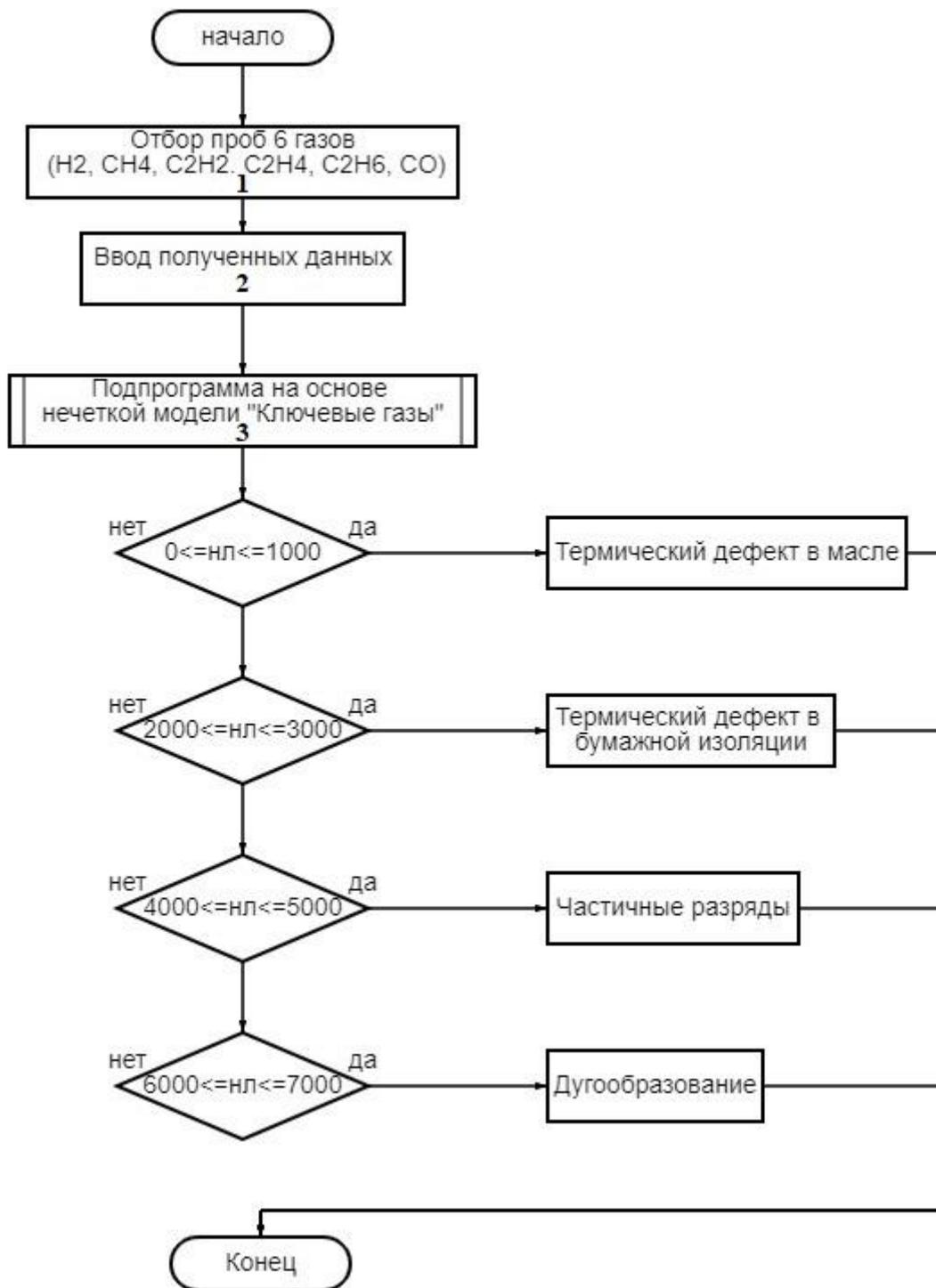


Рисунок 4.10 – Алгоритм программного продукта по методу «Ключевого газа»

Для демонстрации возможностей и интерфейса разработанной системы, на рисунке 4.11 показан скриншот рабочего окна программного

продукта, демонстрирующий пользовательский интерфейс и основные функциональные возможности.

Программа определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа на основе ХАРГ

The image shows a software interface for determining developing defects. It consists of the following elements:

- Input field for CH_4
- Input field for H_2 with a dropdown arrow
- Input field for C_2H_6
- Input field for C_2H_4
- Input field for C_2H_2
- Input field for CO
- A button labeled "Расчёт" (Calculate)
- A label "Дефект:" (Defect:)

Рисунок 4.11 – Рабочий интерфейс программного продукта определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа

Ввод данных осуществляется с использованием интерфейса программного окна, предназначенного для каждого типа газа. Единица измерения концентрации растворенных газов, применяемая в программном продукте, определена как ppm. После ввода данных требуется инициировать расчет, нажав на соответствующую кнопку. На основании введенных данных производится анализ возможного развития дефекта, результаты которого отображаются в поле "возможный дефект". Для иллюстрации работы программного продукта рассмотрен использованный в разделе 4.3 протокол ХАРГ дефектного трансформатора АТДЦТН-63000/220/110 с заводским номером 15536 от 31 мая 2023 года. Пример расчета показан на рисунке 4.12.

Программа определения развивающихся дефектов по методу ключевого газа на основе ХАРГ

CH ₄	<input type="text" value="370"/>
H ₂	<input type="text" value="76"/>
C ₂ H ₆	<input type="text" value="167"/>
C ₂ H ₄	<input type="text" value="360"/>
C ₂ H ₂	<input type="text" value="4"/>
CO	<input type="text" value="190"/>
<input type="button" value="Расчёт"/>	

Дефект: ТД_в_масле

Рисунок 4.12 – Пример расчета развивающегося дефекта по методу ключевого газа

В результате расчета выявлен «Термический дефект в масле», что подтверждается фактическим осмотром трансформатора.

Следовательно, разработанный программный продукт [36], основанный на методах нечеткой логики, демонстрирует точную способность к идентификации потенциально развивающихся дефектов в системе трансформатора. Данная способность достигается путем анализа введенных данных о концентрации растворенных газов и применения соответствующих алгоритмов, учитывающих различные факторы. Таким образом, программный продукт обеспечивает более надежное и оперативное выявление потенциальных проблемных зон в работе трансформатора, что позволяет оперативно принимать меры по их предотвращению или устранению.

4.6 Реализация прикладного программного продукта на основе нечеткой модели определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов

Разработанный программный продукт, основанный на принципах нечеткой логики, предназначен для анализа и оценки остаточного ресурса службы бумажной изоляции в силовых масляных трансформаторах.

Реализация программного продукта выполняется на основе алгоритма, который представляет следующую последовательность действий (рисунок 4.13):

1. Иницируется процесс с экстракции образцов изоляционного масла из трансформатора, за которым следуют лабораторные исследования на предмет определения содержания фурановых включений, а также газов CO и CO_2 , являющихся индикаторами деградации бумажной изоляции.

2. Первая встроенная подпрограмма применяет нечеткую логическую модель для аппроксимации оценки срока службы бумажной изоляции на основании анализируемых показателей.

3. Вторая подпрограмма объединяет данные с использованием альтернативной модели нечеткой логики для оценки текущего уровня износа.

4. Итоговый этап интегрирует выходные данные обеих подпрограмм в третью модульную подпрограмму, рассчитывающую остаточный ресурс бумажной изоляции, что представляет собой ключевой показатель состояния силового масляного трансформатора.

Данное программное решение отличается модифицированной нечеткой логической методологией, применяемой для прогнозирования состояния бумажной изоляции, что отражено в современных исследованиях по долговечности силовых масляных трансформаторов.

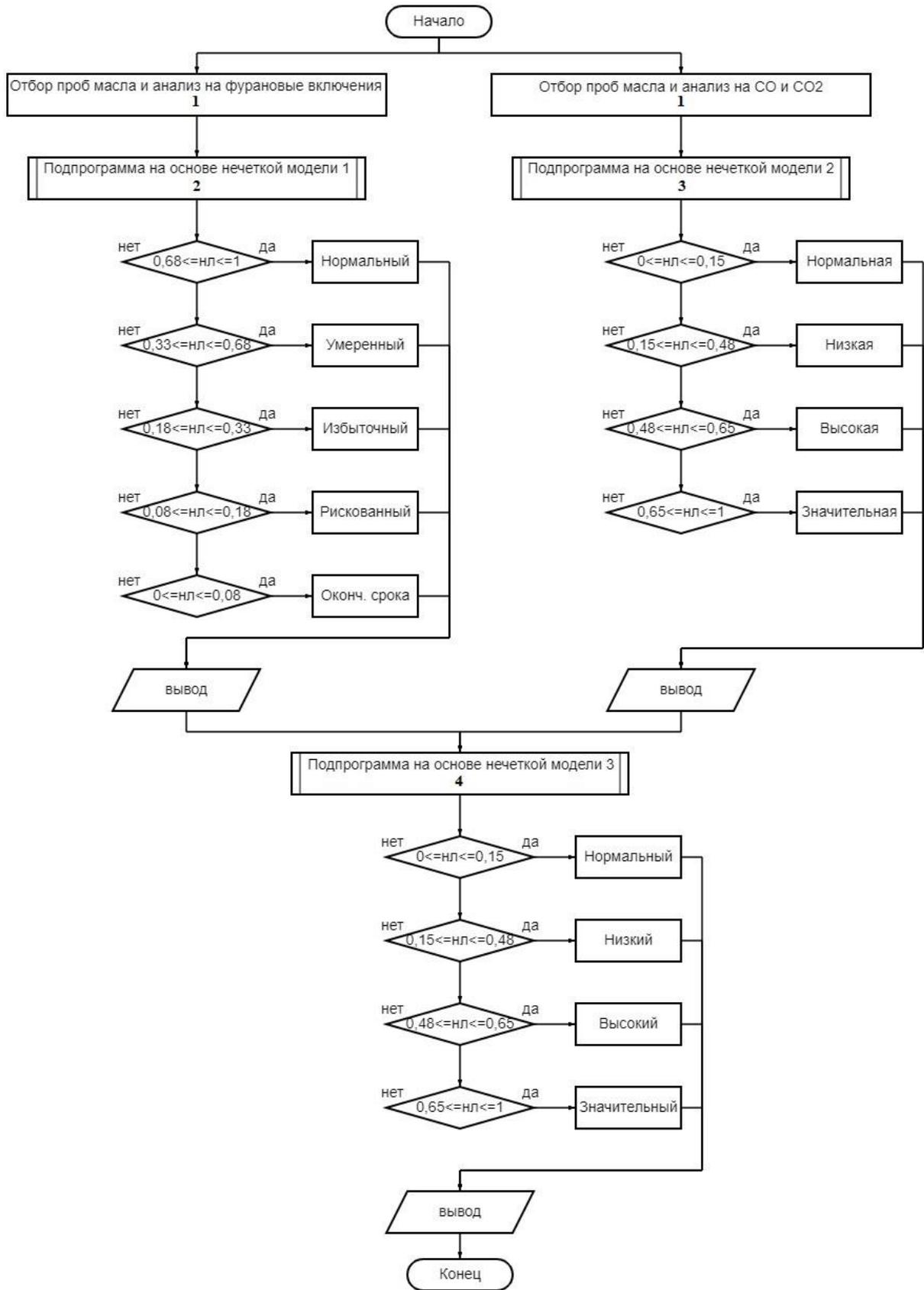


Рисунок 4.13 – Алгоритм программного продукта для определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов

Для наглядного представления возможностей и интерфейса созданной системы на рисунке 4.14 приведен скриншот рабочего окна программного продукта. На нем отображены основные функциональные возможности и пользовательский интерфейс, что позволяет оценить его работу и применение.

Концентрация фурановых включений	Отношение CO₂ к CO
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Скорость образования фурановых включений за месяц	Скорость образования CO в месяц
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Оценка срока службы бумажной изоляции	Оценка степени износа бумажной изоляции
Оценка срока службы бумажной изоляции	
<input type="text"/>	
Оценка степени износа бумажной изоляции	
<input type="text"/>	
<input type="button" value="Расчитать"/>	
<input type="text"/>	
Активность старения бумажной изоляции	

Рисунок 4.14 – Рабочий интерфейс программного продукта определения остаточного ресурса бумажной изоляции силовых масляных трансформаторов

В процессе ввода данных используется специальный интерфейс программного окна, предназначенный для каждого измеренного параметра. Единица измерения концентрации фурановых включений, CO и CO₂, применяемая в программном продукте, определена как ppm. После ввода

данных требуется инициировать расчет, нажав на соответствующую кнопку. На основании введенных данных производится анализ остаточного ресурса бумажной изоляции, результаты которого отображаются в поле "Активность старения бумажной изоляции". Для иллюстрации работы программного продукта, в качестве примера, использовался протокол ХАРГ бездефектного трансформатора ТДНГ-31500/110/6 зав. № 57379, год выпуска 1961, после капитального ремонта. В протоколе ХАРГ отражены следующие концентрации растворенных газов: 2-фурфурол = 1,36 ppm, CO = 157 ppm, CO₂ = 2430 ppm, скорость образования CO = 0 ppm. Пример расчета показан на рисунке 4.15.

Концентрация фурановых включений	Отношение CO₂ 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 4.15 – Пример расчета остаточного ресурса бумажной изоляции

В результате расчета выявлена «Нормальная» активность старения бумажной изоляции, что подтверждается фактическим осмотром трансформатора после капитального ремонта.

Таким образом, разработанный программный продукт на основе нечеткой логики [34] предназначен 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.

4.7 Выводы по 4 главе

1. 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.

2. 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 эксплуатации.

3. Разработанные прикладные программные продукты предназначены для автоматизации процессов оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов. Интеграция данных ХАРГ в программные продукты позволяет формировать отчеты о текущем состоянии трансформаторов, тем самым улучшая процессы диагностики дефектов. Упрощенный пользовательский интерфейс, разработанный на базе ряда

программно-вычислительных решений, таких как MATLAB и пакет для работы с нечеткой логикой Fuzzy logic, а также язык программирования JavaScript, обеспечивает доступность и удобство использования программного обеспечения для специалистов различного уровня подготовки.

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; ИЕС 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, ИЕС 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 способствовало совершенствованию методов диагностики силовых масляных трансформаторов, повысило 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.

Список используемой литературы

1. Башмаков, А.И. Интеллектуальные информационные технологии: учебное пособие / А.И. Башмаков. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 304 с.
2. Беркинблит, М.Б. Нейронные сети / М.Б. Беркинблит. Москва: МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993. – 96 с.
3. Бибаев, А.Б. Основы программирования на JavaScript / А.Б. Бибаев, А.С. Самойленко. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 320 с.
4. 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. – DOI 10.34831/EP.2024.94.26.002. – EDN CIESVF.
5. 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).
6. 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. – EDN FQHIUO.
7. 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. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-3-36-42. – EDN OIJSTO.

8. Виноградова, Л.В. Хроматографический анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов / Л.В. Виноградова, Е.Б. Игнатъев, Ю.М. Овсянников, Г.В. Попов. – И.: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2013. – 104 с.

9. Герман, О.В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний / О.В. Герман. – Мн.: ДизайнПРО, 1995. – 255 с.

10. Гифт, Н. Прагматичный ИИ. Машинное обучение и облачные технологии / Н. Гифт. – СПб.: Питер, 2019. – 300 с.

11. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. Москва: Физматлит, 2006. – 320 с.

12. Глушков, В.П. MATLAB. Теория и практика / В.П. Глушков. Москва: Диалектика, 2018. – 360 с.

13. Головкин, С.А. Современные методы диагностики трансформаторов по анализу газов в масле / С.А. Головкин. Москва: Энергоатомиздат, 2013. – 288 с.

14. Голоднов, Ю.М. Контроль за состоянием трансформаторов / Ю.М. Голоднов. Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.

15. Голубев, В.Л. MATLAB: основы разработки приложений / В.Л. Голубев. Москва: Горячая линия - Телеком, 2010. – 416 с.

16. Гольдшмидт, С.А. Анализ газов в масле трансформаторов / С.А. Гольдшмидт. Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

17. Гордиенко, В.И. Теория нечетких множеств и её приложения / В.И. Гордиенко. Санкт-Петербург: Питер, 2001. – 352 с.

18. ГОСТ-11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

19. Давиденко, И.В. Информационные технологии в организации диагностики силового электрооборудования / И.В. Давиденко // Электрика, 2004. № 7. С. 21 – 25.

20. Давиденко, И.В. Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле / И.В. Давиденко, К.В. Овчинников // Электротехника. – 2019. – № 4. – С. 48 – 54.
21. Дакетт, Д. JavaScript и jQuery. Интерактивная веб-разработка / Д. Дакетт. Москва: Издательство «Э», 2017. – 640 с.
22. Зайченко, Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. Киев: «Издательский Дом «Слово», 2008. – 344 с.
23. Захаров, А.В. Корреляционные характеристики диагностических параметров газов, растворенных в масле, при нормальном режиме работы трансформатора / А.В. Захаров // НРЭ, 2002. № 1. С. 36 – 40.
24. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981.
25. Кондрашов, В. Matlab как система программирования научно-технических расчетов / В. Кондрашов, С. Королев. – М.: Мир, Институт стратегической стабильности Минатома РФ, 2002.
26. Королев, В.Ю. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Ю. Королев. – М.: Проспект, 2006.
27. Костерев, Н.В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н.В. Костерев, Е.И. Бардик // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки», Київ. 2006. Ч. 3. С. 39 – 43.
28. Курбатова, Е.А. MATLAB 7. Самоучитель / Е.А. Курбатова. М.: Вильямс, 2006. – 256 с.
29. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
30. Макфарланд, Д. JavaScript и jQuery: современные технологии веб-разработки / Д. Макфарланд. Санкт-Петербург: Питер, 2021. – 624 с.
31. Мамдани, Э.Х. Нечеткие множества и системы. Принципы и применение / Э.Х. Мамдани, С. Ассилин. Москва: Мир, 1982. – 320 с.

32. 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. – EDN PQRWPQ.

33. Марков, Е.В. Разработка модели нечеткой логики по методу Дорненбурга для определения дефектов в силовых масляных трансформаторах / Е.В. Марков // VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники».

34. 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.

35. Марков, Е.В. Программа для определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе нечеткой логики по методу IEC 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. Овчинников, К.В. Анализ точности методов идентификации вида дефекта трансформатора по результатам АРГ / К.В. Овчинников, И.В. Давиденко // Тр. второй науч.-техн. конф. молодых ученых Урал. энергет. ин-та. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2017. – С. 273 – 276.

40. Педри, В. Основы нечеткой логики и систем управления / В. Педри. Москва: Физматлит, 2003. – 208 с.

41. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле

42. Роджерс, Р.Р. Анализ газов в масле трансформаторов и интерпретация данных для диагностики / Р.Р. Роджерс // Электрическая изоляция и диагностика. 1980. – С. 105 – 115.

43. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.

44. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньски, Л. Рутковский. Москва: Горячая Линия-Телеком, 2004. – 452 с.

45. Системы с нечеткой логикой: понятное объяснение и основные свойства [Электронный ресурс] / URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/sistemy-s-nechetkoj-logikoj> (дата обращения 21.05.2024).

46. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу

вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Київ. – 2007. – 92 с.

47. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования.

48. СТО 70238424.17.220.20.007-2009. Системы и устройства диагностики состояния оборудования подстанций и ЛЭП. Условия создания. Нормы и требования.

49. Тэрано, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. Москва: Мир, 1993. – 368 с.

50. Хальясмаа, А.И. Методы интерпретации результатов хроматографического анализа масла трансформаторного оборудования / А.И. Хальясмаа, В.К. Овчинников // Вестник КГЭУ. 2021. №1 (49).

51. Хальясмаа, А.И. Разработка системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.14.02 / Хальясмаа Александра Ильмаровна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет»], 2015.

52. Хохлов, М.В. Устойчивость динамической нейронной сети для оценивания состояния электроэнергетических систем / М.В. Хохлов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике, 2002. С. 166 – 169.

53. Чалис, Р. JavaScript: Шаблоны / Р. Чалис. Москва: Вильямс, 2018. – 352 с.

54. Шабунин, Л.В. Математическая логика. Логика высказываний и логика предикатов / Л.В. Шабунин. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003.

55. Штовба, С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С.Д. Штовба. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2001. – 756 с.

56. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

57. Шутенко, О.В. Анализ достоверности распознавания типов дефектов трансформаторов при использовании отношений пар газов и графических образов объектов / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, Т.А. Острикова, Н.Ю. Мельник // Вісник Національного технічного 178 університету "ХПІ". Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2013. – № 17. – С. 180 – 189.

58. Akbari, A. A Software Implementation of the Duval Triangle Method / A. Akbari, A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach // In Proceedings of the The 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, 9–12 June 2008.

59. ASTM D-3612-02. American Society for Testing and Materials: Standard test method for analysis of gases dissolved in electrical insulating oil by gas chromatography, ASTM International, Pennsylvania, USA, 2009.

60. ASTM D3612-02. Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. ASTM Standard, 2009.

61. ASTM D5837-12. Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). ASTM Standard, 2012.

62. Bakar, N.A. A review on chemical diagnosis techniques for transformer paper insulation degradation / N.A. Bakar, A. Abu-Siada, S. Islam // Australasian Universities Power Engineering Conference. AUPEC. – 2013. – P. 1 – 5.

63. Bardyk, E. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data / E. Bardyk, N. Bolotnyi // Eastern-european journal of enterprise technologies. Kharkiv, 2017. Vol. 6/8 (90). P. 4 – 10.

64. Bartley, W.H. An Analysis of Transformer Failures, Part 2: Causes, Prevention and Maximum Service Life / W.H. Bartley // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – Vol. 9, No. 4. – P. 44 – 48.

65. Beauchemin, C. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers / C. Beauchemin, D. Platts, N.A. Field // IEEE StandARCd C57.104-2019. – 2019.
66. Bureau of Reclamation. FIST 3-31, Transformer Diagnostics / Bureau of Reclamation // Hydroelectric Research and Technical Services Group. Colorado. USA. – 2003. – P. 1 – 62.
67. Chang, C. Fuzzy-Neural Approach for Dissolved Gas Analysis of Power Transformer Incipient Faults / C. Chang, C. Lim, Q. Su // Australian Universities Power Engineering Conference. Brisbane, Australia. 2004.
68. Chow, M.Y. Fuzzy Systems in CRC Press Industrial / M.Y. Chow, D. Irwin. Electronics Handbook, 1996.
69. Cigre. IEC/CEI 60599 – Guide for the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2007.
70. De Pablo, A. Application of Dornenburg Ratios to Transformer Maintenance / A. De Pablo, B. Garcia // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 35, No. 1. – P. 12 – 19.
71. Ding, X.Q. Online transformer winding fault monitoring and condition assessment / X.Q. Ding, H. Cai // Electrical Insulating Materials, Proc. ISEIM, 2001. – P. 801 – 804.
72. Dornenburg, E. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis / E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61. – P. 238 – 247.
73. Duval, M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers / M. Duval // IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 3, May/June 2002. – P. 8 – 17
74. Duval, M. Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers – The interpretation of gas analysis data / M. Duval // IEEE PAS Conference. № C 74 476-8. 1974.

75. Duval, M. Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis / M. Duval, J. Dukarm // IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 21. № 4. 2005. – P. 21 – 27.
76. Duval, M. Dissolved Gas Analysis: It can save your transformer / M. Duval // IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol., 5 (6). 1989.
77. Duval, M. DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria / M. Duval, I. Hoehlein, F. Scatiggio // Technical Brochure №443. CIGRE. – 2010. – P. 1 – 33.
78. Duval, M. New techniques for dissolved gas in oil analysis / M. Duval // IEEE Electr. Insul. Mag. 2003, 19. – P. 6 – 15.
79. Duval, M. The Duval Triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers / M. Duval // IEEE Electr. Insul. Mag. 2008, 24. – P. 22 – 29.
80. Faiz, J. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review / J. Faiz, M. Soleimani // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2017, 24. – P. 1239 – 1248.
81. Gonzalez, F. Transformer Oil Analysis: A Practical Guide for Diagnosing Transformer Condition Using Dissolved Gas Analysis /F. Gonzalez. New York: McGraw-Hill, 2005. 256 p.
82. Gradnik, K.M. Physical-Chemical Oil Tests, Monitoring and Diagnostic of Oil-filled Transformers / K.M. Gradnik // Proceeding of 14th International Conference on Dielectric Liquids. Austria. July 2002.
83. Hunt, B.R. MATLAB R2007 с нуля! / B.R. Hunt. – М.: Лучшие книги, 2008, 352 с.
84. IEC Standards 60300-3-11. Application guide – Reliability-centered maintenance. – Mars, 1999. – 54 p.
85. IEC Standard 60567. Guide for the sampling of gases and of oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases. 2005.

86. IEC Standard 60567. Oil-filled electrical equipment-Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases-Guidance / Commission Electrotechnique Internationale. Third edition. – 2005-06.

87. IEC Standard 60599. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. 2007.

88. Irungu, G.K. Application of Dissolved Gas Analysis in Assessing Degree of Healthiness or Faultiness with Fault Identification in Oil-Immersed Equipment / G.K. Irungu, A.O. Akumu // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(18). – Article 4770. – P. 1 – 24.

89. Islam, S.M. A Novel Fuzzy Logic Approach to Transformer Fault Diagnostics / S.M. Islam, T. Wu, G. Ledwich // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 7, no. 2, 2000.

90. Kovancic, Z. Fuzzy Controller Design —Theory and Applications in CRC / Z. Kovancic, S. Bogdan // Press Taylor and Francis Group, 2006. – P. 75 – 90.

91. Lin, C.E. An Expert System for Transformer Fault Diagnosis and Maintenance Using Dissolved Gas Analysis / C.E. Lin, J.M. Ling, C.L. Huang // *IEEE Winter Meeting*, 1992.

92. Lindquist, R. Transformer Reliability and Condition Assessment: The Utility Perspective / R. Lindquist, C. Bengtsson // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1999. – Vol. 14, No. 4. – P. 1483 – 1486.

93. Malik, H. An expert system for incipient fault diagnosis and condition assessment in transformer / H. Malik, V. Tarkeshwar, R.K. Jarial // *IEEE international conference on computational intelligence and communication systems*, 2011. – P. 138 – 142.

94. McGrail, T. On-line gas sensors, Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers / T. McGrail, A. Wilson // *IEE Colloquium*, Digest No: 086pp. 1/1 – 1/4, 1997.

95. McNutt, W.J. Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides / W.J. McNutt // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, No. 1. – P. 392 – 401.
96. Mori, E. Latest Diagnostic Methods of Gas-in-Oil Analysis for Oil-filled Transformer in Japan / E. Mori, H. Tsukioka, K. Takamoto, N. Miyamoto, T. Kobayashi, S. Kobayashi, H. Okubo // Proceedings of the 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 99), Japan.
97. Pahlavanpour, B. Transformer oil analysis and its application in condition monitoring / B. Pahlavanpour // Electrical Insulation Conference. – 1999. – P. 57 – 61.
98. Poonnoy, N. Fuzzy Logic Approach to Dissolved Gas Analysis for Power Transformer Failure Index and Fault Identification / N. Poonnoy, C. Suwanasri, T. Suwanasri // Energies. – 2020. – Vol. 14(1), № 36. – P. 1 – 17.
99. Poonnoy, N. Fuzzy Logic Approach to Dissolved Gas Analysis for Power Transformer Failure Index and Fault Identification / N. Poonnoy, C. Suwanasri, T. Suwanasri // Energies 2021, 14, 36.
100. Pradhan, M.K. Criteria for estimation of end of life of power and station transformers in service / M.K. Pradhan, T.S. Ramu //, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Annual Report Conference, 2004. – P. 220 – 223.
101. Rogers, R.R. A Review of the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers / R.R. Rogers // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1995. – Vol. 11, No. 5. – P. 16 – 23.
102. Rogers, R.R. IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas in oil analysis / R.R. Rogers // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1978. – P. 349 – 354.
103. Saravanan, D. Fault Prediction of Transformer Using Machine Learning and DGA / D. Saravanan, A. Hasan, A. Singh // IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Galgotias University, Greater Noida, UP, India. Oct. 2-4, 2020. – Greater Noida, UP, India, 2020. – P. 1 – 5.

104. Siva Sarma, D.V.S.S. Approach for Condition Monitoring of Power Transformers using DGA / D.V.S.S. Siva Sarma, G. Kalyani // IEEE Region 10 Conference. 2004. – P. 444 – 447.

105. Suleiman, A.A. Improving the accuracy of DGA interpretation of oil-filled power transformers needed for effective condition monitoring / A.A. Suleiman // IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, 2012. – 20 p.

106. Taha, I.B.M. Transformer fault types and severity class prediction based on neural pattern-recognition techniques / I.B.M. Taha, S.S. Dessouky, S.S.M. Ghoneim // Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 191. – Article 106899. – P. 1 – 12.

107. TP. SS 02.35 Transpower. Insulating oil-acceptance criteria, monitoring and treatment. Issue 5, Transpower New Zealand Ltd, Wellington, New Zealand, January 2012.

108. 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., doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553816.

109. Wang, L.X. Generating fuzzy rules by learning from examples / L.X. Wang, J.M. Mendel // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. – 1992. – Vol. 22, № 6. – P. 1414 – 1427.

Приложения

Приложение 1. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024661033

Программа для определения остаточного ресурса
бумажной изоляции силовых масляных
трансформаторов по результатам ХАРГ

Правообладатель: *Марков Евгений Валерьевич (RU)*Автор(ы): *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Заявка № 2024660022

Дата поступления 02 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 мая 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение 2. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024664619

Программа для определения дефектов силовых
масляных трансформаторов на основе нечеткой логики
по методу «Ключевого газа» по результатам ХАРГ

Правообладатель: *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Марков Евгений Валерьевич (RU)*



Заявка № 2024663441

Дата поступления 13 июня 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 июня 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429f6b0f63853164ba196f83b73b4aa7
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение 3. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667822

Программа для определения дефектов силовых
масляных трансформаторов на основе нечеткой логики
по методу «Роджерса» по результатам ХАРГ

Правообладатель: *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Марков Евгений Валерьевич (RU)*



Заявка № 2024666407

Дата поступления 12 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6b0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец: *Зубов Юлий Сергеевич*
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

**Приложение 4. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024663348

**Программа для определения дефектов силовых
масляных трансформаторов на основе нечеткой логики
по методу ИЕС 60599 по результатам ХАРГ**

Правообладатель: *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Марков Евгений Валерьевич (RU)*



Заявка № **2024662040**

Дата поступления **20 мая 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **05 июня 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6b0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение 5. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024681035

Графическая программа для определения дефектов
силовых масляных трансформаторов на основе метода
треугольника Дюваля

Правообладатель: *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Марков Евгений Валерьевич (RU)*

Заявка № 2024668937

Дата поступления 09 августа 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 сентября 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7e1a2300b154424016708cc2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение 6. Справка о внедрении основных результатов научно-технической деятельности в практику ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор»

СПРАВКА

**О ВНЕДРЕНИИ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРАКТИКУ ООО «ЭНЕРГОСОЮЗСТРОЙ –
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ТРАНСФОРМАТОР»**

Настоящей справкой подтверждается, что разработанные Марковым Е.В. программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах, использующие нечеткие модели, применяются в практике ООО «Энергосоюзстрой – Тольяттинский трансформатор» при проведении диагностических мероприятий силовых масляных трансформаторов.

Разработанные Марковым Е.В. программные продукты для распознавания дефектов в силовых масляных трансформаторах, использующие нечеткие модели позволяют не только повысить точность определения дефектов, но и открыть возможности для более эффективного управления жизненным циклом силового оборудования.

Начальник отдела диагностики и испытаний

С.Б. Мельничук

