

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

На правах рукописи

Хальясмаа Александра Ильмаровна

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-
НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических
наук, доцент
С. Е. Кокин

Екатеринбург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	10
1.1 Современные методы оценки технического состояния.....	10
1.2 Предпосылки применения методов оценки технического состояния	15
1.3 Современные системы оценки технического состояния.....	21
1.4 Оценка эффективности работы современных систем.....	22
1.5 Выводы.....	32
2 АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И МОДЕЛЬ ДАННЫХ.....	33
2.1. Система поддержки принятия решений.....	33
2.2. Архитектура системы оценки технического состояния.....	37
2.3. Модель данных.....	47
2.4. Выводы:.....	51
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	53
3.1. Определение структурной модели оценки технического состояния электрооборудования.....	53
3.2. Структура нейро-нечеткого логического вывода и алгоритм его работы.....	57
3.3. Формирование функций принадлежности.....	59
3.2.1 Определение нечетких правил продукции.....	59
3.2.2 Определение числа функций принадлежности.....	61
3.2.3 Определение вида функций принадлежности.....	61
3.4. Настройка модели оценки технического состояния на примере оценки состояния трансформаторного оборудования.....	69
3.4.1. Определение структуры нейро-нечеткого-логического вывода.....	69
3.4.2. Определение функций принадлежности.....	69
3.4.3. Формирование обучающей выборки.....	88

3.5. Сравнительный анализ с нейронной сетью.....	93
3.6. Определение результирующей оценки технического состояния простого объекта электрической сети.....	95
3.7. Выводы.....	98
4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	100
4.1 Оценка состояния работы системы.....	101
4.2 Оценка состояния трансформаторного масла.....	101
4.3 Оценка состояния магнитопровода трансформатора.....	107
4.4 Оценка состояния твердой изоляции трансформатора.....	109
4.5 Оценка состояния обмоток трансформатора.....	111
4.6 Оценка состояния силового масляного трансформатора.....	116
4.7 Выводы.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	124
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Обучающая выборка.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Разработка системы оценки технического состояния оборудования на электрических станциях и подстанциях является актуальной задачей.

Во-первых, она связана с высокой степенью износа электросетевого оборудования в России. Существенная часть основного оборудования выработала установленный парковый ресурс или срок эксплуатации, определенный нормативными документами, и используется на пределе своих возможностей.

Во-вторых, существует безусловное взаимное влияние электросетевого оборудования не только внутри одной подстанции (станции), но и внутри энергосистемы в целом, что оказывает действие на состояние и режимы работы оборудования. Степень этих взаимовлияний и их закономерности можно определить только при обобщенной оценке состояния всего оборудования электросетевого объекта.

В-третьих, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью перехода к системе обслуживания оборудования по его техническому состоянию, а не на базе системы планово-предупредительных ремонтов (ППР). Основным недостатком системы ППР заключается в отсутствии комплексного подхода к обслуживанию электрооборудования, что может привести к необоснованной трудоемкости ремонтов оборудования (в случае работоспособного и ремонтпригодного состояния) или, наоборот, – к пропуску дефекта или неисправности (в случае работоспособного, но неремонтпригодного состояния).

Сегодня в электроэнергетике активно развивается информационно-измерительная база на основе современных измерительных комплексов, обеспечивающих сбор, обработку и хранение информации с различных датчиков и систем мониторинга отдельных видов оборудования, данные с которых получают в режиме on-line. Такие комплексы обеспечивают однозначное определение контролируемых параметров и оценку влияния их

изменения как на само оборудование, а при анализе полученных данных и на работу энергообъекта в целом. Такая информация весьма ценна и более достоверна в сравнении с данными, полученными в ходе диагностирования при выведенном из работы оборудовании. Она позволит повысить степень достоверности оценки технического состояния оборудования.

Между тем, увеличение объема анализируемой информации о состоянии оборудования ведет к значительным изменениям в методах работы и требует не только автоматизации процессов обработки и анализа данных, но и их интеллектуализации. Интеллектуализация связана как с необходимостью использования эксплуатационного опыта (в виде экспертных оценок), так и получения объективных оценок состояния оборудования вне зависимости от квалификации персонала.

Кроме того, в условиях изменившейся рыночной конъюнктуры появилась необходимость в новой системе управления энергетическими предприятиями – оптимизационной системе управления электросетевыми активами. Эффективная реализация такой системы предполагает достижение оптимального результата при минимальных затратах, а значит, возможна только на базе технически обоснованных характеристик состояния: объемов ремонтов, замены, реконструкции и обслуживания оборудования.

Таким образом, определение «слабых мест» в системе электроснабжения для электроэнергетических предприятий – первоочередная задача, как с технической, так и с экономической точки зрения, что, безусловно, подчеркивает актуальность темы данной работы.

Степень разработанности. Изучению проблем, связанных с оценкой технического состояния электросетевого оборудования, уделяется большое внимание, что отражено в работах по техническому диагностированию [1,2,3,4,5]. В России значительный вклад в развитие методов оценки технического состояния электросетевого оборудования внесли П. М. Сви, В. П. Вдовико, В. А. Русов, М. Ю. Львов, Б. А. Алексеев, А. Г. Овсянников, Л. А. Дарьян, В. Н. Осотов и др., а в разработку современных экспертных

систем на основе данных технического диагностирования электросетевого оборудования - А. И. Таджибаев, А. Н. Назарычев, А. Ю. Хренников, И В. Давиденко, Г. В. Попов и др. Ввиду актуальности данной тематики в представленной диссертационной работе отдельный раздел посвящен анализу современных методов и систем оценки состояния электросетевого оборудования на электрических станциях (ЭС) и подстанциях (ПС).

Объектом исследования являются элементы электроэнергетической системы, связанные непрерывностью процессов производства, передачи и распределения электрической энергии.

Предметом исследования является оценка технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода.

Цель и задачи работы – совершенствование системы оценки технического состояния электросетевого оборудования с применением интеллектуальных методов обработки информации, формализации знаний и опыта экспертов, а также автоматизации процесса принятия решений.

Научная новизна работы связана со следующими основными научными положениями и результатами:

- Доказана возможность решения задачи комплексной оценки технического состояния сложного объекта электрической сети на основе нейро-нечеткого логического вывода и обоснована возможность ее определения с использованием агрегированной доступной информации об объекте исследования и формализованных экспертных знаний с учетом эксплуатационного опыта;

- Обоснована возможность реализации разработанной модели оценки технического состояния на основе данных технической диагностики и методов испытаний электрооборудования;

- Разработаны структуры нейро-нечеткого логического вывода на основе адаптированного метода Такаги-Сугено для оценки технического

состояния, как элементов электрооборудования, так и комплексных объектов электрической сети;

- Решена задача определения оптимальных функций принадлежности и нечетких правил оценки технического состояния объектов электрической сети для поиска возможных неисправностей (дефектов) в элементах электрооборудования.

- Получено новое решение задачи определения оптимальных условий организации эксплуатации электрооборудования в зависимости от его технического состояния.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в получении технически-обоснованных решений по эксплуатации оборудования на базе разработанной системы оценки его технического состояния с применением интеллектуальных методов обработки информации, а также возможности самообучения и самонастройки разработанной системы с сохранением алгоритма работы при изменении параметров оборудования.

Методология и методы исследования. Методом исследования при выполнении диссертационной работы являлось математическое моделирование. Исходными данными являлись данные технического диагностирования электрооборудования, полученные в ходе испытаний оборудования. В качестве инструмента моделирования применялся программный комплекс MATLAB. При разработке модели использовались методы искусственного интеллекта - на основе нейро-нечеткого логического вывода, объединяющего в себе методы нечеткой логики и искусственных нейронных сетей.

Обоснованность и достоверность. Результаты диссертационной работы получены при корректном и обоснованном применении методов нечеткой логики и искусственных нейронных сетей и подтверждаются согласованностью с результатами, полученными на основе эмпирических выводов и экспертных оценок.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Основные принципы формирования системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода с использованием нормативных критериев и формализованных экспертных знаний, учитывающих эксплуатационный опыт.

- Новые математическая и структурная модели оценки технического состояния электросетевого оборудования на подстанциях на базе агрегированной доступной информации об исследуемом объекте с помощью нейро-нечеткого логического вывода.

- Новая структура и алгоритм работы нейро-нечеткого логического вывода на основе адаптированного метода Такаги-Сугено для оценки технического состояния силового масляного трансформатора 110 кВ по данным технической диагностики и испытаний.

Апробация работы. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и Российских научно-технических конференциях, а именно: Электроэнергетика глазами молодежи, 2010, Екатеринбург (Россия); Электроэнергетика глазами молодежи, 2012, Екатеринбург (Россия); 3rd International Conference on Power and Energy Systems, 2013; Париж (Франция) International Conference on Advances in Energy and Environmental Science, ICAEES 2013, Гуанчжоу (Китай); 6th IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, AsiaPES 2013, Пхукет, (Тайланд); 1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy, 2014, Екатеринбург (Россия) и других.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 статей, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ, а также 3 статьи включенных в базы научного цитирования Web of science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Общий объем работы составляет 147 страниц и включает 101 библиографическое наименование.

1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Современные методы оценки технического состояния

В настоящее время особенно остро стоят вопросы оценки состояния электротехнического оборудования на ЭС и ПС. Это во многом связано с тем, что существенная часть основного электросетевого оборудования выработала установленный парковый ресурс или срок эксплуатации, определенный нормативными документами, и используется на пределе своих возможностей [6,7,8].

Для оценки состояния электросетевого оборудования ЭС и ПС используется мониторинг при помощи комплекса аппаратных и программных средств. Такой комплекс предназначен для регистрации различной информации о параметрах оборудования и его составных элементов, условиях их эксплуатации и пр., а также для выполнения анализа состояния оборудования на основе полученных данных.

Следует отметить, что стоимость системы мониторинга основного оборудования составляет около 5–8 % от стоимости электросетевого объекта. Учитывая сокращение затрат, связанное с плановыми и аварийными ремонтами оборудования, срок окупаемости таких систем не превышает пяти лет [9].

Однако даже при таких сроках окупаемости и достаточно умеренной стоимости экономическая (а иногда и техническая) возможность установки системы мониторинга на каждом объекте ПС зачастую отсутствует, особенно на ПС в небольших городах или поселках. В таких случаях хорошей альтернативой подсистеме мониторинга, связанной с оценкой состояния электросетевого оборудования, может служить система анализа данных технической диагностики и испытаний и/или любой доступной информации об электросетевом оборудовании, полученной в ходе его эксплуатации.

Существуют различные определения диагностики (процесса диагностирования) и мониторинга электрооборудования.

В контексте настоящей диссертационной работы уместно воспользоваться определением *диагностики* как интеллектуальной группировки связанных данных, включающих статистику значений и тренды (изменения), которые впоследствии обрабатываются экспертной системой для выдачи конкретной информации о состоянии оборудования и рекомендуемых мероприятий. Определить *мониторинг* можно как накопление базисных данных [10].

Основной целью технического диагностирования в первую очередь является *распознавание состояния объекта в условиях ограниченной информации и, как следствие, оценка остаточного ресурса системы (оборудования) и повышение ее надежности* [11]. Различные технические системы имеют различную структуру и назначение, поэтому нельзя ко всем системам применять один и тот же вид технического диагностирования.

В данной работе под системой мониторинга подразумевается именно оценка технического состояния основного электрооборудования, без учета подсистем общесистемных средств управления (релейной защиты и противоаварийной автоматики, регистрации аварийных событий и процессов контроля качества электроэнергии и т.п.).

Безусловно, система мониторинга по сравнению с системой анализа данных технического диагностирования обладает рядом технических преимуществ:

- 1) возможностью диагностирования электрооборудования под напряжением;
- 2) контролем фактического состояния оборудования в темпе процесса;
- 3) высокой достоверностью выходных данных;
- 4) возможностью хранения выходных данных (параметров и характеристик оборудования), что позволяет выявить зависимости и взаимосвязи между событиями.

В плане оценки состояния электрооборудования для определения, например, интегральной оценки состояния ПС, система мониторинга имеет ряд недостатков:

- 1) система мониторинга очень редко включает в себя исчерпывающий набор данных по всему электрооборудованию действующего объекта. Она направлена на мониторинг основных узлов – силовых трансформаторов, коммутационного (реже – вспомогательного) оборудования;
- 2) выходная информация представляет собой набор данных, анализ и обработка которых составляют отдельную задачу, решение которой требует соответствующего математического аппарата с его программной реализацией.

Кроме того, для установки системы мониторинга на ЭС и ПС должны существовать определенные условия:

- оборудование должно иметь сравнительно высокую стоимость;
- предполагаемый ущерб от недоотпуска электрической энергии при отказе такого оборудования должен быть значительным;
- диагностическое обследование такого оборудования под нагрузкой не может быть оперативно и надежно произведено мобильными переносными средствами и требует существенно более дорогостоящего диагностического оборудования [11]. Примером может послужить анализ состояния гидроагрегатов, когда необходимо обеспечивать одновременный контроль температурных, электрических, механических и других параметров.

Из сказанного следует, что использование систем мониторинга для каждой единицы электросетевого оборудования, например, на проходных и тем более ответвительных и тупиковых ПС, выполненных с использованием упрощенных схем, ни технически, ни экономически не оправданно. Но поскольку выполнение анализа технического состояния всех объектов электросетевого комплекса необходимо, в данной диссертационной работе в качестве системы оценки технического состояния электросетевого

оборудования ЭС и ПС предлагается система на основе анализа данных технического диагностирования и любой доступной информации об электросетевом оборудовании, полученной в ходе эксплуатации этого оборудования.

На сегодняшний день методы технического диагностирования (на основе методов неразрушающего контроля) и испытаний активно применяются для оценки состояния электрооборудования на ЭС и ПС.

Периодичность и объемы диагностирования и испытаний оборудования регламентированы [8]. Число, вид, значение и способы сбора данных различны и зависят от метода диагностирования и назначения оборудования.

Практически для любого вида и типа оборудования существует как минимум один метод неразрушающего контроля (испытаний), с помощью которого можно получить данные о состоянии оборудования с периодичностью проведения контроля не реже одного раза в год. Это дает возможность иметь ретроспективную информацию о параметрах состояния оборудования, что позволяет не только следить за динамикой изменения этих параметров, но и на основе ее анализа прогнозировать возможные неисправности и дефекты.

По общей классификации все методы диагностирования (контроля) электрооборудования можно разделить на две группы:

- методы неразрушающего контроля, которые не требуют разрушения образцов испытуемого материала (изделия);
- методы разрушающего контроля, которые требуют разрушения образцов испытуемого материала (изделия).

Все методы неразрушающего контроля можно разделить, опираясь на физические явления, на которых они основаны. Для электротехнического оборудования наиболее часто применяются следующие методы неразрушающего контроля, согласно [12]:

- 1) магнитный;

- 2) электрический;
- 3) вихретоковый;
- 4) радиоволновой;
- 5) тепловой;
- 6) оптический;
- 7) радиационный;
- 8) акустический;
- 9) проникающими веществами (капиллярный и течеискания).

Внутри каждого вида методы также классифицируются по дополнительным признакам.

Рассмотрим определения для каждого метода неразрушающего контроля, используемые в нормативной документации.

Магнитные методы контроля, согласно [13], основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий.

Электрические методы контроля, согласно [14], основаны на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контрольным объектом, или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия.

Вихретоковый метод контроля, согласно [15], основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящей части объекта контроля.

Радиоволновой метод контроля основан на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля [16].

Тепловые методы контроля, согласно [17], основаны на регистрации тепловых полей объекта контроля.

Визуально-оптические методы контроля, согласно [18], основаны на взаимодействии оптического излучения с объектом контроля.

Радиационные методы контроля основаны на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом [19].

Акустические методы контроля основаны на применении упругих колебаний, возбуждаемых в объекте контроля [20].

Капиллярные методы контроля, согласно [21], основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Стоит отметить, что согласно нормативной базе анализа состояния электросетевого оборудования не все перечисленные методы являются обязательными, часть из них носит рекомендательный характер.

К обязательным относятся следующие методы испытаний [8]:

- измерения сопротивления изоляции постоянному току и коэффициента абсорбции;
- измерение характеристик изоляции: тангенса угла диэлектрических потерь, емкости изоляции;
- испытание изоляции повышенным напряжением;
- испытание масла (физико-химический анализ);
- оценка влажности твердой изоляции и пр.

1.2 Предпосылки применения методов оценки технического состояния

Актуальность темы диссертации подтверждается особенностями энергетической отрасли [22] – высокой стоимостью оборудования и относительно длительным сроком его эксплуатации. Поэтому необходим комплексный контроль жизненного цикла оборудования, начиная с этапа производства оборудования.

В этом случае оценка технического состояния на определенных этапах жизненного цикла оборудования будет служить не только для определения состояния, но и для возможного продления срока жизни оборудования. Безусловно, осуществление контроля жизненного цикла оборудования на ранних стадиях проблематично, если предприятие не объединяет в себе функции производства и эксплуатации, поэтому его необходимо рассматривать как задачу, решаемую в условиях ограниченности информации и недостаточности исходных данных.

Моделирование жизненного цикла электрооборудования является тяжело реализуемой задачей, так как на любой стадии существует ряд факторов, влияние которых невозможно учесть или предсказать: человеческий фактор, окружающая среда (климатические условия), условия эксплуатации и т. п.

В практике контроль жизненного цикла электрооборудования осуществляется с момента его монтажа или установки.

Использование в разработанной системе не только методов испытаний электрооборудования, но и методов технического диагностирования позволяет получать часть данных в режиме мониторинга (без вывода оборудования из работы), а значит определять состояние оборудования в реальных эксплуатационных условиях с учетом протекания в нем различных физических процессов.

В рамках диссертационного исследования на основе статистических данных был проведен анализ влияния применения методов технического диагностирования на изменение жизненного цикла оборудования на примере силового трансформатора [23].

Результаты анализа представлены в виде функциональной зависимости состояния оборудования (с момента его ввода) от времени эксплуатации оборудования (Рис. 1).

Для описания состояния использовались не числовые значения, а лингвистические переменные, представленные четырьмя терминами [24]:

- исправное состояние D_1 , когда объект полностью отвечает всем требованиям нормативно-технической документации. Такое состояние считается работоспособным;

- неисправное, но работоспособное состояние D_2 , когда требованиям нормативно-технической документации соответствуют только те свойства объекта, от которых зависит его возможность выполнять заданные функции;

- неисправное и неработоспособное, но ремонтпригодное состояние D_3 , когда объект не может выполнять заданные функции, но переход в работоспособное состояние возможен при выполнении ремонта, который технически возможен и экономически целесообразен;

- неработоспособное и неремонтпригодное состояние D_4 , когда объект не может выполнять заданные функции, и переход в работоспособное состояние невозможен, так как выполнение ремонта технически невозможно или экономически нецелесообразно.

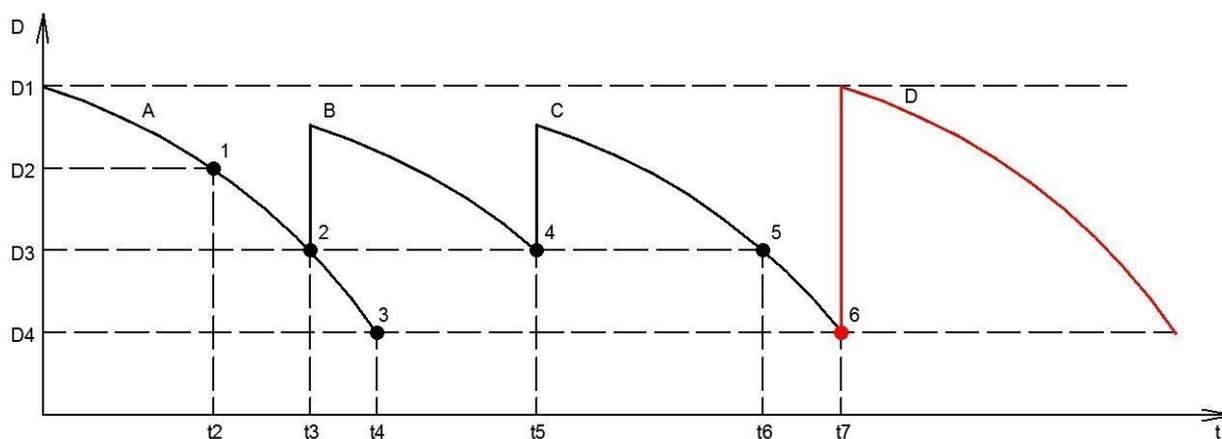


Рисунок 1 – Жизненный цикл оборудования без использования методов технической диагностики

На Рис. 1 жизненный цикл трансформатора начинается из состояния D_1 . Дальнейшая эксплуатация описывается кривой A вплоть до точки 2, которая соответствует первому капитальному ремонту, выполняемого согласно анализу статистических данных примерно через 12 лет после начала

эксплуатации трансформатора. Обычно состояние трансформатора на момент проведения капитального ремонта соответствует D_3 .

После первого капитального ремонта состояние трансформатора приближается к состоянию D_1 . Дальнейшая его эксплуатация описывается кривой B . Время второго капитального ремонта (точка 4) наступает чуть раньше первого и составляет около 10 лет, а состояние трансформатора на момент проведения второго капитального ремонта также соответствует состоянию D_3 .

После второго капитального ремонта эксплуатация трансформатора описывается кривой C . Каждый такой ремонт восстанавливает оборудование до исправного, но не первоначального состояния.

В примере учитываются только капитальные ремонты трансформатора (без учета текущих и т.п.), так как данный тип ремонта самый трудозатратный как с технической, так и с экономической точки зрения.

Затем оборудование достигает вновь состояния D_3 (точка 5), после чего уже экономически нецелесообразно проводить капитальный ремонт, а при достижении состояния D_4 (точка 6) производят полную замену трансформатора.

В данном примере представлена усредненная модель жизненного цикла трансформатора 110 кВ. Стоит заметить, что встречаются случаи, когда число капитальных ремонтов для трансформатора 110 кВ больше двух, а сроки проведения ремонтов могут отличаться от представленных в примере.

На Рис. 2 изображена графическая модель жизненного цикла трансформатора при использовании методов технического диагностирования. В этом примере для анализа влияния применения методов технического диагностирования на жизненный цикл оборудования были рассмотрены данные, полученные в результате тепловизионной диагностики.

Диагностирование оборудования производится на более раннем этапе – в промежутке между состояниями оборудования $D_1 - D_2$ (точка 1), а не в

предполагаемый момент обнаружения серьезного дефекта D_3 (точка 2). Поэтому на эксплуатацию, описываемую кривыми D , в отличие от предыдущего случая, мы выходим, начиная с точки 1, и не допускаем достижения состояния D_3 .

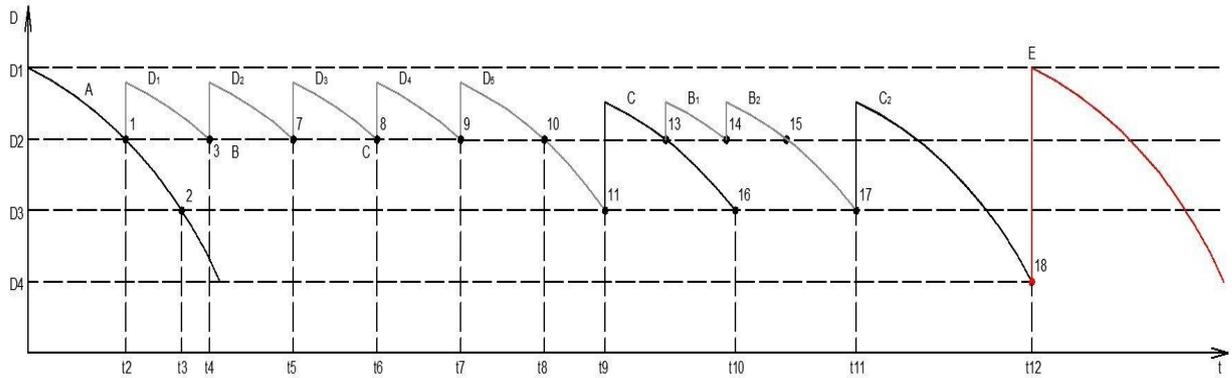


Рисунок 2 – Жизненный цикл оборудования при использовании методов технического диагностирования

Можно сказать, что основная задача технической диагностики – поддерживать состояние оборудования в интервале $D_1 - D_2$ путем оценки его технического состояния и определения места и вида неисправностей. Техническое диагностирование производится в среднем 1 раз в 4-5 лет, поэтому на графике изображено среднее число проводимых диагностик, равное 5 (в точках 1, 3, 7, 8, 9).

Как и на предыдущем рисунке в определенной точке оборудование вновь достигает состояния D_2 (точка 10), когда уже экономически нецелесообразно проводить диагностирование трансформатора, и после достижения состояния D_3 (точка 11) проводится капитальный ремонт.

После капитального ремонта эксплуатация описывается кривой C , возобновляется диагностирование оборудования, описываемое кривыми B_1 и B_2 . Время эксплуатации до первого капитального ремонта и между первым и вторым капитальным ремонтом значительно увеличивается.

Таким образом, основным достоинством использования методов технического диагностирования является существенное увеличение

предельного эксплуатационного срока электросетевого оборудования. А данные технического диагностирования позволяют получить достаточно полную картину технического состояния большей части оборудования ЭС и ПС.

Использование методов диагностирования для оценки технического состояния делает возможным не только корректировку жизненного цикла оборудования, но и продлевает его, значительно повышая надежность работы оборудования.

Как уже отмечалось, основной проблемой электросетевого оборудования в России является высокая степень его износа. Износ электросетевого оборудования и электрических сетей Федеральной сетевой компании превышает 48%, в том числе оборудования подстанций – 60%, линий электропередачи – 41,9% [25]. Поэтому вопросы оценки технического состояния такого оборудования должны решаться в первую очередь.

В рамках диссертационного исследования проводилось обследование части энергоузла Свердловской области по состоянию на 2012 г. [26], который включает в себя 92 ПС напряжением 35–110 кВ. Все подстанции расположены в черте крупных населенных пунктов и обеспечивают электроснабжение комплексной нагрузки, включая промышленных потребителей. Из 92 ПС рассматриваемого энергоузла 61 ПС оборудована системой телемеханики, 41 ПС – системой телеуправления, 12 ПС – системой телеизмерений, системы мониторинга отсутствуют на всех ПС.

Анализ состояния основного подстанционного электротехнического оборудования выявил существенное преобладание оборудования со сроком эксплуатации, превышающим нормативный. Доля оборудования, находящегося в эксплуатации более 30 лет, составляет 56% (Табл. 1).

За этой категорией оборудования должен быть установлен усиленный контроль состояния, что еще раз подчеркивает актуальность представленной диссертационной работы.

Таблица 1 - Оборудование со сроком эксплуатации более 30 лет

Вид оборудования	% от общего числа
Силовые трансформаторы	73
Силовые выключатели	47
Разъединители	76
Трансформаторы тока	38
Трансформаторы напряжения	55
Аккумуляторные батареи	28
Доля объектов от общего числа (оборудования), работающих свыше нормативного срока	56% (из 1198 единиц оборудования 670 работают сверх нормативного срока)

1.3 Современные системы оценки технического состояния

Современные системы оценки технического состояния электросетевого оборудования представляют собой автоматизированные экспертные системы, направленные, в основном, на решение двух видов задач – определение состояния оборудования с целью выявления дефектов и неисправностей и оптимизация управляющих воздействий на электросетевые объекты с целью повышения надежности работы оборудования и продления срока эксплуатации объектов [27].

Европейские системы, в отличие от российских, не ставят своей задачей продление срока службы электрооборудования, поскольку зарубежная практика предполагает замену оборудования после окончания его срока службы. Также существуют достаточно большие отличия в нормативной документации по обслуживанию, диагностике, испытаниям, составу оборудования и его эксплуатации, которые не позволяют использовать зарубежные системы оценки технического состояния оборудования для российских энергосистем.

В России подобных экспертных систем, используемых на реальных энергообъектах, крайне мало и большинство из них направлены в основном на решение задачи оценки состояния отдельных единиц оборудования, например, только трансформаторов или только выключателей.

В современной практике в зависимости от объема и полноты исходных данных, а также области применения для анализа данных технической

диагностики используются математические методы, более подробно описанные в [1]:

- логические методы распознавание кривых;
- методы разделения в пространстве признаков;
- методы, основанные на определении ценности признаков;
- методы, основанные на теории вероятности;
- методы, основанные на теории информации;
- статистические методы распознавания и др.

Каждый из методов обладает как достоинствами, так и недостатками. Однако использование большинства из них в реальных эксплуатационных системах затруднительно, так как при комплексной оценке состояния всех видов оборудования на ПС требуется решать по сути многокритериальную задачу принятия решений о дальнейшей эксплуатации оборудования на основе существующей, зачастую разнородной и неполной, информации.

В системах оценки состояния электросетевого оборудования, существующих на сегодняшний день, с точки зрения математической реализации используются или простые модели (например, как в системе управления производственными активами ОАО «Холдинг МРСК», разработанной ООО «АМС» на основе обычных правил продукции [28]), или более сложные (например, экспертная система оценки технического состояния электрооборудования ЭС и ПС «Диагностика+», основанная на методе Байеса [29], или экспертная система диагностики маслonaполненного оборудования «ЭДИС Альбатрос» [30, 31]).

Анализ функциональных возможностей современных экспертных систем и принципы их построения для диагностики состояния высоковольтного маслonaполненного оборудования рассмотрены в [32].

1.4 Оценка эффективности работы современных систем

Разработанная в рамках диссертационной работы система позиционируется как экспертная система для оценки состояния различных

видов электросетевого оборудования (не только маслонаполненного), поэтому наибольший интерес из существующих экспертных систем представляет система «Диагностика+», также предназначенная для анализа состояния практически любого вида подстанционного оборудования.

В рамках диссертационного исследования был выполнен анализ состояния силового трансформатора на основе данных технической диагностики для оценки возможности реализации системы, использующей подобно системе «Диагностика+» метод Байеса [33].

Согласно [1], используя метод Байеса, состояние объекта D_i и фактор k_i , который ассоциируется с данным состоянием, могут быть выражены через вероятности проявления фактора и вероятность состояния следующим образом:

$$\frac{P(D_i / k_i)}{P(k_i)} = P(D_i) \frac{P(k_i / D_i)}{P(k_i)} \quad (1)$$

где $P(k_i / D_i)$ – вероятность проявления фактора k_i у объекта в состоянии D_i ; $P(D_i)$ – априорная вероятность состояния D_i ; $P(k_i)$ – априорная вероятность проявления фактора k_i на любом объекте; $P(D_i / k_i)$ – апостериорная вероятность состояния D_i при проявлении фактора k_i .

Основная идея метода Байеса заключается в оценке вероятностной характеристики выявления состояния $P(D_i / k_i)$ на основе доступных для анализа факторов. При последовательном рассмотрении различных комбинаций факторов увеличение значения $P(D_i / k_i)$ свидетельствует о высокой вероятности события D_i , а снижение – о его практической нереализуемости.

Для определения состояний силового масляного трансформатора 110 кВ введем классификацию состояний электрооборудования (Табл. 2), содержащую четыре позиции, в зависимости от состояния показателя (его соответствия или не соответствия нормальному состоянию) и наличия

дефекта.

Таблица 2 – Возможные состояния оборудования

Состояние	Показатель в пределах нормы	Наличие дефекта
D_1	Да	Нет
D_2	Да	Да
D_3	Нет	Да
D_4	Нет	Нет

Далее определяются априорные вероятности исходных состояний с помощью экспертных оценок.

Будем считать, что признаки являются независимыми. В этом случае состояние силового трансформатора описывается комплексом независимых признаков K , каждый из которых является двухразрядным:

$$K = (k_1, k_2), \quad (2)$$

где k_1 – проявление признака K , а k_2 – не проявление.

Вероятности проявления и/или не проявления могут быть представлены функциями распределения (Рис. 3). На рисунке представлены функции проявления признаков состояний: $D_1 - \mu_1(x)$, $D_2 - \mu_2(x)$, $D_3 - \mu_3(x)$, и $D_4 - \mu_4(x)$,

которые могут быть определены на интервале $X = \{0 \dots 3\}$.

Значение независимой переменной характеризует ранг состояния объекта исследования.

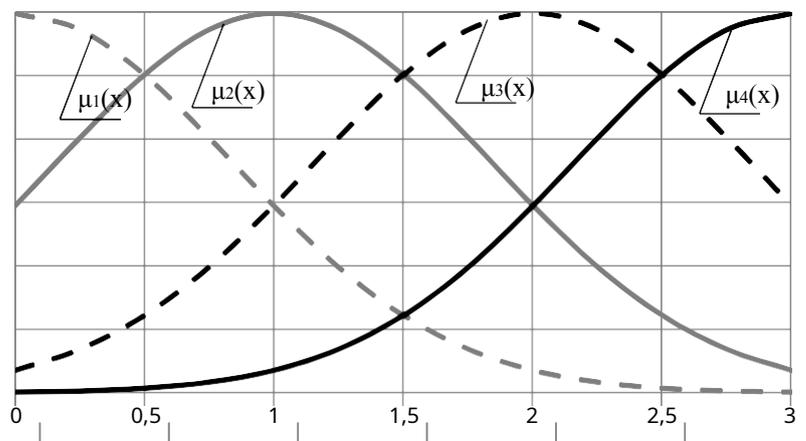


Рисунок 3 – Функции распределения проявления признаков состояний

Обобщенные линейаризованные представления функций сильного $\mu_1(x)$ и нормального

$\mu_2(x)$

проя
влен
ия

приз
нако
в

веро
ятно
стны
е

характеристики проявления какого-либо признака $\mu_p(x)$ одновременно с тем, как обобщенные линейаризованные представления функций слабого проявления $\mu_3(x)$ и его отсутствия $\mu_4(x)$ дают вероятностные характеристики непрявления признаков $\mu_N(x)$.

Характеристические функции $\mu_p(x)$ и $\mu_N(x)$ позволяют определить распределение вероятностей проявления признаков для определенного диагноза D_i (Рис. 4).

Аналогичные функции должны быть определены для всех диагностируемых признаков для каждого состояния объекта исследования, описанного в Табл. 2.

Вероятность каждого возможного состояния при различных сочетаниях признаков может быть определена по формуле Байеса:

$$P(D_i / K) = \frac{P(D_i) P(K / D_i)}{\sum^n P(D) P(K / D)} \quad (3)$$

где K – множество двухразрядных признаков $\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_v\}$, n – число диагнозов состояния, $P(D_i)$ – предварительная вероятность диагноза D_i ,

$P(K / D_i)$ – вероятность проявления признаков в диагнозе D_i , определяемая

в соответствии с выражением:

$$P(K / D_i) = P(k_1 / D_i) P(k_2 / D_i) \dots P(k_v / D_i) \quad (4)$$

где K – множество двухразрядных признаков $\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_v\}$.

Такой анализ позволяет получить количественную характеристику сочетания диагностируемых признаков состояния по принадлежности тому или иному состоянию.

Для хроматографического анализа газов, растворенных в масле (ХАРГ) анализ выполняется для семи газов (Табл. 3): метан (CH_4), углекислый газ (CO_2), этилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2), этан (C_2H_6), водород (H_2), угарный газ (CO).

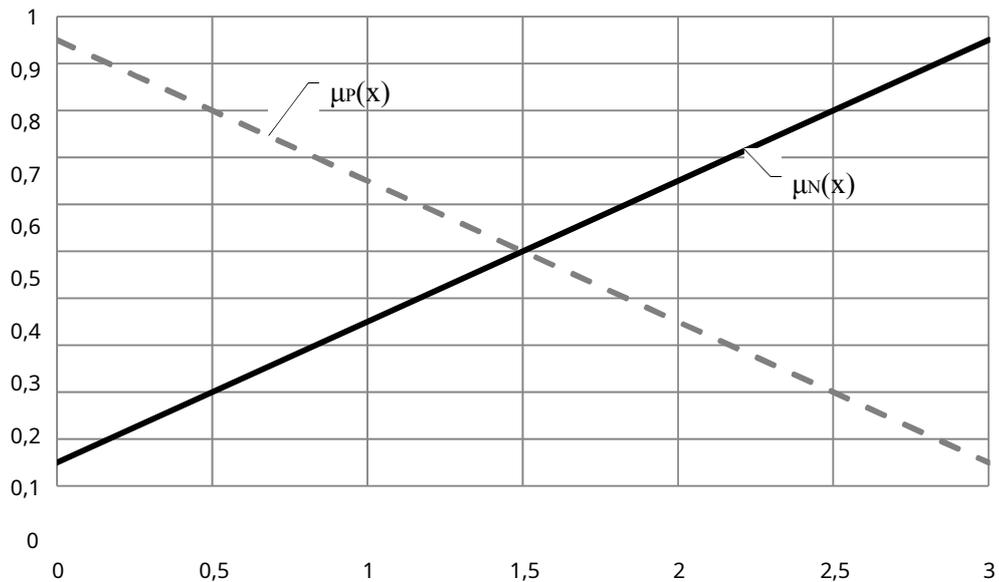


Рисунок 4 - Характеристические функции вероятностного проявления признаков

С целью подтверждения проведенных исследований был выполнен расчет вероятностей состояний на основе данных ХАРГ силового трансформатора с использованием функций принадлежности, а также вероятностей проявлений и не проявлений признаков для каждого газа в отдельности. Расчет вероятностей состояний силового трансформатора для ряда сочетаний признаков приведен в Табл. 3.

Затем был выполнен расчет вероятности диагноза D_i при соответствии всего комплекса признаков $K = k_{11} \wedge k_{21} \wedge k_{31} \wedge k_{41} \wedge k_{51} \wedge k_{61} \wedge k_{71}$, представленных в Табл. 3, нормальным граничным условиям, согласно выражению (3):

$$\begin{aligned}
 P(D_1 / K) &= (0,5 \cdot 0,998 \cdot 0,990 \cdot 0,940 \cdot 0,895 \cdot 0,821 \cdot 0,804 \cdot \\
 &0,990) / \\
 &/ (0,5 \cdot 0,998 \cdot 0,990 \cdot 0,940 \cdot 0,895 \cdot 0,821 \cdot 0,804 \cdot 0,99 + \\
 &\dots \\
 &+ 0,3 \cdot 0,001 \cdot 0,001 \cdot 0,004 \cdot 0,003 \cdot 0,002 \cdot 0,001 \cdot 0,001) = \\
 &0,9999.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Значения вероятностей диагнозов представлены в Табл. 5.

В случае несоответствия всех диагностируемых признаков допустимым значениям, то есть когда —

$$K = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72},$$

вероятность

нормального состояния крайне мала и согласно расчетам составляет:

$$\begin{aligned}
 P(D_1/\bar{K}) &= (0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,010 \cdot 0,060 \cdot 0,105 \cdot 0,179 \cdot \\
 &0,196 \cdot 0,010) / \\
 &/ (0,5 \cdot 0,002 \cdot 0,010 \cdot 0,060 \cdot 0,105 \cdot 0,179 \cdot 0,196 \cdot 0,010 + \dots \quad (6) \\
 &+ 0,3 \cdot 0,999 \cdot 0,999 \cdot 0,996 \cdot 0,997 \cdot 0,998 \cdot 0,999 \cdot 0,999) = \\
 &0,04 \cdot 10^{-9}.
 \end{aligned}$$

Таблица 3 – Диагностическая матрица Байеса для ХАРГ

Признак	Диагноз							
	D_1		D_2		D_3		D_4	
	+	-	+	-	+	-	+	-
CH_4	$P(k_{11}/D_1)$	$P(k_{12}/D_1)$	$P(k_{11}/D_2)$	$P(k_{12}/D_2)$	$P(k_{11}/D_3)$	$P(k_{12}/D_3)$	$P(k_{11}/D_4)$	$P(k_{12}/D_4)$
CO_2	$P(k_{21}/D_1)$	$P(k_{22}/D_1)$	$P(k_{21}/D_2)$	$P(k_{22}/D_2)$	$P(k_{21}/D_3)$	$P(k_{22}/D_3)$	$P(k_{21}/D_4)$	$P(k_{22}/D_4)$
C_2H_4	$P(k_{31}/D_1)$	$P(k_{32}/D_1)$	$P(k_{31}/D_2)$	$P(k_{32}/D_2)$	$P(k_{31}/D_3)$	$P(k_{32}/D_3)$	$P(k_{31}/D_4)$	$P(k_{32}/D_4)$
C_2H_2	$P(k_{41}/D_1)$	$P(k_{42}/D_1)$	$P(k_{41}/D_2)$	$P(k_{42}/D_2)$	$P(k_{41}/D_3)$	$P(k_{42}/D_3)$	$P(k_{41}/D_4)$	$P(k_{42}/D_4)$
C_2H_6	$P(k_{51}/D_1)$	$P(k_{52}/D_1)$	$P(k_{51}/D_2)$	$P(k_{52}/D_2)$	$P(k_{51}/D_3)$	$P(k_{52}/D_3)$	$P(k_{51}/D_4)$	$P(k_{52}/D_4)$
H_2	$P(k_{61}/D_1)$	$P(k_{62}/D_1)$	$P(k_{61}/D_2)$	$P(k_{62}/D_2)$	$P(k_{61}/D_3)$	$P(k_{62}/D_3)$	$P(k_{61}/D_4)$	$P(k_{62}/D_4)$
CO	$P(k_{71}/D_1)$	$P(k_{72}/D_1)$	$P(k_{71}/D_2)$	$P(k_{72}/D_2)$	$P(k_{71}/D_3)$	$P(k_{72}/D_3)$	$P(k_{71}/D_4)$	$P(k_{72}/D_4)$

Таблица 4 – Диагностическая матрица Байеса для ХАРГ

Признак K_j	Вероятности неперевышения (+) и превышения (-) граничных значений признаков для диагнозов D_i							
	D_1		D_2		D_3		D_4	
	+	-	+	-	+	-	+	-
CH_4	0,998	0,002	0,024	0,976	0,021	0,979	0,001	0,999
CO_2	0,990	0,010	0,022	0,978	0,002	0,998	0,001	0,999
C_2H_4	0,940	0,060	0,044	0,956	0,004	0,996	0,004	0,996
C_2H_2	0,895	0,105	0,097	0,903	0,009	0,991	0,003	0,997
C_2H_6	0,821	0,179	0,032	0,968	0,003	0,997	0,002	0,998
H_2	0,804	0,196	0,028	0,972	0,003	0,997	0,001	0,999
CO	0,990	0,010	0,026	0,974	0,002	0,998	0,001	0,999

Таблица 5 – Вероятности принадлежности состояниям

Вероятности диагнозов $P(D_i)$			
D_1	D_2	D_3	D_4
0,5	0,1	0,1	0,3

Расчет вероятностей для других признаков представлен на Рис. 5. Из рисунка видно, что по результатам анализа при попадании пяти и более критериев оценки состояния силового трансформатора в допустимые диапазоны вероятность определения его состояния как нормального приближается к 100%. Такое оборудование функционирует нормально и не требует оперативного вмешательства, связанного с осмотром, ремонтом и заменой элементов.

При невыполнении требований по трем диагностируемым показателям вероятность принадлежности к нормальному состоянию резко снижается и сопровождается одновременным ростом вероятности принадлежности к состоянию D_2 . Примером является одновременное отклонение показателей CO и CO_2 за граничные значения, что соответствует комбинации показателей $K = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72}$, (Рис. 5а). При такой комбинации

показателей вероятностная принадлежность к D_1 составляет около 13%, а к D_2 – 87%.

Эта тенденция сохраняется – рост числа отклонений диагностируемых показателей от нормы приводит к преобладанию негативных диагнозов, которые свидетельствуют о наличии дефекта в силовом оборудовании. Результаты, представленные на Рис. 5б, свидетельствуют об этом.

Для комбинации показателей $\bar{K} = k_{12} \wedge k_{22} \wedge k_{32} \wedge k_{42} \wedge k_{52} \wedge k_{62} \wedge k_{72}$, (Рис. 5б) вероятность D_3 составляет 20%, а D_4 превышает 63%. Такое состояние требует незамедлительного принятия мер по восстановлению или замене оборудования на электроэнергетическом объекте.

Проведенные расчеты наглядно свидетельствуют об адекватности использованного подхода к оценке состояния объектов электрической сети, но реализация системы оценки состояния электросетевого оборудования, основанная на таком подходе, требует большого объема предварительной информации, в том числе подразумевает, что априорное распределение известно до начала наблюдений. Другими словами, при использовании данного метода предварительно должна быть выполнена большая работа по анализу статистических данных и определению всех вероятностей.

Кроме того, одним из основных минусов метода Байеса является «подавление» редко встречающихся диагнозов, что накладывает определенные ограничения на использование данного метода для оценки состояния электросетевого оборудования, так как процент отказа электросетевого оборудования достаточно мал, а следовательно, высока вероятность пропуска «редкого» диагноза.

В подтверждение сказанному следует заметить, что удельное число отказов трансформаторов в среднем составляет около 2 %, то есть около 5-6 % парка могут иметь критические дефекты, ведущие к внезапным отказам [34].

Таким образом, несмотря на все безусловные достоинства существующих российских систем оценки состояния электросетевого оборудования, они имеют ряд существенных недостатков:

- 1) ориентированы на решение конкретной задачи определенного собственника (под конкретные схемы, конкретное оборудование и т.п.) и, как правило, не могут использоваться на других объектах без серьезных переработок [35];
- 2) используют разномасштабную информацию различной точности, что может приводить к недостоверности оценки [36];
- 3) не учитывают динамику изменения критериев оценки технического состояния оборудования, то есть системы не обучаемы [37].

Все это свидетельствует о недостаточной универсальности современных российских систем оценки состояния оборудования. А ситуация, сложившаяся в электроэнергетике России, вынуждает не столько совершенствовать существующие, сколько искать новые методы моделирования таких систем

Другими словами, требуются новые инструментарии качественной и количественной оценки технического состояния электросетевого оборудования, обладающие следующими функциями:

- сбор статистики о дефектах и отказах оборудования, ее анализ и поиск закономерностей;
- использование различных методов диагностики и испытаний, включая применение информационных технологий, для определения оптимальных решений по эксплуатации и ремонту оборудования и/или управляющих воздействий;
- поддержка внедрения информационных систем управления электросетевыми активами энергетических компаний;
- возможность использования для решения задачи оценки технического состояния для различного электросетевого оборудования без серьезных переработок (универсальность);

- учет изменения критериев оценки состояния оборудования с учетом эксплуатационного опыта (обучаемость).

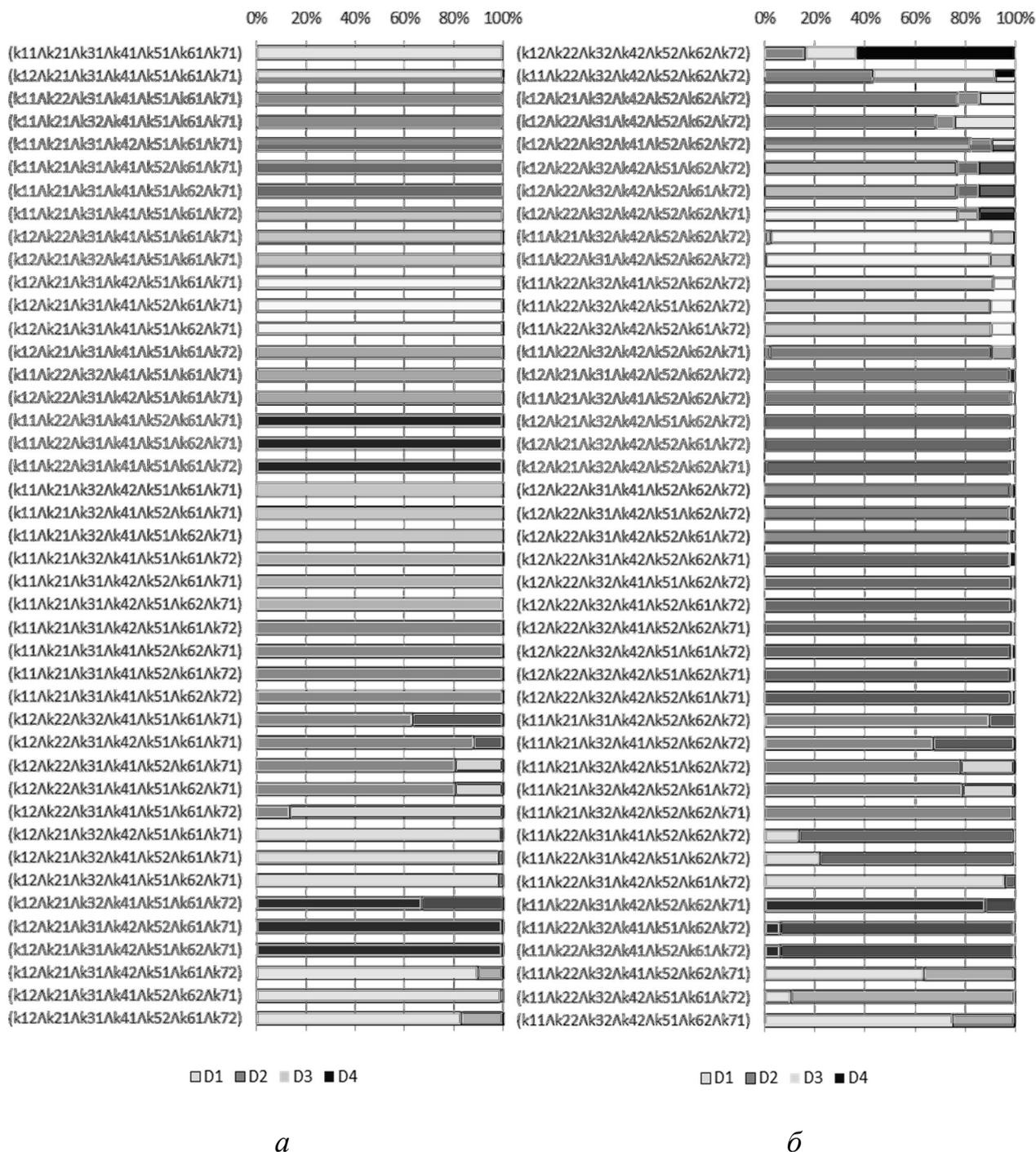


Рисунок 5 – Результаты расчета вероятностей принадлежности состояниям а) при соответствии большинства критериев граничным значениям (4 и более); б) при несоответствии большинства критериев граничным значениям (4 и более)

В данной диссертационной работе предложена реализация системы анализа данных технического диагностирования, а также любой доступной

информации об электросетевом оборудовании, полученной в ходе эксплуатации этого оборудования, на основе нейро-нечеткого логического вывода, который обеспечивает представленную систему оценки технического состояния всеми перечисленными свойствами.

В разработанной системе оценки технического состояния в качестве входных параметров может использоваться любая доступная информация об анализируемом объекте, причем не только в числовом, но и в лингвистическом виде. Например, для оценки технического состояния электрооборудования на ПС 35-220 кВ кроме данных диагностики и испытаний могут применяться (при их наличии) схемно-режимные параметры, паспортные данные оборудования, информация о ремонтах, данные с датчиков и систем мониторинга и т.п.

1.5 Выводы

На основе анализа жизненного цикла электросетевого оборудования, выполненного в диссертационной работе, можно сделать вывод, что задача оценки технического состояния электросетевого оборудования на ЭС и ПС относится к многокритериальным задачам принятия решений в условиях ограниченной информации. В качестве минимального набора исходных данных, обеспечивающих достаточную достоверность полученных результатов, для определения состояния электросетевого оборудования необходимо наличие данных технического диагностирования объекта исследования.

На основе анализа сложившейся в электроэнергетике России ситуации становится очевидной необходимость создания новых инструментариев качественной и количественной оценки технического состояния электросетевого оборудования, способных не только выполнять анализ состояния на базе любой агрегированной доступной информации об объекте исследования с учетом эксплуатационного опыта, но и на ее основе определять решения по дальнейшей эксплуатации этого оборудования.

2 АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И МОДЕЛЬ ДАННЫХ

2.1. Система поддержки принятия решений

При разработке любой технической системы необходимо сначала определить ее основные функции и только потом принципы ее организации и структуру.

Разработанная в рамках диссертационной работы модель системы оценки технического состояния оборудования ПС является математической моделью интеллектуальной системы принятия решений, которая позволит корректировать ремонтные циклы электросетевого оборудования и принимать эффективные решения по его дальнейшей эксплуатации. Согласно [38] система поддержки принятия решений предназначена для принятия многокритериальных решений в сложной информационной среде. Основная задача сводится к поиску оптимального решения по совокупности одновременно рассматриваемых критериев при учете большого объема данных различной природы.

В данной диссертационной работе реализация системы поддержки принятия решений заключается в определении оптимального решения (с учетом ранжирования возможных решений) по дальнейшей эксплуатации электросетевого оборудования на основе оценки его состояния на базе доступной агрегированной информации об объекте исследования с помощью нейро-нечеткого логического вывода [39], разработанного Янгом [40] более подробно описанного в третьей главе.

Стоит подчеркнуть, что разработанная система относится к классу не оперативных, а стратегических систем, которые позволяют использовать большие объемы данных, полученных в условиях высокой степени неопределенности. Данная система выступает «советчиком», предоставляя уже обработанные данные, поэтому у такой системы в приоритете будет не уменьшение времени принятия решений, а повышение их точности.

Структуру системы принятия решений можно представить в виде взаимодействия пяти отдельных подсистем (Рис. 6):

- сбора данных;
- формирования данных;
- формирования знаний;
- принятия решений;
- вывода.

На этапе сбора данных определяются все возможные источники данных. Данный блок требуется для оценивания объема данных, определения порядка их поступления и необходимого объема хранилища для формирования базы данных на следующем этапе. Источники данных могут быть следующие:

- протоколы диагностики и испытаний;
- системы диагностики и датчики;
- системы мониторинга;
- системы АИИС КУЭ и т. п.

Подсистема формирования данных состоит из двух последовательных этапов – предварительной обработки данных и формирования базы данных.

Наличие предварительного этапа обработки данных обусловлено необходимостью масштабирования, нормировки данных, а также исключения из их числа выбросов [41].

На основе обработанной информации формируется набор данных об объекте исследования, хранящийся некоторым упорядоченным способом (базой данных). В базе данных могут храниться следующие сведения об объекте исследования:

- паспортные данные;
- данные об эксплуатации и ремонтах;
- данные диагностики и испытаний;
- данные мониторинга;

- данные АИИС КУЭ и т. п.

Подсистема формирования знаний состоит из двух блоков – «интеллектуальный анализ» и «база знаний». Под интеллектуальным анализом понимается подсистема анализа данных на основе метода нейро-нечеткого логического вывода, позволяющего с помощью блока «база знаний» получить агрегированную дифференцированную оценку состояния объектов электрической сети. Блок «база знаний» должен осуществлять не только функции хранения, взаимодействия различных моделей (оценки работоспособности элемента, подобъекта, объекта (ПС)), проверки существующих знаний, но и получения новых.

В ходе анализа выполняется оценка состояния по принципу «от частного к общему» (подробно описанному в следующем подразделе):

- оценка состояния каждого из элементов подобъекта;
- оценка состояния подобъекта на базе оценки состояния совокупности его элементов;
- оценка состояния объекта на базе оценки состояния совокупности всех его подобъектов.

Сложность электросетевых объектов вынуждает *разбивать объект на совокупность подобъектов, а их, в свою очередь, на совокупность элементов*, так как в каждом подобъекте протекают различные взаимосвязанные процессы, что существенно затрудняет определение технического состояния электросетевого оборудования при решении задачи «в лоб».

Как известно, для решения задач системного анализа наиболее эффективным способом является метод декомпозиции [42], поэтому и было принято решение воспользоваться им для разработки архитектуры системы оценка технического состояния ПС.

В свою очередь каждый из элементов совокупности характеризуется определенным набором данных.



Рисунок 6 – Архитектура системы принятия решений

В качестве минимального набора исходных данных для определения состояния электросетевого объекта, как было описано в первой главе диссертационной работы, необходимы данные технического диагностирования рассматриваемого объекта.

В общем случае под базой знаний понимают совокупность состояний и правил вывода, допускающих логический вывод и обработку данных [43], где состояние описывается следующей записью:

$$S = \left\{ N, K, I, L, M \right\}, \quad (7)$$

где N – наименование состояния; K – значение состояния, определяемое на численной или лингвистической шкале на базе функций принадлежности; I – степень принадлежности объекта электрической сети к состояниям работоспособности; L – множество связей состояния с другими знаниями; M – множество допустимых функций преобразований, операций и т. п. [44]

На основе полученных оценок состояния выполняется анализ решений в подсистеме принятия решений. Результат в виде ранжированных альтернатив решения через подсистему вывода попадает на пользовательский интерфейс. Окончательный выбор остается за лицом, принимающим решение.

2.2. *Архитектура системы оценки технического состояния*

Механизм работы системы оценки технического состояния электросетевого оборудования (в составе системы принятия решений) требует отдельного рассмотрения, так как эффективность эксплуатации оборудования во многом зависит от ее архитектуры. Для выявления оптимальных решений по дальнейшей эксплуатации электросетевого оборудования необходимо определить не только оптимальную структуру системы оценки технического состояния, но и совокупность критериев, на основе которых будет выполняться эта оценка.

Архитектура системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на подстанциях разработана в соответствии со структурой

системы транспорта и распределения электрической энергии. Согласно [45, 46] электрическая подстанция – это установка, которая принимает, преобразует и распределяет электрическую энергию и состоит из трансформаторных конструкций и других преобразовательных устройств, а также управляющей системы, устройств распределения и прочих конструкций.

В рамках диссертационного исследования была разработана архитектура системы оценки технического состояния электрооборудования на ПС напряжением 35-220 кВ, которая организована таким образом, что задача оценки состояния ПС разбивается на ряд отдельных задач по оценке состояния каждого отдельного вида электросетевого оборудования этой ПС. В свою очередь оценка состояния каждого отдельного вида электросетевого оборудования разбивается на ряд подзадач по оценке состояния его основных элементов.

Таким образом, оценки состояния, формируемые в ходе решения подзадач, составляют показатели более высокого уровня обобщения, которые в свою очередь служат базой для задач следующего уровня иерархии. Другими словами, задачу оценки технического состояния электросетевого оборудования ПС можно охарактеризовать как задачу иерархической декомпозиции, в ходе которой для решения каждой из подзадач формируются свои адаптивные системы нейро-нечеткого логического вывода.

Интегральная оценка технического состояния ПС 35-220 кВ выполняется по совокупности оценок состояния простых объектов (подобъектов), таких как:

- силовой трансформатор;
- линии электропередачи (воздушные и кабельные линии);
- трансформатор собственных нужд;
- реакторы;
- система релейной защиты и автоматики (РЗИА);

- выключатель;
- разъединитель;
- секции шин;
- измерительные трансформаторы (тока и напряжения);
- ограничители перенапряжения и пр.

Таким образом, математическую оценку состояния ПС (SS) можно представить в следующем виде:

$$SS = TR \cup OHL \cup CL \cup TSN \cup R \cup BUS \cup TA \cup TV \quad (8)$$

где TR - множество оценок состояния (ОС) силовых трансформаторов; OHL - множество ОС воздушных линий электропередачи; CL - множество ОС кабельных линий электропередачи; TSN - множество ОС трансформаторов собственных нужд; R - множество ОС реакторов; Q - множество ОС выключателей; QR - множество ОС разъединителей; BUS - множество ОС систем сборных шин; TA - множество ОС измерительных трансформаторов тока; TV - множество ОС измерительных трансформаторов напряжения и т. д.

Для каждого простого объекта (подобъекта) производится своя оценка состояния по совокупности оценок состояния его элементов. Например, для силового выключателя это:

- контактная система;
- дугогасительная камера;
- привод;
- корпус;
- вводы;
- внутренняя изоляция;
- блок управления.

Математическую оценку состояния простого объекта силовой выключатель (Q) можно представить в следующем виде:

$$Q = CS \cup DK \cup M \cup T \cup B \cup II \cup CB \quad (9)$$

где CS - ОС контактной системы; DK - ОС дугогасительной камеры; M - ОС привода; T - ОС корпуса; B - множество ОС вводов; $И$ - ОС внутренней изоляции; CB - ОС блока управления и т. д.

Нейро-нечеткий логический вывод в системе оценки технического состояния электросетевого оборудования ПС формируется для оценки технического состояния элементов простого объекта и уже на базе совокупности оценок состояния его элементов формируется собственная оценка технического состояния простого объекта.

Внутри каждого вида электросетевое оборудование подразделяется на типы, для которых характерно многообразие марок с различными характеристиками [47,48].

Несмотря на такую разветвленную иерархию внутри каждого вида необходимость создавать отдельные структуры для каждого типа или марки оборудования в отдельности отсутствует. Достаточно выделить внутри каждого вида несколько базовых типов оборудования, принципиально отличающихся друг от друга по конструкции, и далее на основании решающего правила определять принадлежность оборудования к существующим типам при «входе» в систему оценки состояния.

Решающее правило – это алгоритм, с помощью которого можно принимать решение о принадлежности объекта к классу по определенному множеству наборов признаков и соответствующему ему множеству решений [49], который в данном случае является методом распознавания образа типа оборудования. Разработка решающих правил для различных типов оборудования является отдельной задачей, требующей знаний в области теории распознавания образов и кибернетики, и в рамках данной диссертационной работы не рассматривается.

Так как разработанная система оценки состояния на базе нейро-нечеткого логического вывода относится к классу самообучаемых и самонастраиваемых систем, то в случае существенных отличий «входного»

типа оборудования от базовых она, основываясь на них, самостоятельно формирует собственные типы и новую систему знаний для них.

Например, силовые трансформаторы можно классифицировать следующим образом:

1. По типу силовых трансформаторов:
 - а. Автотрансформаторы и авторгруппы.
 - б. Двухобмоточные трансформаторы и двухобмоточные трансформаторы с расщепленными обмотками низшего напряжения.
 - в. Трехобмоточные трансформаторы.
2. По типу электрических сетей:
 - а. Сети до 1 кВ.
 - б. Распределительные сети среднего напряжения 6-35 кВ.
 - в. Сети высокого напряжения 110-220 кВ.
 - г. Сети сверхвысокого и ультравысокого напряжения 330 кВ и выше.
3. По типу системы охлаждения:
 - а. Сухие силовые трансформаторы.
 - б. Маслонаполненные трансформаторы с естественной циркуляцией масла и естественным обдувом.
 - в. Маслонаполненные трансформаторы с естественной циркуляцией масла и принудительным обдувом.
 - г. Маслонаполненные трансформаторы с принудительной циркуляцией масла и естественным обдувом.
 - д. Маслонаполненные трансформаторы с принудительной циркуляцией масла и принудительной обдувом.
4. По мощности силовых трансформаторов:
 - а. Малой мощности.
 - б. Средней мощности.
 - в. Большой мощности.

Следует отметить, что указанная выше классификация представлена рядом признаков, не отвечающих требованию независимости категорий, поскольку между типом трансформатора, классом напряжения сети (от НН до УВН), системой охлаждения и мощностью прослеживается прямая корреляция. На Рис. 7 показана обобщенная классификация силовых трансформаторов.

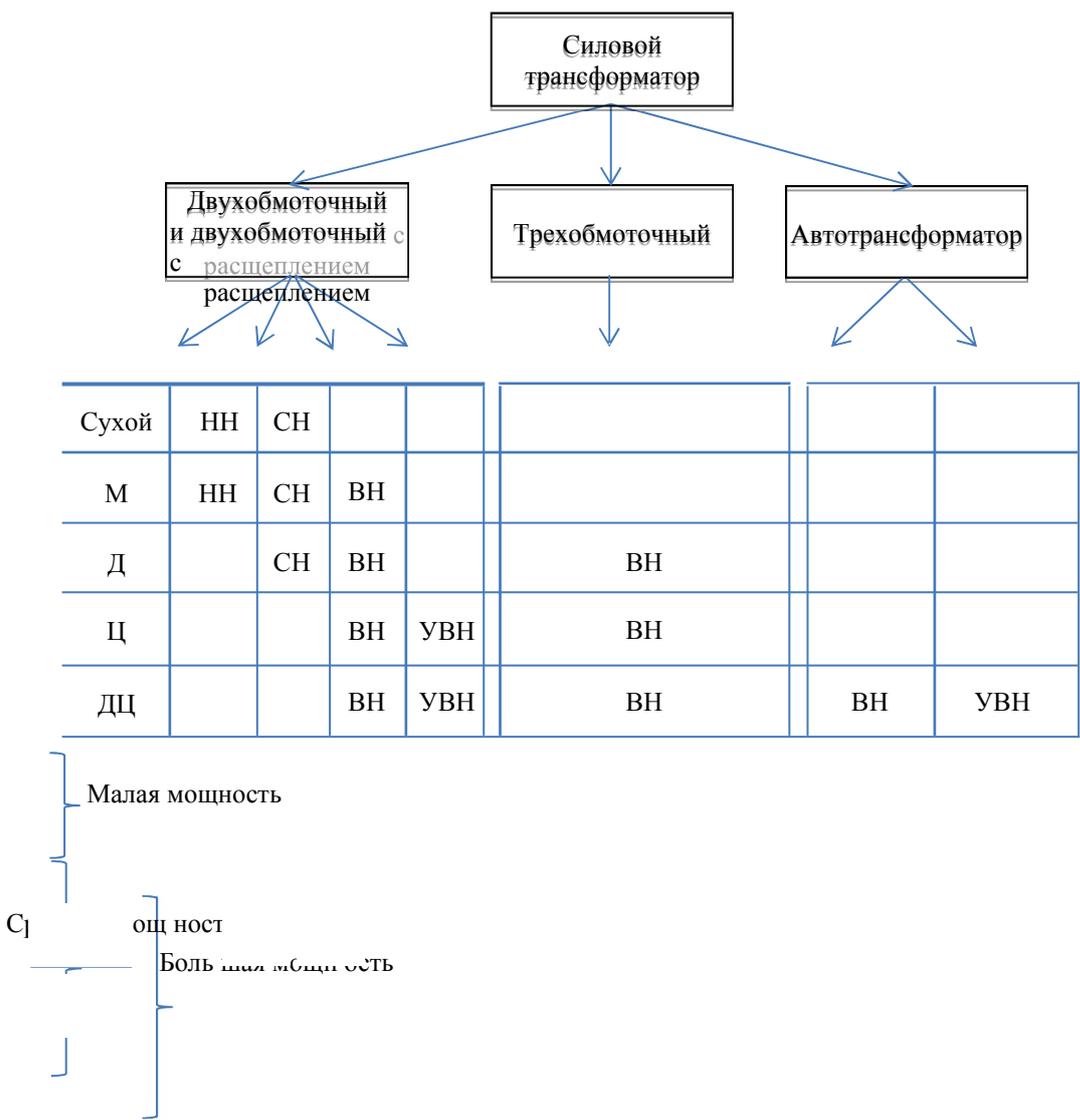


Рисунок 7 – Классификация силовых трансформаторов

Разделение парка трансформаторов по типу принято в соответствии с отличительными особенностями конструкции их активной части и процессами передачи электрической энергии между обмотками. Однотипностью конструкции объясняется объединение двухобмоточных и двухобмоточных с расщеплением силовых трансформаторов в одну группу.

Привязка трансформаторов к типу электрической сети позволяет учесть особенности режима работы нейтрали и поведение сети в аварийных

режимах, класс изоляции, а также особенности исходной информации о схемно-режимных параметрах электрической сети, которая для различных классов напряжения существенно отличается по объему и достоверности.

Такие классификационные категории как система охлаждения и мощность силовых трансформаторов необходимы для определения их

нагрузочной способности и, как следствие, оценки относительной скорости износа и/или относительного износа изоляции, а также связанных с этим вопросов оценки резерва мощности при решении задач оценки состояния оборудования и развития электросетевого комплекса. Кроме того, вид системы охлаждения во многом определяет доступный набор исходной диагностической информации и вид применяемого инструментария для оценки технического состояния силового оборудования и его элементов.

Глубина детализации объекта в разрабатываемой системе характеризуется состоянием совокупности элементов, что обусловлено назначением разрабатываемой системы и достаточностью представления об основных свойствах системы.

Детализация разработанной системы выполнена до уровня, когда для каждого элемента могут быть определены зависимости его выходных показателей от входных параметров, существенных с точки зрения работоспособности или неработоспособности оборудования.

Одним из возможных критериев (признаков) неработоспособного состояния элемента (подобъекта), согласно [50], является наличие неисправностей (дефектов). Поэтому для определения детализации разработанной системы необходимо определить возможные неисправности для каждого элемента подобъекта, а также методы их технического диагностирования.

Далее представлено определение совокупности элементов подобъекта на примере силового трансформатора 110 кВ. В рамках диссертационного исследования был выполнен анализ возможных видов неисправностей силовых трансформаторов, а также методов их диагностирования с учетом современных требований нормативной документации [51], описанных в [5,52], на основе статистических данных (анализ трансформаторов на 92 ПС Свердловской области в период с 2000 по 2013 гг.). Результаты сведены в Табл. 6.

Таблица 6 – Основные дефекты силовых трансформаторов и методы их определения

Элемент	Вид дефекта	Метод диагностирования
Магнитная система	Нарушение лаковой изоляции между пластинами магнитопровода	Измерение потерь холостого хода; измерение уровня частичных разрядов
	Нарушение изоляции между магнитопроводом и элементами крепления	Измерение потерь холостого хода; измерение уровня частичных разрядов
	Нарушение изоляции между магнитопроводом и обмоткой низшего напряжения	Измерения сопротивления изоляции, емкости по зонам
	Обрыв заземления магнитопровода	
	Несимметрия магнитной системы вследствие деформации обмоток	Измерение потерь холостого хода
Обмотка	Сдвиг и деформация витков катушек	Измерения сопротивления короткого замыкания; виброакустический контроль
	Нарушение соединений отводов обмоток	Измерение сопротивления постоянному току
	Нарушение соединений между обмотками	Измерение сопротивления постоянному току
Твердая изоляция	Пробой продольной изоляции (междувитковой, междукатушечной, междуслоевой)	Испытание изоляции индуктированным напряжением повышенной частоты (100-250 Гц); опыт холостого хода
	Износ	Изменение мутности масла
	Увлажнение	Оценка влажности твердой изоляции (не определяется при условии влагосодержания масла не более 10 г/т)

Продолжение таблицы 6

Элемент	Вид дефекта	Метод диагностирования
Твердая изоляция	Частичные разряды	Хроматографический анализ масла
	Снижение индекса полимеризации	Оценка по наличию фурановых соединений в масле и оценка по степени полимеризации
Масло	Влагосодержание	Хроматографический анализ масла и физико-химический анализ масла
	Содержание механических примесей	
	Содержание шлама	
	Изменение электрических характеристик масла (пробивное напряжение; тангенс угла диэлектрических потерь)	
	Изменение кислотного числа	
	Изменение температуры вспышки в закрытом тигле	
	Изменение тангенса угла диэлектрических потерь	
	Изменение содержания водорастворимых кислот и щелочей	
	Содержание ионола	
	Изменение газосодержания	
Система охлаждения	Повреждение изоляции обмотки статора двигателя электронасоса	Измерение сопротивления изоляции после отключения
	Износ подшипников электронасосов	Прослушивание и измерение уровней шумов и вибраций
	Загрязнение трубок охладителей	Измерение перепада температуры масла на охладителе

Продолжение таблицы 6

Элемент	Вид дефекта	Метод диагностирования
Высоков. вводы	Трещины и сколы фарфоровых изоляторов	Тепловизионный контроль
	Загрязнение внешней поверхности изоляторов	
	Течь масла (герметичность)	Испытание избыточным давлением
	Изменение состава и содержания масла в вводах	Тепловизионный контроль
	Изменение электрических характеристик (тангенс угла диэлектрических потерь, емкости)	Хроматографический анализ масла; физико-химический анализ масла
	Частичные разряды	Контроль под рабочим напряжением
Увеличение емкости основной изоляции (C_1)		
Бак и вспомогат. системы	Течь бака по сварным швам и уплотнениям	Испытание бака на плотность; тепловизионный контроль
	Повышенный нагрев составных частей	Тепловизионный контроль
	Наличие короткозамкнутых контуров	Измерение сопротивления изоляции между составными частями и баком
	Коррозия, нарушение лакокрасочного покрытия	Внешний осмотр
	Дефекты цепей защитной и контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на трансформаторе	Испытания защитной и контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на трансформаторе
Система регулиров. под нагрузкой	Течь масла	Тепловизионный контроль; измерение уровня масла
	Ухудшение характеристик масла и увлажнение изоляции	Определение влагосодержания масла

Продолжение таблицы 6

Элемент	Вид дефекта	Метод диагностирования
Система регулиров. под нагрузкой	Нарушение контактов	Измерение сопротивления постоянному току
Внешние контактные соединения	Нагревы контактов в местах крепления (соединения) к вводу	Тепловизионный контроль

На основе представленного анализа подтверждается правильность выбранной детализации подбъекта трансформатор 110 кВ, так как для каждого возможного вида неисправности существует метод его диагностирования, что позволяет выполнить оценку каждого элемента подбъекта, и на основе совокупности оценок всех элементов выполнить оценку состояния подбъекта.

2.3. Модель данных

В ходе эксплуатации и обслуживания электросетевого оборудования на ПС накапливаются большие объемы данных разной природы, поэтому такого рода системы, базирующиеся на их анализе, предполагают разработку модели этих данных.

Модель данных предназначена для описания структуры информационных объектов, их функциональных взаимосвязей, необходимых для выполнения заданных действий. Можно выделить три основных (традиционных) типа моделей данных – иерархический, сетевой и реляционный [53], а также ряд нетрадиционных моделей – постреляционную, объектно-ориентированную, многомерную и пр. [54]. Основное отличие моделей между собой – метод определения связей между данными.

Иерархическая модель данных имеет древовидную структуру, в которой узлы – элементы данных – соединены с помощью вертикальных связей. В иерархической модели данные жестко подчинены друг другу. Использование иерархической модели для данных со сложными логическими

связями затрудняет доступ нижним уровням иерархии, а также делает ее громоздкой для обработки информации.

В сетевых моделях между узлами существуют не только вертикальные, но и горизонтальные связи. Сетевая модель является расширенной иерархической моделью, поэтому как и иерархическая модель обладает теми же недостатками – сложностью и жесткостью модели.

В реляционных моделях совокупность данных реализуется в виде наборов двумерных таблиц. Данная модель является простой и достаточно эффективной, но и она обладает рядом некоторых недостатков: строгость структур делает реляционную модель негибкой, а сильная зависимость модели от состава и структуры данных в случае их изменения заставляет менять структуру самой модели [55].

Постреляционная модель является расширенной версией реляционной и дает возможность устранить ограничение неделимости данных в таблицах. Формирование совокупности связанных реляционных таблиц осуществляется через одну постреляционную таблицу, что позволяет сделать информацию наглядной и повысить эффективность ее обработки, при этом возникают проблемы целостности и непротиворечивости хранимых данных [56].

Объектно-ориентированные модели дают возможность идентифицировать отдельные объекты базы, но не создано достойного алгоритма, позволяющего работать с объектно-ориентированной модели на вменяемых временных промежутках [57].

Многомерные модели используются при анализе больших многомерных массивов данных (гиперкубов) с целью поддержки принятия решения [58]. В отличие от реляционной многомерная модель является более наглядной и информативной.

Для решения поставленной задачи – построения модели данных для системы оценки технического состояния электросетевого оборудования – оптимальной является многомерная модель данных, так как она позволяет

анализировать большие массивы данных о состоянии электросетевого оборудования для поддержки принятия решений о его дальнейшей эксплуатации.

В выполненной работе многомерная модель данных представлена в виде интеллектуального анализа кубов OLAP (On-line Analytic Processing) [59] – технологии, подразумевающей анализ многомерных данных для оперативной обработки информации, включая динамическое построение отчётов в различных разрезах, анализ данных, мониторинг и прогнозирование ключевых показателей [60].

Выбор вида информационной системы в виде OLAP-кубов обусловлен возможностью формирования оценок состояния электросетевого оборудования в различных разрезах и с произвольной глубиной детализации. В качестве метода интеллектуального анализа выбран метод нейро-нечеткого логического вывода.

В связи с ограниченностью данных для оценки состояния элемента объекта или даже о самом объекте не каждая ячейка в OLAP-кубе будет содержать значение – могут существовать пересечения, не имеющие данных. В рамках решаемой задачи пустые ячейки возникают в кубах достаточно часто. Поскольку пустые ячейки могут исказить результаты перекрестных соединений, подсчетов и т. п., данная модель обеспечивает возможность пропуска пустых ячеек в вычислительных целях [61].

OLAP-кубы в разработанной системе содержат показатели работоспособности по каждому простому элементу подобъекта, например, для силового трансформатора 110 кВ к данным технической диагностики и испытаний можно отнести следующие показатели:

- хроматографический анализ газов (характеризует состояние масла),
- потери холостого хода (характеризует состояние магнитопровода),
- сопротивление изоляции (характеризует состояние твердой изоляции),
- год выпуска трансформатора,

- год выполнения капитального ремонта (характеризуют общее состояние обмоток) и т. д.

Показатели, используемые для анализа и принятия решений, хранятся в кубах не в виде простых таблиц, а в разрезах, представляющих собой основные категории системы оценки технического состояния (Рис. 8):

- принадлежность объекта (к району электрических сетей (РЭС), ПС (ЭС)),
- вид электросетевого оборудования,
- время и пр.

В разработанной системе использование интеллектуального анализа с помощью OLAP-кубов дает возможность анализировать большие массивы информации и автоматически выявлять закономерности в исследуемых данных, учет которых поможет повысить качество принимаемых решений.

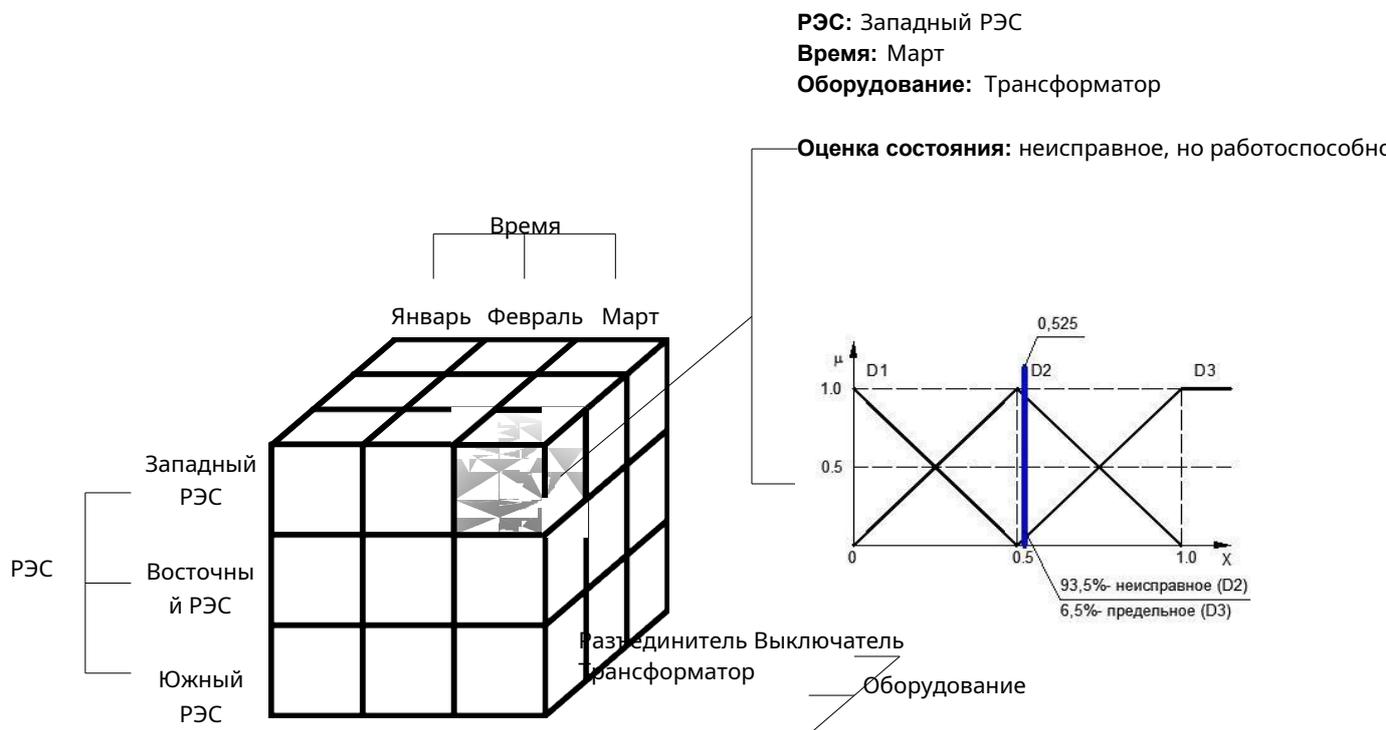


Рисунок 8 – пример структуры OLAP-куба и среза данных для трех категорий системы оценки технического состояния оборудования

2.4. Выводы:

В основе разработки оценки технического состояния сложного объекта электрической сети, такого как подстанция, положено комплексное исследование, которое подразумевает одновременное и согласованное изучение показателей работоспособности подобъектов и их составных элементов с точки зрения общей системной организации. Каждый показатель характеризует тот или иной физический процесс, оказывающий влияние на состояние объекта, подобъекта и элемента или их совокупности с позиций функционирования в рамках единой электроэнергетической системы.

Системная организация электросетевого комплекса определяет взаимное влияние смежных объектов, подобъектов и элементов, которое отражается как в определении их работоспособности, так и в вычислении обобщенной оценки совокупного состояния группы объектов, представляющих энергообразование (часть общей энергосистемы) более высокого уровня иерархии.

Принцип декомпозиции, использованный в настоящей работе для оценки отдельных подобъектов и их составных элементов, дает возможность определения индивидуальных характеристик работоспособности каждого из них, тогда как последующая их агрегация обеспечивает учет эмерджентных свойств системы.

Реализация разработанной системы с помощью OLAP-технологий позволит интегрировать данные различных объектов (от элементарных до комплексных), проектировать отчеты без участия программистов, анализировать данные по любым категориям и показателям в темпе процесса на любом уровне детализации, производить мониторинг и прогнозирование ключевых показателей работоспособности объектов произвольного уровня иерархии и детализации.

В настоящем разделе диссертационного исследования описана разработка архитектуры системы оценки технического состояния электрооборудования на ПС напряжением 35-220 кВ, а также определена

структура информационной модели, на базе которой выполняется оценка его технического состояния.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Настоящий раздел диссертационной работы посвящен разработке и выбору структурной модели оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе доступной информации о его функциональных параметрах и их взаимосвязи (с учетом их полноты и достоверности). Также в данном разделе рассматриваются вопросы, связанные с оценкой точности разработанной модели и способов ее повышения.

3.1. Определение структурной модели оценки технического состояния электрооборудования

Определение структурной модели оценки технического состояния подразумевает анализ возможных путей решения данной проблемы: адаптация существующих методов или поиск и выявление новых.

Использование стандартных математических методов на жесткой алгоритмической основе для решения задачи оценки технического состояния электросетевых объектов и принятия решений об их дальнейшей эксплуатации может дать неудовлетворительные результаты. Это связано со сложностью анализируемых объектов и тем, что при решении поставленных задач приходится оперировать большим объемом входных данных не только числового формата, но и лингвистического, для которых характерны неопределенность, неполнота и отсутствие возможности формальной структуризации.

Для решения поставленных задач необходимы методы, способные реализовать такую функцию человеческого интеллекта, как выбор оптимального решения на основе ранее полученного опыта и рационального анализа всей доступной информации об объекте исследования. Существуют различные интеллектуальные системы, но наиболее распространенными можно назвать следующие [62]:

- Искусственные нейронные сети (ИНС) -математическая модель биологических нейронных сетей и нейронов человеческого мозга, описывающая принципы их организации и функционирования [63];
- Системы эвристического поиска (генетические алгоритмы) – это алгоритмы, используемые для решения задач оптимизации и моделирования, основанные на генетических процессах, аналогичных для биологических организмов [64];
- Системы, основанные на знаниях (экспертные системы; системы логического вывода), т. е. системы, построенные на правилах, хранящихся в базе знаний, с помощью которых на основе совокупности исходных фактов осуществляется поиск решений и заключений из этих фактов [65].

Среди перечисленных методов наибольший интерес для поставленных в работе задач представляют системы, основанные на знаниях, поскольку речь идет о необходимости заключений из исходных фактов и поиски решений для контроля электросетевого оборудования [66].

Системы логических выводов условно можно разделить на два основных направления – четкие и нечеткие выводы [67]. Четкие логические выводы построены на теории четких множеств. Нечеткие логические выводы (нейро-нечеткие логические выводы) построены на теории нечеткой логики, и представляют собой процессы получения нечетких заключений с помощью нечетких условий или предпосылок об объекте исследования на основе информации о его текущем состоянии [68]. Нечеткое множество – это математическая формализация нечеткой информации, представленная множеством элементов, обладающих общим свойством в различной степени и принадлежащих к данному множеству с различной степенью [69].

Нейро-нечеткий логический вывод – один из немногих методов, который допускает неточность, неопределенность и неполную истинность

обрабатываемых данных и реализуется на основе обобщенного использования методов нечеткой логики и методов искусственных нейронных сетей (ИНС).

Применение методов нечеткой логики обусловлено прикладным характером задачи оценки технического состояния оборудования, когда необходимо оперировать не только численными данными, но и лингвистическими, например такими, как «состояние оборудования» и т.п. Классификация состояний, их количество и представление могут различаться в зависимости от назначения.

Кроме того, использование аппарата нечетких множеств позволяет адекватно формализовать знания экспертов, которые могут быть неполными и/или субъективными [70].

Использование методов ИНС обусловлено их основным преимуществом – возможностью обучения (самообучения), что позволяет путем объединения в обучающей выборке экспертных знаний и аналитических зависимостей при оценке состояния идентифицировать неоднозначные параметры (диагнозы) электрооборудования.

Такая структура позволяет воспользоваться преимуществами обоих методов при решении задачи оценки технического состояния оборудования.

Применение методов ИНС и нечеткой логики в энергетике России на данный момент, как правило, исчерпывается прогнозированием нагрузки (электропотребления) [71,72], оценкой устойчивости энергосистем [73]. Между тем использование нейро-нечеткого логического вывода для решения рассматриваемой задачи является достаточно обоснованным и актуальным.

В настоящее время наиболее распространены виды нейро-нечеткого логического вывода, созданные: Мамдани, Такаги-Сугено, Цукамото, и Ларсена [74,75]. Алгоритмы этих нейро-нечетких логических выводов различаются видом используемых правил, методом дефаззификации и формой результата.

Согласно [76] для моделирования многофакторных задач, к которым относится и задача оценки технического состояния оборудования, целесообразно использовать алгоритм Такаги-Сугено. Именно этот алгоритм позволяет объединить в модели экспертные знания и аналитические зависимости при оценке технического состояния электросетевого оборудования. Экспертная составляющая обеспечивает содержательную интерпретацию модели, а аналитические зависимости «входы - выход» делают ее компактной.

Также общепризнанно, что алгоритм Такаги-Сугено является универсальным аппроксиматором функций, что при большом числе входных параметров также становится преимуществом данного метода по сравнению с другими алгоритмами нейро-нечеткого логического вывода.

Заключения правил в нечетком логическом выводе Такаги-Сугено представляются не в виде принадлежности выходной переменной к нечетким множествам, а в форме функциональных зависимостей

$$R^{(k)} : \text{если } (x_1 \text{ есть } D^k \text{ И } \dots \text{ И } x_N \text{ есть } D^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1, \dots, x_N) \quad (10)$$

где

$R^{(k)}$ - нечеткие правила, а $k = 1, \dots, K$, где K - количество нечетких правил;

D^k - нечеткие множества, где $D^k \in X \subset R, i = 1, \dots, N$; x_1, \dots, x_N -

входные переменные; y - выходная переменная, представляющая собой функцию входных переменных.

В результате применения данной модели была реализована нечеткая нейронная сеть необходимой конструкции.

В логическом выводе Такаги-Сугено в качестве заключительного правила используется линейная функция от входных переменных

$$y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j, \quad (11)$$

где, N - количество параметров множества X ; $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$ - параметры

полинома Такаги-Сугено [77].

3.2. Структура нейро-нечеткого логического вывода и алгоритм его работы

Нейро-нечеткий логический вывод формируется на этапе оценки технического состояния каждого элемента подбъекта. На Рис. 9 представлена обобщенная структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки технического состояния электросетевого оборудования.

На вход гибридной системы поступает вектор параметров (любых доступных) $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ анализируемого подбъекта, определяемый

методом получения $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$ (диагностика, испытания, данные АИИС КУЭ,

телеизмерений и т.п.). Формируется база правил $K = \{k_1, \dots, k_n\}$ системы нечеткого

логического вывода на основе нечетких правил продукции, описанных (10).

Согласно разработанной технологии для каждой группы параметров подбирается коллекция функций принадлежности $\mu(\bar{X})$.

В соответствии с системой нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено сеть будет состоять из 5 слоев [78], как представлено на Рис. 9.

На первом слое выполняется фаззификация входных параметров оборудования - преобразование входных данных в нечеткие переменные с помощью функций принадлежности для определения соответствия входных данных термам лингвистических переменных.

На втором слое осуществляется агрегирование подусловий, т.е. определение степени истинности условий для каждого правила в системе нейро-нечеткого вывода [79] – минимизация значений всех подусловий. На втором слое определяется результирующее значение коэффициента

принадлежности $w_i = \mu_{D(k)}$. Характеристические функции $\mu(\bar{X})$ определяют

весовые коэффициенты w .

-

Третий слой содержит алгоритм обучения, в ходе которого корректируются веса полинома. В данной модели используется метод гибридного обучения, объединяющий метод обратного распространения

ошибки с методом наименьших квадратов. В методе обратного распространения ошибки происходит распространение ошибки от выходов сети ко входам, т. е. в направлении, обратном распространению сигналов в нормальном режиме работы. Метод наименьших квадратов - математический метод, применяемый для решения различных задач, который основан на минимизации отклонений суммы квадратов некоторых функций от искомым переменных.

Также на третьем слое определяется выходная агрегированная функция $y(X)$, характеризующая множество параметров X . В ходе действия алгоритма функция $y(X)$ подлежит корректировке с помощью изменения весовых коэффициентов w , определенных на предыдущем слое.

Четвертый слой состоит из двух нейронов-сумматоров: первый отвечает за активацию или композицию подзаклучений (переход от условий к подзаклучениям и определение степени истинности каждого из подзаклучений), второй – за аккумуляирование нечетких правил продукции (процесс нахождения нейро-нечеткого множества или их объединения для каждой из входных переменных всех степеней истинности подзаклучений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных).

На пятом слое выполняется дефаззификация выходных параметров - переход от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к её четкому (числовому) значению.

Другими словами, итоговый результат агрегируется путем расчета средневзвешенных функций $y(X)$ с учетом множества весов w в соответствии с выражением

$$y(x) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (12)$$

в результате чего и формируется оценка технического состояния элемента оборудования.

3.3. *Формирование функций принадлежности*

Как уже говорилось, на первом слое системы нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено для каждой входной переменной задается диапазон значений с помощью функции принадлежности (фаззификации входных параметров). В нечеткой логике функция принадлежности характеризует степень принадлежности каждого члена пространства рассуждения к данному нечёткому множеству, таким образом, в данном случае каждая переменная X определяется функцией принадлежности.

В зависимости от типа объекта, вида предельных значений (односторонний или двухсторонний диапазон), метода диагностики и т.п. тип и количество функций принадлежности могут быть различными. Определение оптимального вида и числа функций принадлежности – отдельные задачи оценки технического состояния электрооборудования.

3.2.1 *Определение нечетких правил продукции*

База нечетких продукционных правил системы нечеткого вывода – это система нечетких продукционных правил, отражающая знания экспертов о методах управления объектом в различных ситуациях, характере его функционирования в различных условиях и т.п., т.е. содержащая формализованные человеческие знания.

Простейший вариант правила нечеткой продукции, который наиболее часто используется в системах нечеткого вывода, может быть записан в форме:

$$\text{«если } \beta_1 \text{ есть } \alpha' \text{», тогда } \beta_2 \text{ есть } \alpha' \text{»} \quad (13)$$

где нечеткое высказывание « β_1 есть α' » представляет собой условие данного правила нечеткой продукции, а нечеткое высказывание « β_2 есть α' » - нечеткое заключение данного правила. При этом считается, что $\beta_1 \neq \beta_2$.

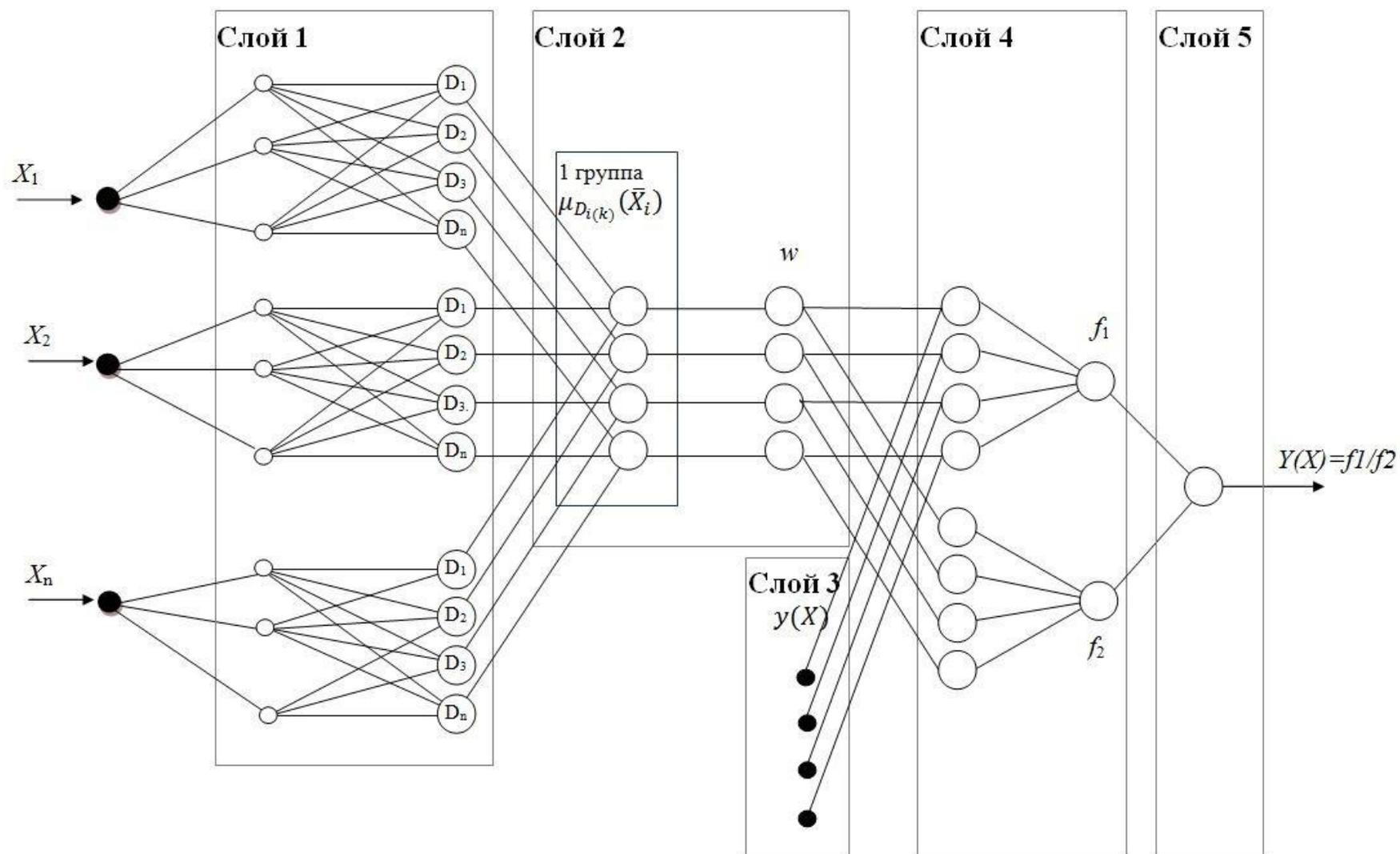


Рисунок 9 – Обобщенная структура нейро-нечеткого логического вывода

3.2.2 Определение числа функций принадлежности

Для каждого параметра, описывающего состояние анализируемого объекта, важно определить количество функции принадлежности (диапазонов значений), наилучшим образом характеризующее данный параметр. Для этого необходимо исходить из рассматриваемой задачи и требуемой точности описания в рассматриваемой задаче.

3.2.3 Определение вида функций принадлежности

Для каждого параметра, описывающего состояние анализируемого объекта, также важно определить вид функции принадлежности, наилучшим образом характеризующий данный параметр.

Рассмотрим так называемые стандартные функции принадлежности. Стандартные функции принадлежности легко применимы к решению большинства задач.

Выделяют следующие типовые функции принадлежности [69]:

- кусочно-линейные - набор отрезков прямых линий, образующих непрерывную или кусочно-непрерывную функцию;
- гауссовы – образованные на основе гауссова распределения;
- сигмоидную кривую и т. д.

Примерами кусочно-линейных функций принадлежности (Рис. 10) являются треугольная (а) и трапециевидная (b).

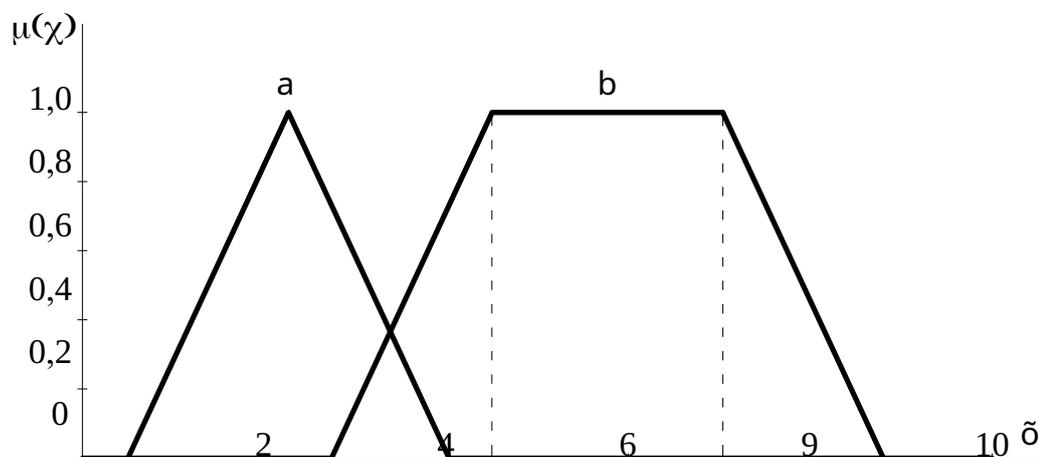


Рисунок 10 – кусочно-линейные функции принадлежности

В общем виде треугольные функции принадлежности аналитически можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (13)$$

где a, b, c – произвольные значения, при условии, что $a \leq b \leq c$.

В общем виде трапецевидные функции принадлежности аналитически можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (14)$$

где a, b, c, d – произвольные значения, при условии, что $a \leq b \leq c \leq d$.

Z-образная (с) и S-образная (d) функции принадлежности (Рис. 11) представляют собой сплайн-функции.

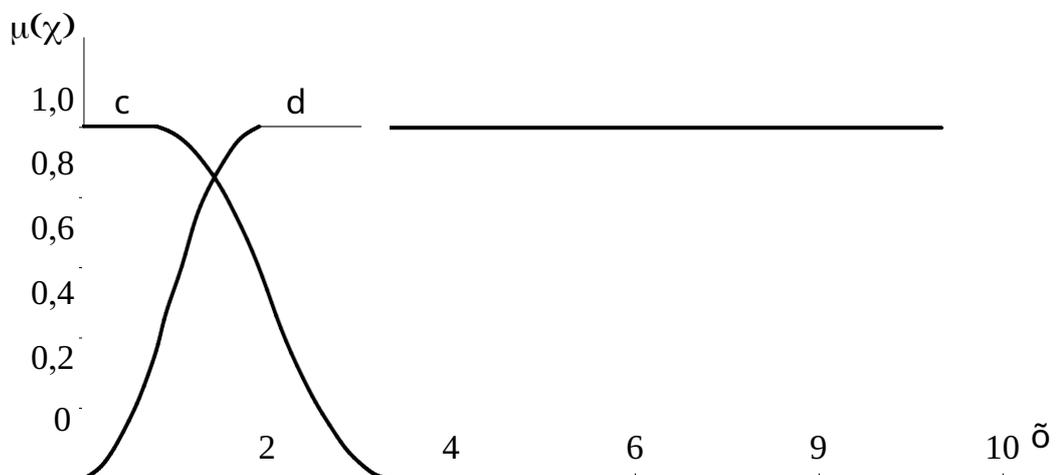


Рисунок 11 – Z-образная и S-образная функции принадлежности

В общем виде Z-образную функцию принадлежности аналитически можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{1}{2} + \cos\left(\frac{x-a}{b-a}\frac{\pi}{2}\right), & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (15)$$

где a, b – произвольные значения, при условии, что $a < b$.

S-образную функцию принадлежности в аналитическом виде можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{2} + \cos\left(\frac{x-b}{b-a}\frac{\pi}{2}\right), & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (16)$$

где a, b – произвольные значения, при условии, что $a < b$.

Частными случаями Z-образной и S-образной функций принадлежности являются их линейные функции. Линейная S-образная функция в аналитическом виде представляется как

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \end{cases} \quad (17)$$

где a, b – произвольные значения, при условии, что $a < b$.

Линейная Z-образная функция в аналитическом виде представляется как

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases} \quad (18)$$

где a, b – произвольные значения, при условии, что $a < b$.

Треугольные и трапециевидные функции принадлежности могут быть построены с помощью линейных Z-образной и S-образной функций принадлежности.

К отдельной группе можно отнести П-образные функции принадлежности: колоколообразную (Рис. 12) и гауссовы (Рис. 13) функции принадлежности.

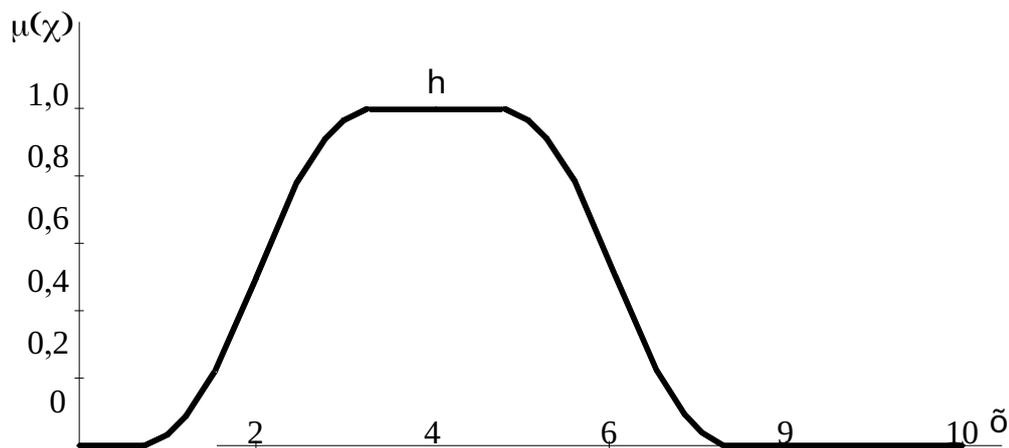


Рисунок 12 – Колоколообразная функция принадлежности

В общем виде колоколообразную функцию принадлежности можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|} \quad (18)$$

где

a, b, c – произвольные значения, при условии, что $a < b < c$ и $b > 0$ [75].

Также П-образные функции принадлежности могут быть построены с помощью Z-образной и S-образной функций принадлежности.

Гауссовы функции принадлежности бывают двух видов – симметричная гауссова (е) и двухсторонняя гауссова (f). Они формируются с использованием гауссова распределения.

Аналитически симметричную гауссову функцию принадлежности можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (17)$$

Двухстороннюю гауссову функцию принадлежности аналитически можно представить как

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left(\frac{(x - c_1)^2}{-2a_1^2}\right), & x < c_1 \\ 1, & c_1 \leq x \leq c_2 \\ \exp\left(\frac{(x - c_2)^2}{-2a_2^2}\right), & x > c_2 \end{cases} \quad (18)$$

Где a_1, a_2, c_1, c_2 – произвольные значения, при условии, что $c_1 < c_2$.

2

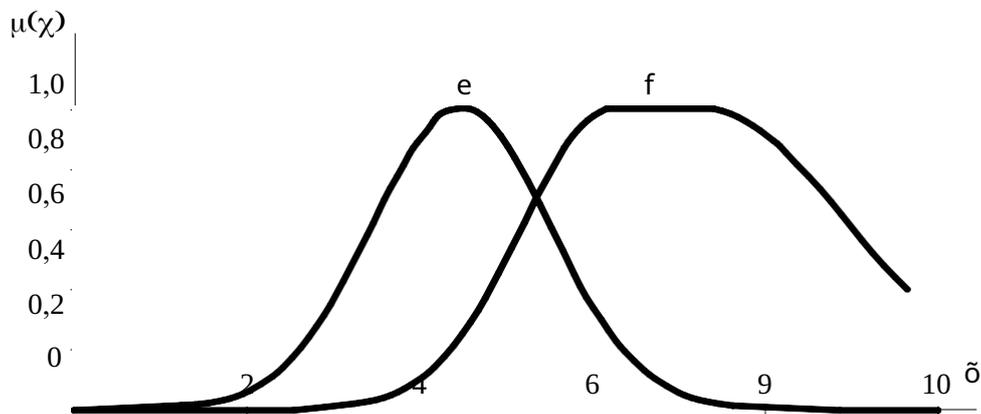


Рисунок 13 – Гауссовы функции принадлежности

С помощью двухсторонней гауссовой функции принадлежности можно использовать ассиметричные функции принадлежности.

Если $c_1 > c_2$, то гауссову функцию принадлежности аналитически можно представить следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left(\frac{(x - c_1)^2}{-2a_1^2}\right), & x < c_2 \\ \exp\left(\frac{(x - c_1)^2}{-2a_1^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{(x - c_2)^2}{-2a_2^2}\right), & c_2 \leq x < c_1 \\ \exp\left(\frac{(x - c_2)^2}{-2a_2^2}\right), & x > c_1 \end{cases} \quad (19)$$

Сигмоидные функции (Рис. 14) строятся с использованием сигмоидной кривой. В общем виде сигмоидную функцию принадлежности (n) можно

представить следующим образом:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (20)$$

Произведение двух сигмоидных функций (m) принадлежности выглядит следующим образом:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a_1(x-c_1)}} \cdot \frac{1}{1 + e^{-a_2(x-c_2)}} \quad (21)$$

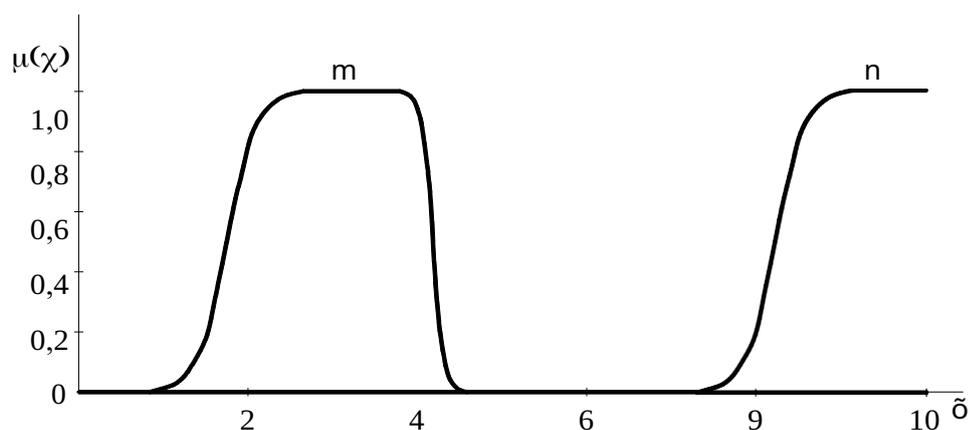


Рисунок 14 – Сигмоидные функции принадлежности

Однако если предстоит решать специфическую задачу, можно выбрать и более подходящую форму функции принадлежности, при этом можно добиться лучших результатов работы системы, чем при использовании функций стандартного вида [74].

Все методы построения функций принадлежности условно можно разделить на два вида: прямые и косвенные. Прямые методы реализуются на основе экспертного задания вида функций принадлежности. К прямым методам можно отнести метод статистической обработки экспертной информации [80]. Существенным недостатком такого метода является его ориентация на преимущественно субъективную информацию о процессе и/или явлении и обязательном принятии допущений при преобразовании данной информации в степени принадлежности нечетких множеств.

Косвенные методы предполагают выбор функций принадлежности, заранее удовлетворяющих сформулированным условиям. Следует отметить, что экспертная информация имеет статус первичной, что предполагает дальнейшую обработку, в том числе с учетом дополнительных условий. Дополнительные условия могут накладываться как на вид получаемой

информации, так и на процедуры ее обработки. Наиболее распространенным среди косвенных является метод парных сравнений, в результате применения которого формируется матрица парных сравнений [81]. Основным недостатком данного метода является сложность выполнения сравнений в случае оценивания большого числа вариантов.

Помимо метода парных сравнений в ряде случаев представляет интерес метод идентификации функций принадлежности на базе определения по экспериментальным данным нечетких моделей типа «входы - выход». Такой метод позволяет решить задачу формализации исходной информации, хотя предъявляет повышенные требования к обучающей выборке и модели типа «вход-выход» [82,83].

В отдельную группу можно выделить методы определения функций принадлежности с помощью кластеризации. В общем случае под кластеризацией подразумевается объединение объектов в группы (кластеры) на основе однотипности каких-либо признаков для объектов одной группы и отличий данных признаков между группами. Большинство существующих алгоритмов кластеризации не требует принятия допущений, свойственных, например, статистическим методам.

Задача кластеризации состоит в определении естественного разбиения данных на классы независимо от субъективного суждения эксперта. Важнейшей особенностью методов кластеризации является их использование в условиях отсутствия какой-либо информации о законах распределения данных [83]. Следует отметить, что кластеризация может быть выполнена для объектов как с качественными, так и количественными или даже смешанными признаками.

Методы кластеризации делятся на четкие и нечеткие. Задача четких методов кластеризации заключается в разбиении множества исходных объектов X на несколько непересекающихся множеств Y $x \in X \rightarrow y \in Y$. Следует отметить, что каждый объект $x \in X$ принадлежит только одному кластеру $y \in Y$. В свою очередь нечеткие методы кластеризации допускают

принадлежность одного и того же объекта одновременно к нескольким кластерам с соответствующими степенями принадлежности на интервале $[0,1]$. В некоторых случаях использование методов нечеткой кластеризации более обоснованно, чем четкой, особенно при анализе объектов, находящихся вблизи границ кластеров.

Например, в задаче оценки технического состояния силового оборудования нечеткая кластеризация допускает, что состояние любого диагностируемого объекта исследования одновременно принадлежит всем кластерам (диагнозам), но с различной степенью принадлежности. Если диагностируемый объект описывается одним признаком, то функция принадлежности нечеткого кластера должна соответствовать функции принадлежности нечеткого множества. По условиям нормальности и выпуклости определяемые нечеткие множества подлежат аппроксимации параметрическими функциями принадлежности [69].

В рамках диссертационного исследования было проанализировано два возможных метода определения функций принадлежности с помощью двух наиболее часто используемых методов кластеризации – метода потенциалов и метода нечеткой кластеризации [84], – описанных ниже.

В основу метода потенциалов положены идеи метода горной кластеризации, не требующей априорного задания определенного количества кластеров. Данный метод предложен Д. Филевым и Р. Ягером в 1993 г. Следует отметить, что кластеризация по горному методу не является нечеткой, но зачастую ее используют в качестве инструмента для определения нечетких правил на основе априорной информации [82].

Основное понятие метода горной кластеризации – «потенциал точки», который является числовым значением, показывающим плотность входных экспериментальных данных в ее окрестности. Потенциал точки характеризует ее близость к центру кластера [83]. Определение потенциала точки y_i ($i = 1, \overline{v}$) выполняется в соответствии с выражением:

)

$$pot_i = \sum_{j=1, \nu} \exp(-4\alpha^2 (y_i - y_j)^2) \quad (22)$$

где $\alpha > 0$ - коэффициент, определяющий степень компактности кластера. При использовании (22) экспериментальные данные следует нормализовать на интервале $[0,1]$. Степень принадлежности нечеткому множеству y определяются на базе величин потенциалов в соответствии с выражением:

$$\mu_y(y_i) = \frac{pot_i}{\max_{j=1, \nu} (pot_j)} \quad (23)$$

3.4. Настройка модели оценки технического состояния на примере оценки состояния трансформаторного оборудования

В данном подразделе диссертационной работы описан механизм настройки системы оценки технического состояния электрооборудования, с целью адаптации математической модели к реальному объекту. Пример реализации настройки разработанной системы представлен для оценки состояния силовых трансформаторов на основе данных хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ). Демонстрация настройки разработанной системы на основе данных ХАРГ обусловлена высокой вероятностью (95%) совпадения прогнозируемого и существующего дефекта трансформатора при использовании данного метода диагностирования.

3.4.1. Определение структуры нейро-нечеткого-логического вывода

Настройка разработанной модели заключается в определении оптимальной структуры нейро-нечеткого логического, которая в свою очередь напрямую зависит от вида и числа функций принадлежности для каждого из входных параметров, а также качества формирования обучающей выборки. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо определить число и вид функций принадлежности и сформировать обучающую выборку.

3.4.2. Определение функций принадлежности

Определение вида функций принадлежности осуществляется, как было описано в подразделе 3.2.3, для каждого из методов (потенциалов и нечеткой

кластеризации) на примере определения вида функций принадлежности в задачах оценки состояния 74 силовых масляных трансформаторов напряжением 110 кВ сопоставимой мощности и однотипной конструкции.

Важно отметить, что определение вида функций принадлежности с помощью методов потенциалов и нечеткой кластеризации является предварительным этапом, поэтому требуется дополнительный анализ по каждому из полученных видов функции принадлежности.

При анализе трансформаторного масла определяются концентрации этила (C_2H_4), ацетилена (C_2H_2), метана (CH_4), водорода (H_2) и этилена (C_2H_6). Рассчитываются концентрации пар газов: C_2H_2/C_2H_4 (А), CH_4/H_2 (В), C_2H_4/C_2H_6 (С) и по полученным значениям делается вывод о возможном характере дефектов. Согласно [85] каждое из сочетаний соотношений концентраций пар газов соответствует определенному дефекту (Табл. 6). Определение возможных видов функций принадлежности выполняется для каждого из возможных дефектов.

После предварительного определения вида функций принадлежности выполнялся расчетный анализ в Matlab с помощью инструментария ANFIS и проводилась оценка работы системы с использованием выбранных функций принадлежности критерию минимальной ошибки обучения сети, для чего выполнялись следующие действия:

1. Задавались функции принадлежности (тип и их количество) на основе предварительного выбора типа функций на предыдущем этапе. Согласно статистике и, принимая во внимание возможные погрешности измерений, граничные значения отношений концентраций газов для всех возможных видов дефектов в ANFIS принимались на 10% больше, чем указано в Табл. 7.

2. Задавались входные и выходные параметры нейро-нечеткого логического вывода.

3. Задавались нечеткие правила продукции вида
 "если $(x_1 \text{ есть } D_1^k \text{ И } \dots \text{ И } x_N \text{ есть } D_N^k)$, то $(y_1 \text{ есть } A)$ ". Правила продукции

формировались также для каждой функции принадлежности с учетом ее граничных значений. Правила продукции для возможных видов дефектов на основе ХАРГ представлены в Табл. 8.

4. Формировалась структура нейро-нечеткого логического вывода.
5. Выполнялся расчетный анализ и оценивалась работа системы.

Таблица 7 – Возможные виды дефектов на основе данных ХАРГ

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов			Обознач. функции
	A	B	C	
Нормальное состояние (NF)	<0.1	0.1-1	≤ 1	f ₁
Электрический дефект				
Частичные разряды с низкой плотностью энергии (LEPD)	<0.1	<0.1	≤ 1	f ₂
Частичные разряды с высокой плотностью энергии (HEPD)	0.1-3	<0.1	≤ 1	f ₃
Разряды малой мощности (LED)	>0.1	0.1-1	1-3	f ₄
Разряды большой мощности (HED)	0.1-3	0.1-1	≥ 3	f ₅
Термический дефект				
Термический дефект низкой температуры (<150°C) (T ₁)	<0.1	0.1-1	1-3	f ₆
Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°C) (T ₂)	<0.1	≥ 1	<1	f ₇
Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°C) (T ₃)	<0.1	≥ 1	1-3	f ₈
Термический дефект высокой температуры (>700°C) (T ₀)	<0.1	≥ 1	≥ 3	f ₉

В рассматриваемом примере некоторые значения отношений концентраций характерных газов совпадают (Табл. 6), поэтому необходимо выполнить два решения:

1. без объединения одинаковых значений в единые функции принадлежности (вариант 1, Табл. 8).

2. с объединением одинаковых значений в единые функции принадлежности (вариант 2, Табл. 8).

Таблица 8 – Возможное количество функций принадлежности для различных отношений концентраций характерных газов

Отношение концентраций газов	Число функций принадлежности для различных отношений концентраций характерных газов		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
	Электрический дефект		
Вариант 1	5	5	5
Вариант 2	3	2	3
	Термический дефект		
Вариант 1	5	5	5
Вариант 2	1	2	3

Объединение одинаковых значений в единые функции принадлежности отразится не только на количестве функций принадлежности, но и на количестве правил продукции и в целом на структуре нейро-нечеткого логического вывода.

Первый вариант структуры нейро-нечеткого вывода

На основе статистических данных с помощью метода потенциалов и метода нечеткой кластеризации в программном комплексе Matlab были построены функции принадлежности (Рис. 15, 16) для всех возможных видов дефектов по результатам ХАРГ, описанных в Табл. 7.

По результатам расчетов (Рис. 15) видно, что определить тип функций принадлежности очень сложно, а метод потенциалов можно использовать только при больших массивах исходных статистических данных, что для решения данной задачи не всегда представляется возможным.

При анализе с помощью метода нечеткой кластеризации полученные функции принадлежности (Рис. 16) можно определить как один из следующих возможных типов:

- симметричная гауссова (Рис. 17-22);

- пи-подобная (Рис. 23-28);
- колоколообразная (Рис. 29-34).

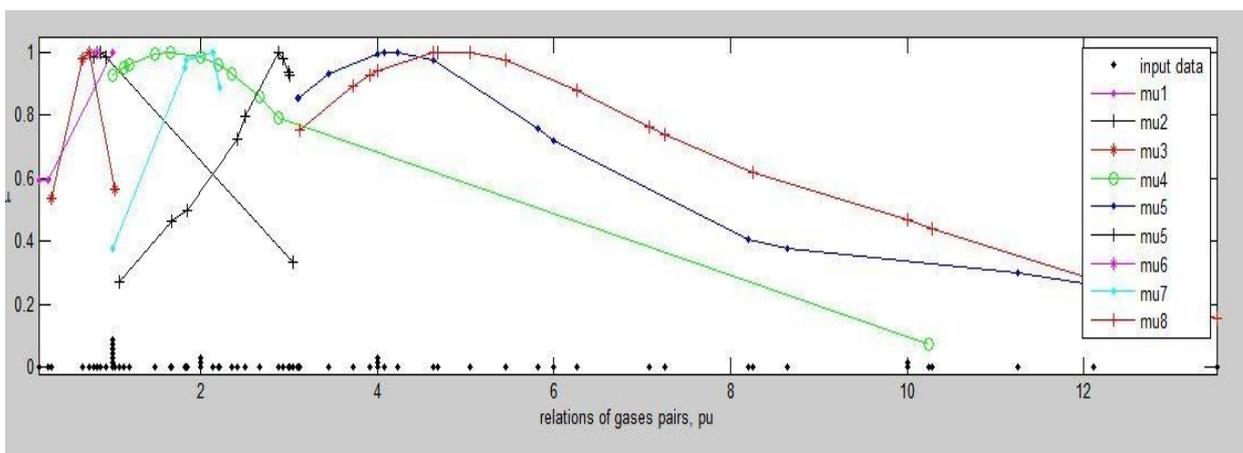


Рисунок 15 – Вид функций принадлежности на основе метода потенциалов

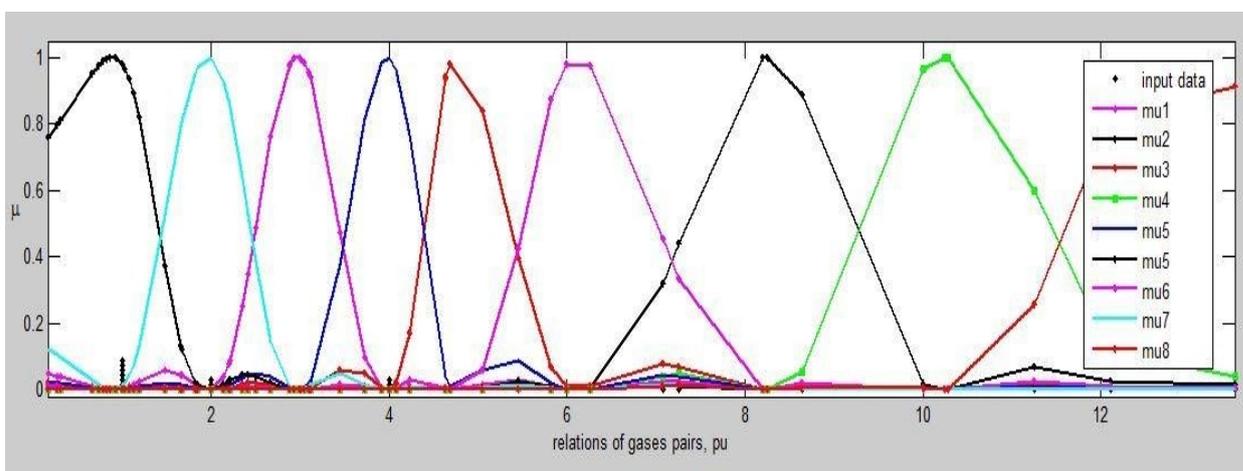


Рисунок 16 – Вид функций принадлежности на основе метода нечеткой кластеризации

В качестве входных параметров нейро-нечеткого логического вывода в данном случае выступают три отношения концентраций газов C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 и C_2H_4/C_2H_6 , а в качестве выходного параметра – один из возможных видов дефектов. Для выявления и термического и электрического характера дефектов формируется одинаковая структура нейро-нечеткого логического вывода (Рис. 18), но для термического характера дефектов внутри структуры используются функции принадлежности (f_1 , f_6 - f_9 , Табл. 7), а для электрического характера дефекта функции принадлежности (f_1 - f_5 , Табл. 7).

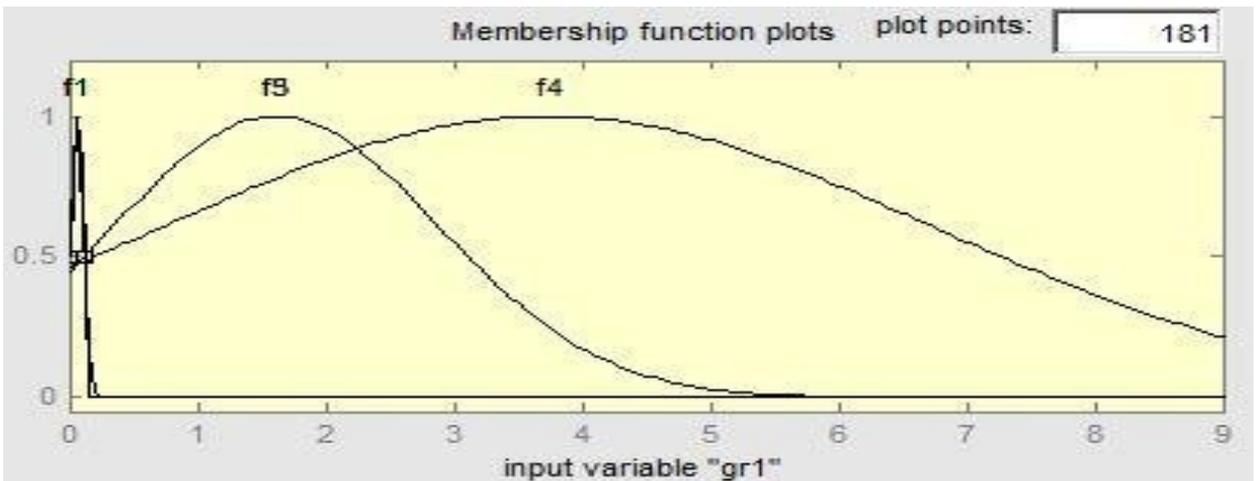


Рисунок 17 – Гауссовы функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

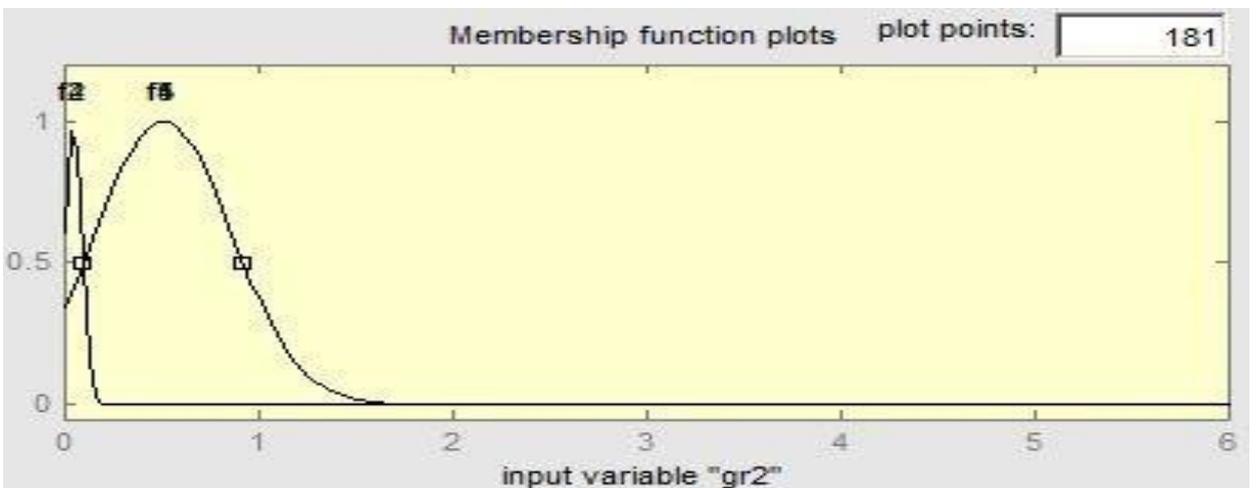


Рисунок 18 – Гауссовы функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

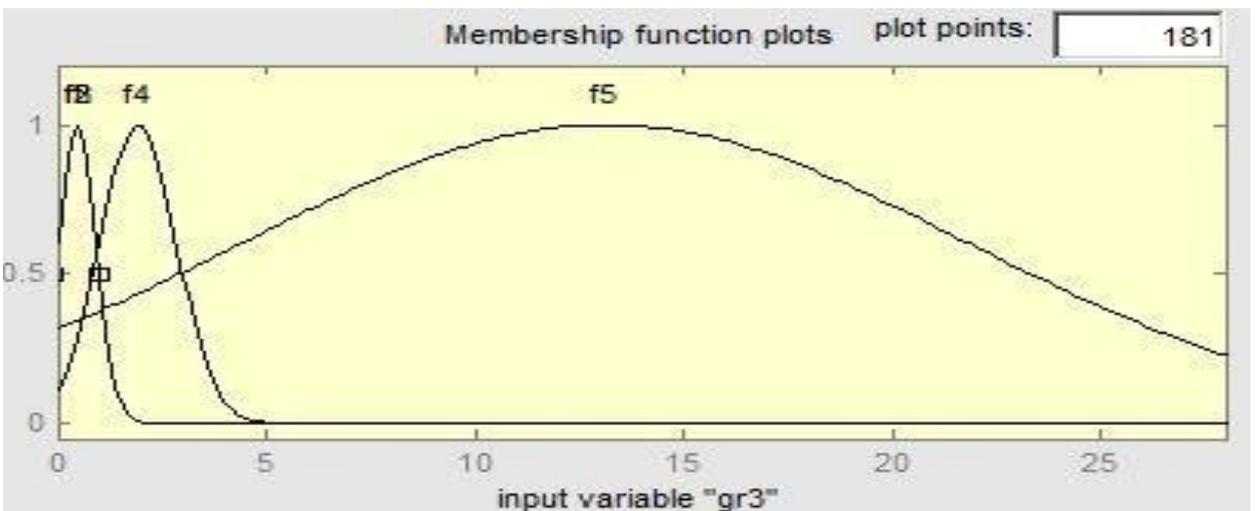


Рисунок 19 – Гауссовы функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

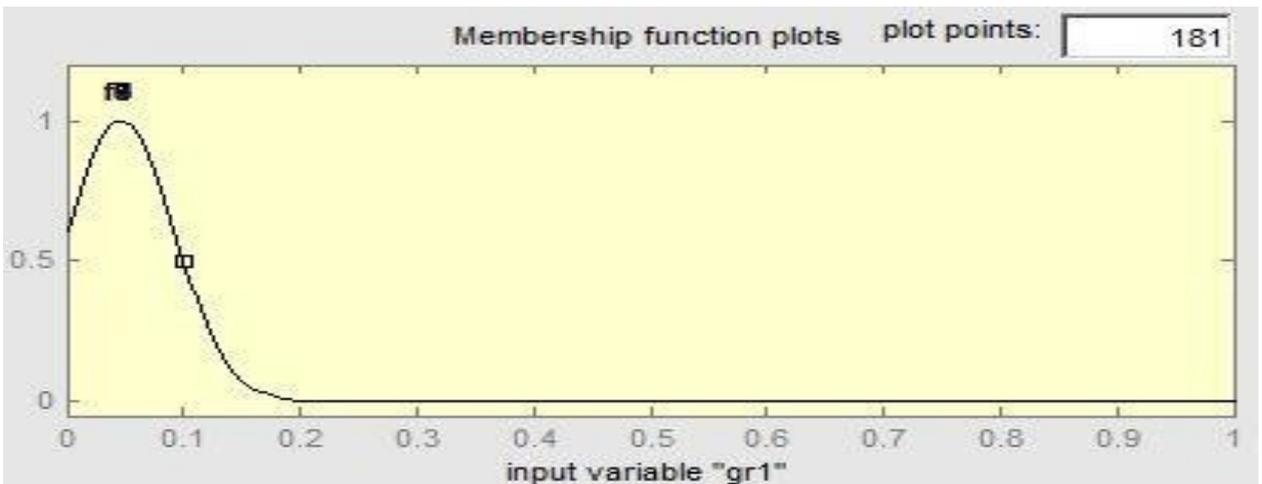


Рисунок 20 – Гауссовы функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

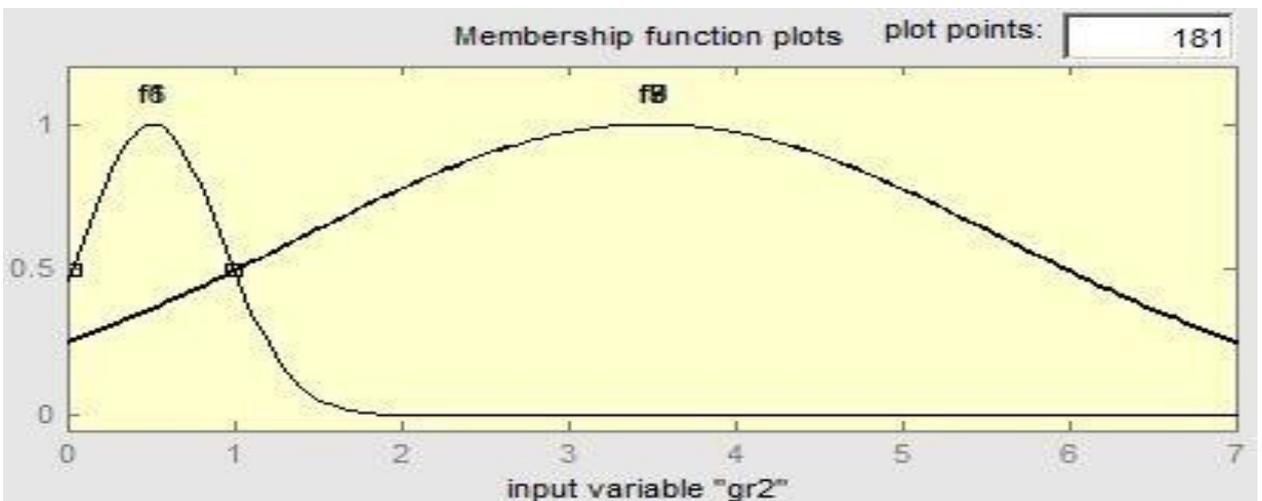


Рисунок 21 – Гауссовы функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

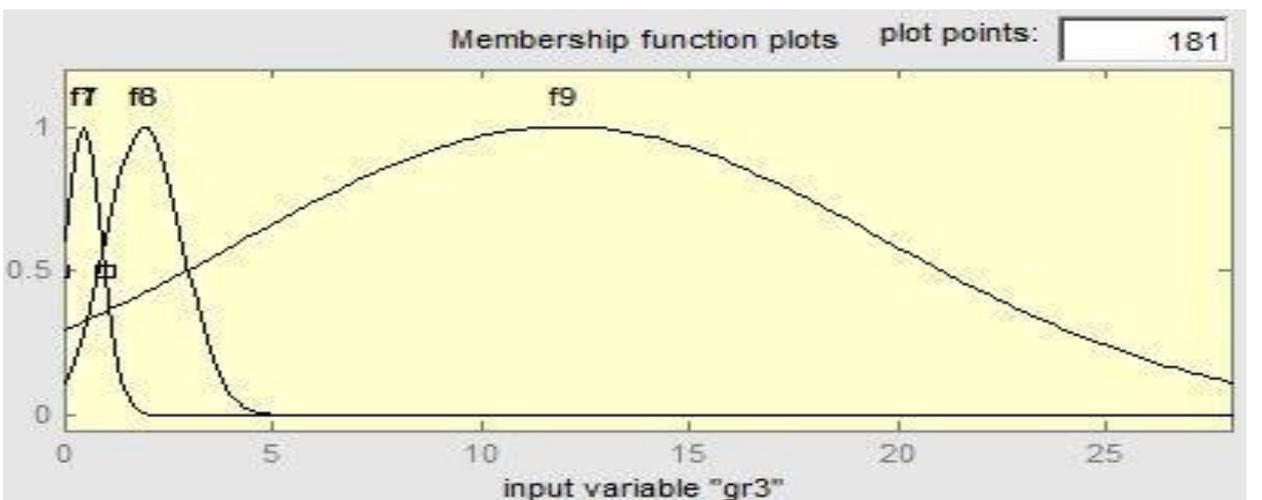


Рисунок 22 – Гауссовы функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

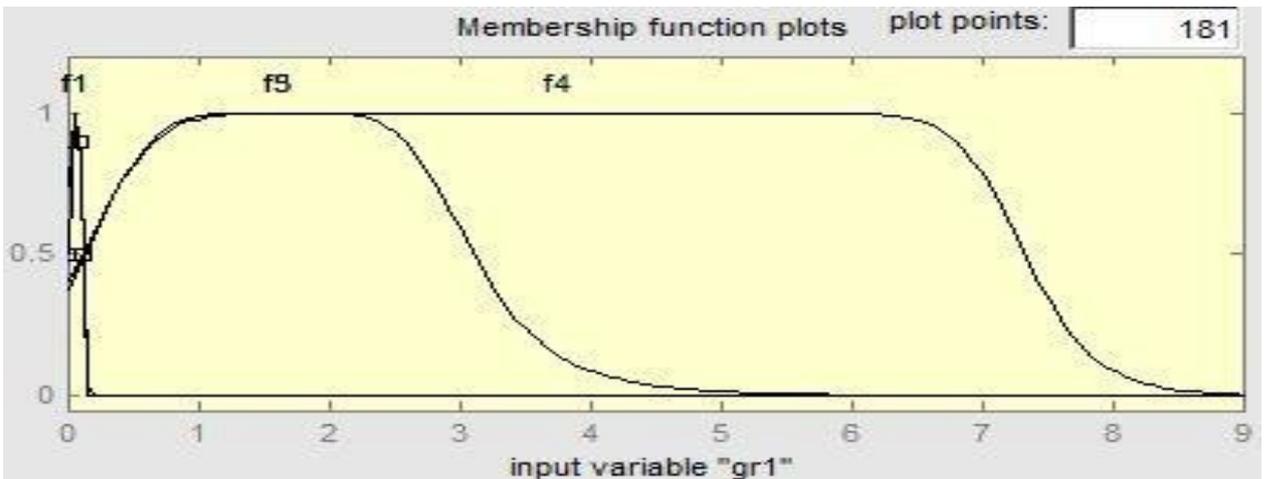


Рисунок 23 – Колоколообразные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

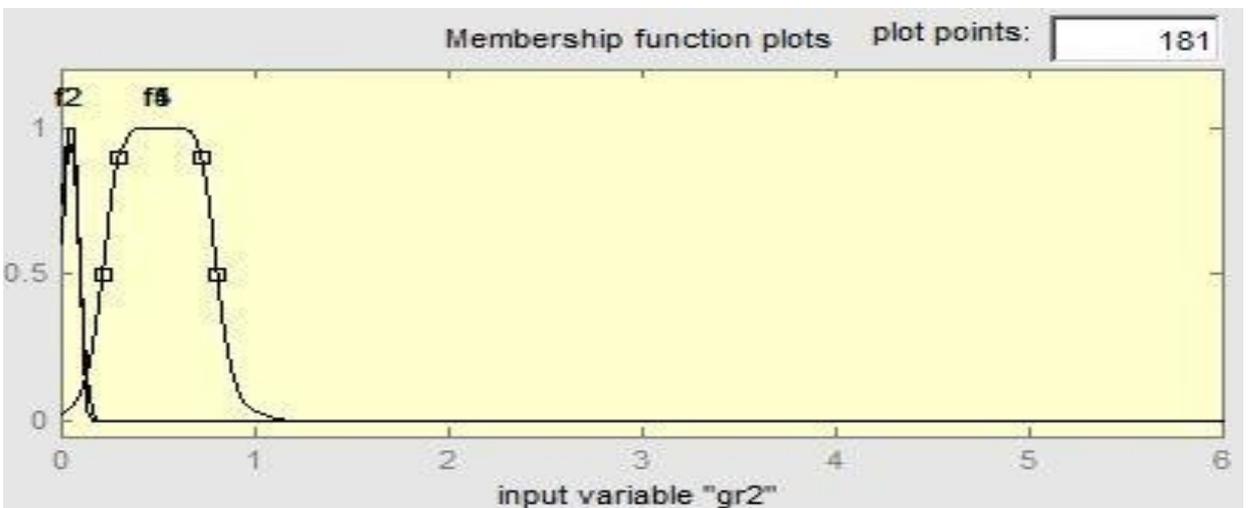


Рисунок 24 – Колоколообразные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

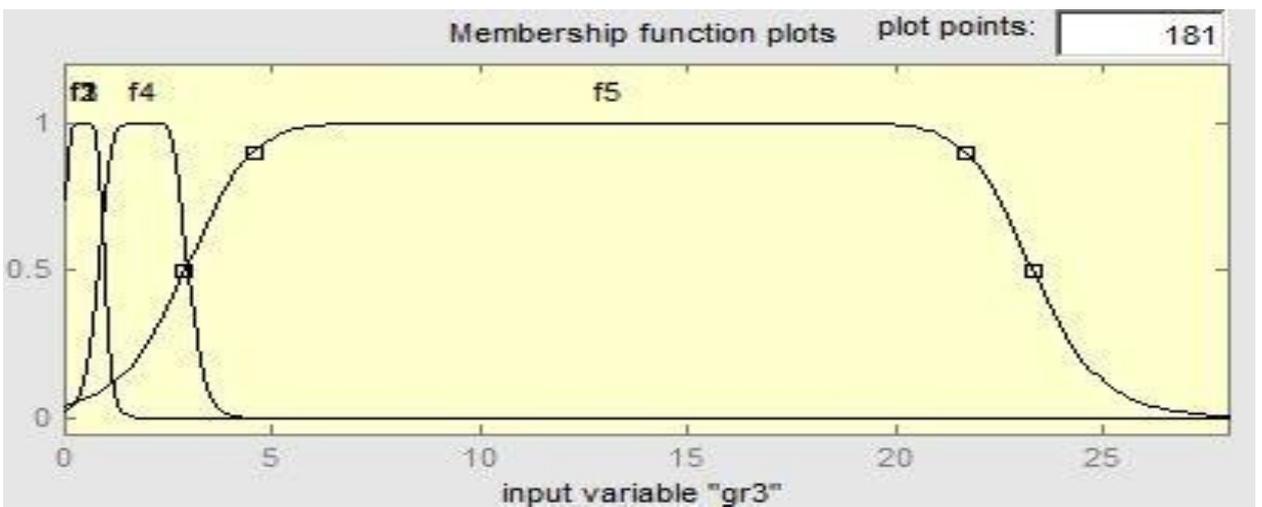


Рисунок 25 – Колоколообразные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

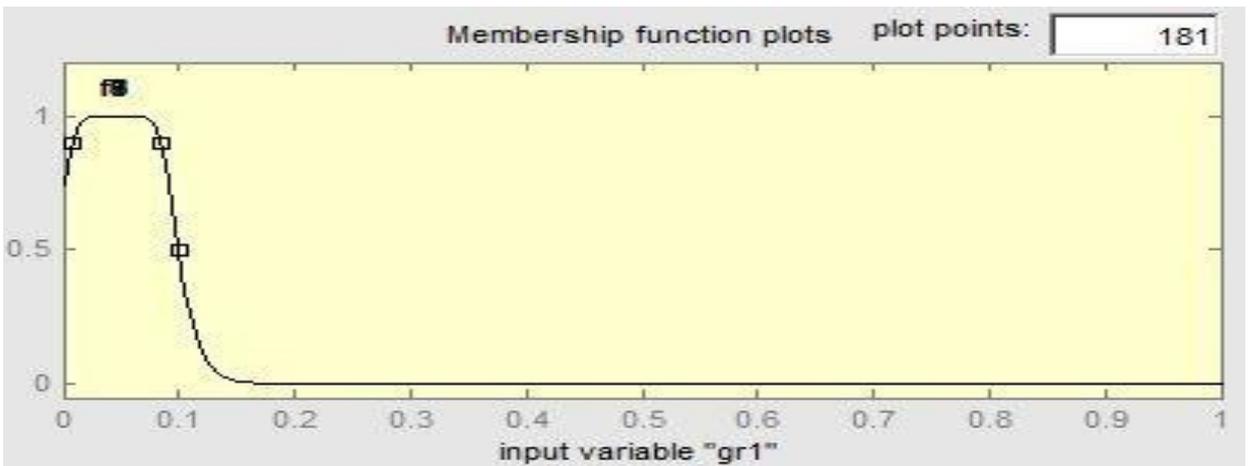


Рисунок 26 – Колоколообразные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

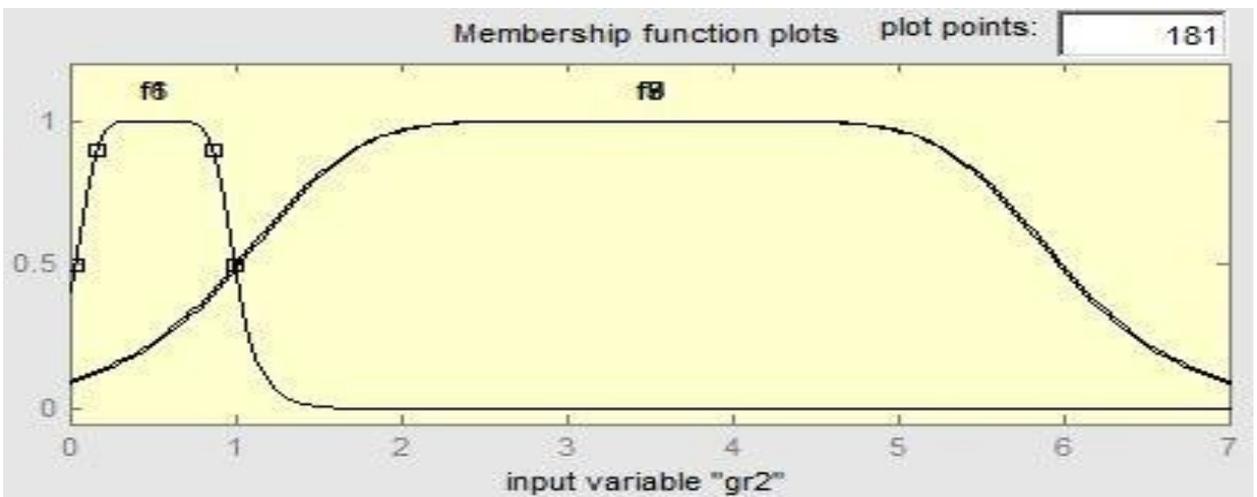


Рисунок 27 – Колоколообразные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

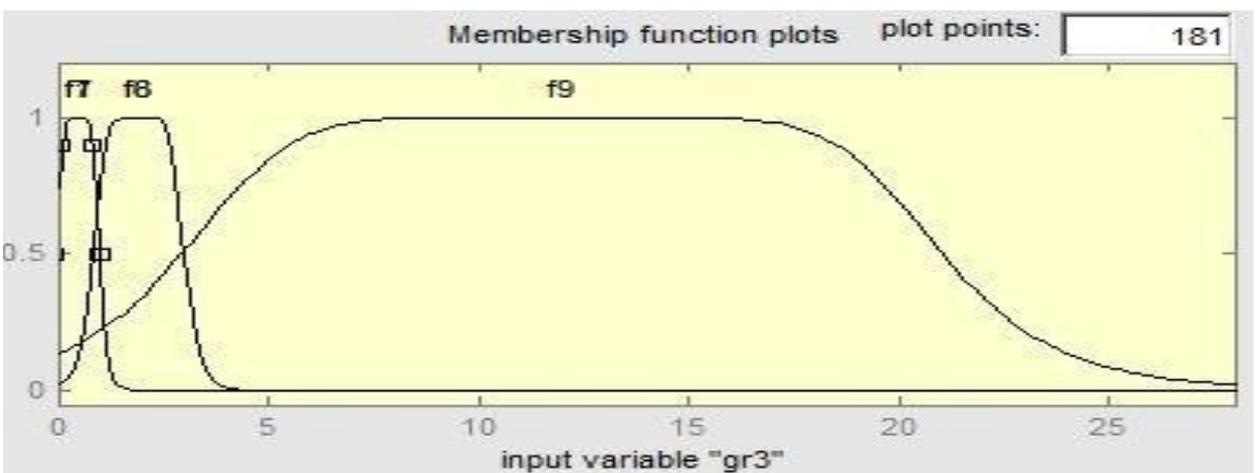


Рисунок 28 – Колоколообразные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

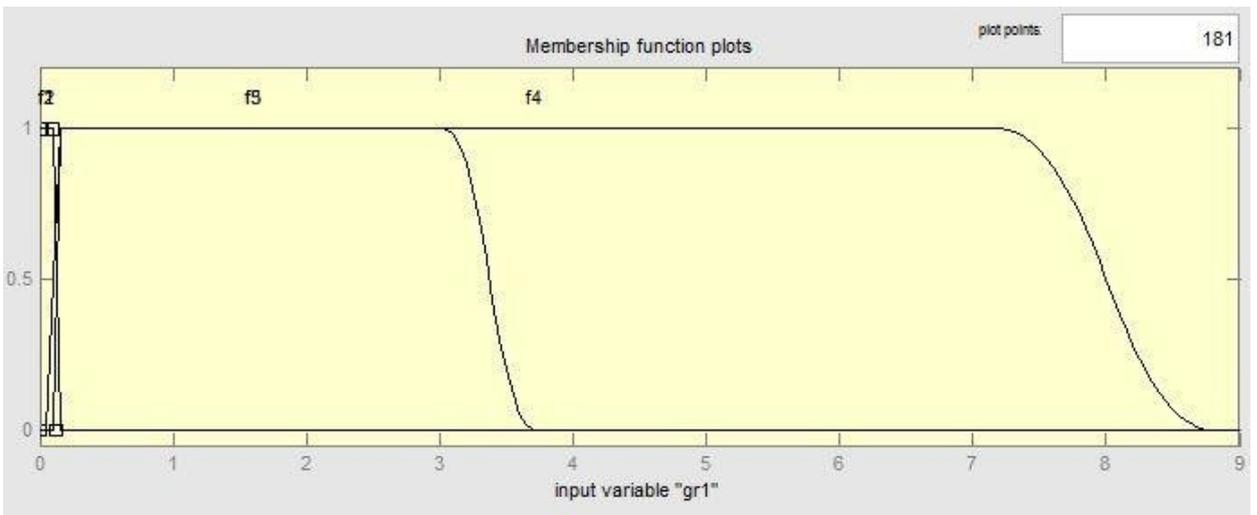


Рисунок 29 – Пи-подобные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

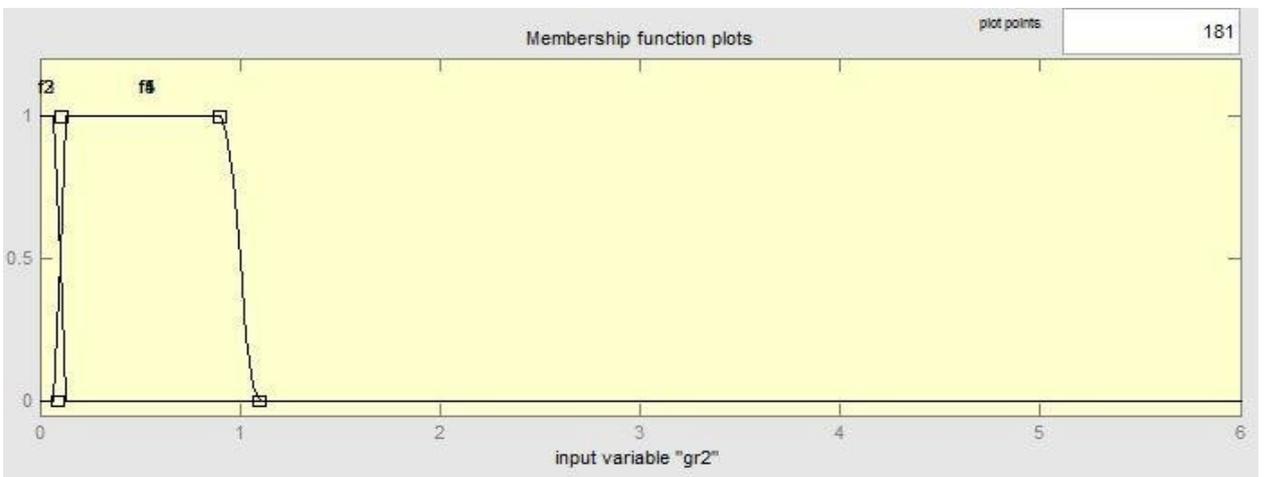


Рисунок 30 – Пи-подобные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

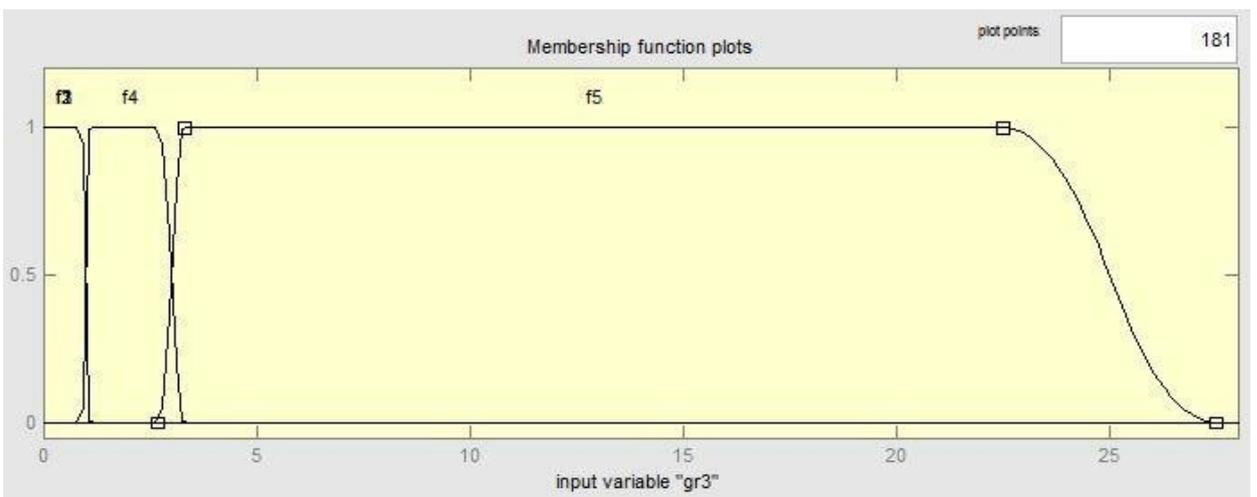


Рисунок 31 – Пи-подобные функции принадлежности для электрического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

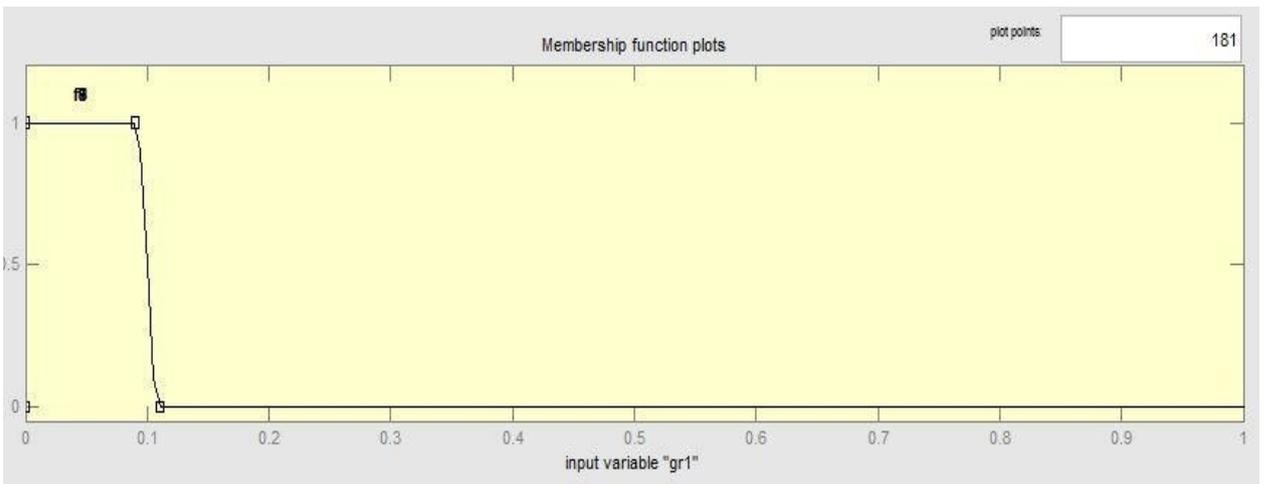


Рисунок 32 – Пи-подобные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_2/C_2H_4

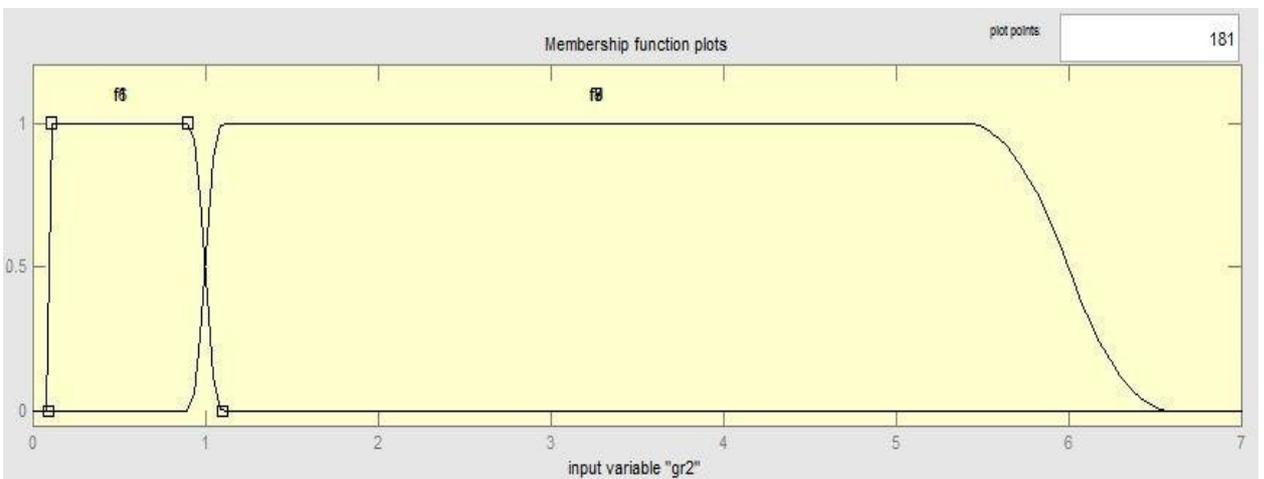


Рисунок 33 – Пи-подобные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов CH_4/H_2

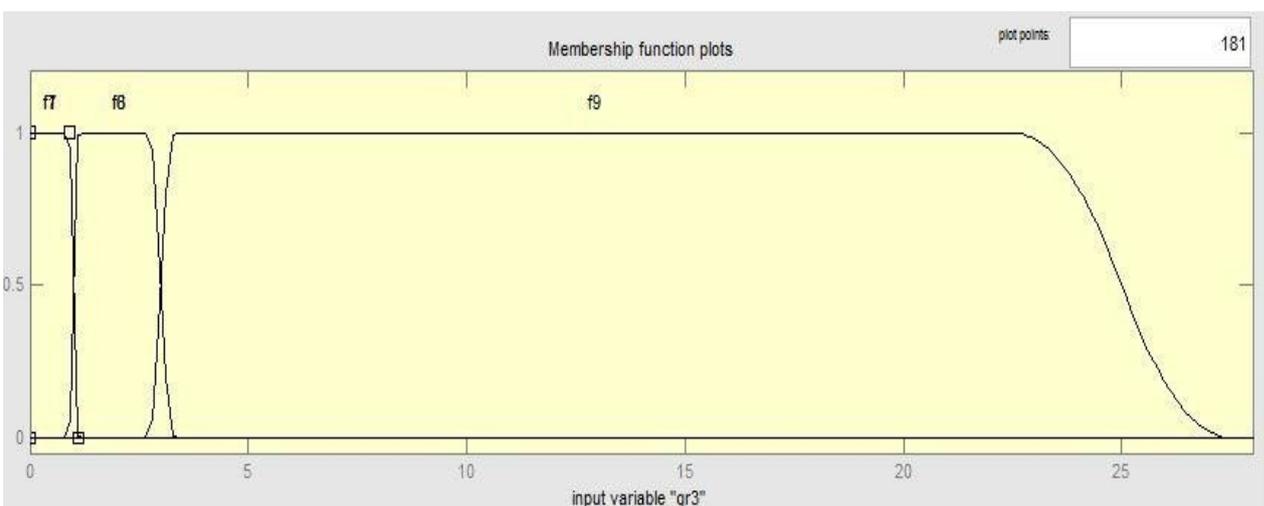


Рисунок 34 – Пи-подобные функции принадлежности для термического характера дефекта для концентраций пар газов C_2H_4/C_2H_6

Нечеткие правила продукции (правила нечеткого вывода) также как и функции принадлежности формируются для каждого вида дефекта и являются формализованными знаниями экспертов (в данном случае данные нормативной документации). Все правила продукции представлены в Табл. 9.

Таблица 9 – Нечеткие правила продукции

№	Нечеткие правила продукции
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is NF)
Электрический дефект	
2	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is LEPD)
3	if (gr1 is f3) and (gr2 is f3) and (gr3 is f3) then (output1 is HEPD)
4	if (gr1 is f4) and (gr2 is f4) and (gr3 is f4) then (output1 is LED)
5	if (gr1 is f5) and (gr2 is f5) and (gr3 is f5) then (output1 is HED)
Термический дефект	
6	if (gr1 is f6) and (gr2 is f6) and (gr3 is f6) then (output1 is T ₁)
7	if (gr1 is f7) and (gr2 is f7) and (gr3 is f7) then (output1 is T ₂)
8	if (gr1 is f8) and (gr2 is f8) and (gr3 is f8) then (output1 is T ₃)
9	if (gr1 is f9) and (gr2 is f9) and (gr3 is f9) then (output1 is T ₀)

Структура нейро-нечеткого логического вывода для выявления характера дефекта в трансформаторе на основе ХАРГ представлена на Рис. 35.

Обучающая выборка для системы нейро-нечеткого логического вывода, представленного на Рис. 35, состоит из данных ХАРГ 74 силовых масляных трансформаторов напряжением 110 кВ сопоставимой мощности и однотипной конструкции, среди которых 32 представлены с дефектом электрического характера, 32 - с дефектом термического характера и 10 представлены нормальным состоянием. Таким образом, обучающая выборка для выявления каждого вида дефекта содержит 42 обучающих примера.

Полный состав обучающей выборки представлен в Приложении А.

Результаты расчетов представлены в Табл. 10.

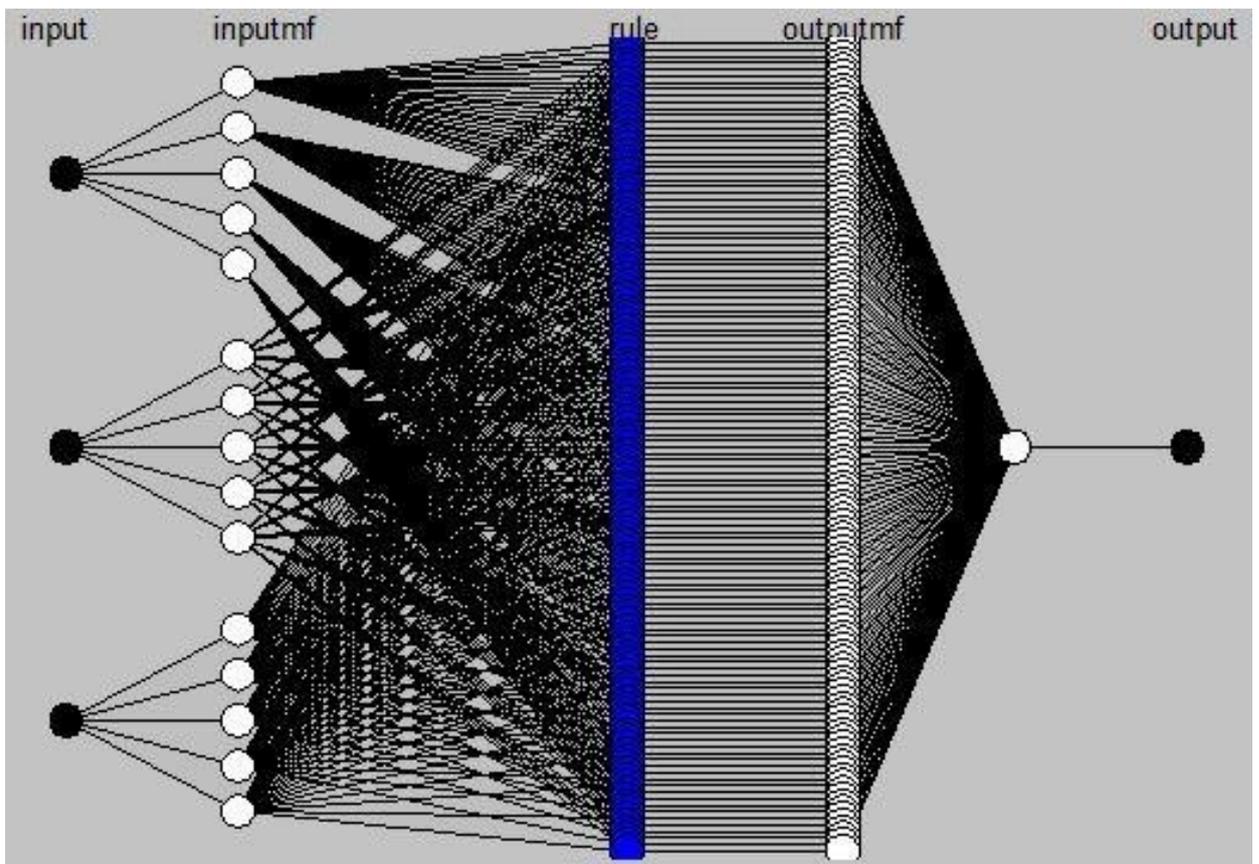


Рисунок 35 – структура нейро-нечеткого логического вывода для выявления характера дефекта в трансформаторе на основе ХАРГ

В качестве основного критерия, по которому выполняются сравнения результатов расчетов модели с использованием различных видов функций принадлежности, выбрана средняя ошибка обучения. Это объясняется необходимостью минимизации эмпирического риска – то есть необходимостью выбрать такой тип функций принадлежности в рамках заданной модели, при которой значение средней ошибки на заданной обучающей выборке было бы минимальным [86].

По результатам расчетов средняя ошибка обучения для электрического характера дефектов при гауссовой функции принадлежности составляет 0,051%, при колоколообразной функции принадлежности - 0,054%, при пи-подобной функции принадлежности - 0,046%; для термического характера дефекта при гауссовой функции принадлежности – 0,053%, при колоколообразной функции принадлежности - 0,054%, при пи-подобной функции принадлежности - 0,047%. Таким образом, наименьшая ошибка

обучения и для электрического и для термического характера дефектов получается при использовании в модели пи-подобных функций принадлежности.

Таблица 10 – Результаты расчетов для определения вида функций принадлежности

ANFIS данные	Значения		
Электрический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообр.	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,051	0,054	0,046
Термический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообр.	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,053	0,054	0,047

Таким образом, по результатам расчетов, исходя из критерия минимальной ошибки обучения, для дальнейшего использования в модели

силового трансформатора 110 кВ для данных ХАРГ были приняты пи-подобные функции принадлежности.

Второй вариант структуры нейро-нечеткого вывода

Вторым возможным вариантом структуры нейро-нечеткого логического вывода является вариант с объединением одинаковых значений в единые функции принадлежности (вариант 2, Табл. 8).

С помощью метода нечеткой кластеризации, как и в предыдущем варианте, вид функций принадлежности можно определить как один из следующих возможных типов: симметричная гауссова; пи-подобная; колоколообразная. Количество функций принадлежности для данного варианта приведено в Табл. 11.

В качестве входных параметров данного нейро-нечеткого логического вывода выступают, как и в предыдущем случае, три отношения концентраций газов – C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 и C_2H_4/C_2H_6 , а в качестве выходного параметра – один из возможных видов дефектов. И так же, как и в предыдущем случае, для выявления характера дефектов формируется своя структура нейро-нечеткого логического вывода (Табл. 11).

Таблица 11 – Возможное количество функций принадлежности для различных отношений концентраций газов

Отношения концентраций	Число функций принадлежности		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
	Электрический дефект		
Вариант 2	3	2	3
	Термический дефект		
Вариант 2	1	2	3

Нечеткие правила продукции, как и функции принадлежности, формируются для каждого вида дефекта (Табл. 12). Структура нейро-нечеткого логического вывода для определения термического и

электрического характера дефектов в трансформаторе на основе ХАРГ представлена на Рис. 36-37. Результаты расчетов представлены в Табл. 13.

Таблица 12 – Нечеткие правила продукции

№	Нечеткие правила продукции
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is NF)
Электрический дефект	
2	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is LEPD)
3	if (gr1 is f2) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is HEPD)
4	if (gr1 is f3) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is LED)
5	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is HED)
Термический дефект	
6	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₁)
7	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is T ₂)
8	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₃)
9	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is T ₀)

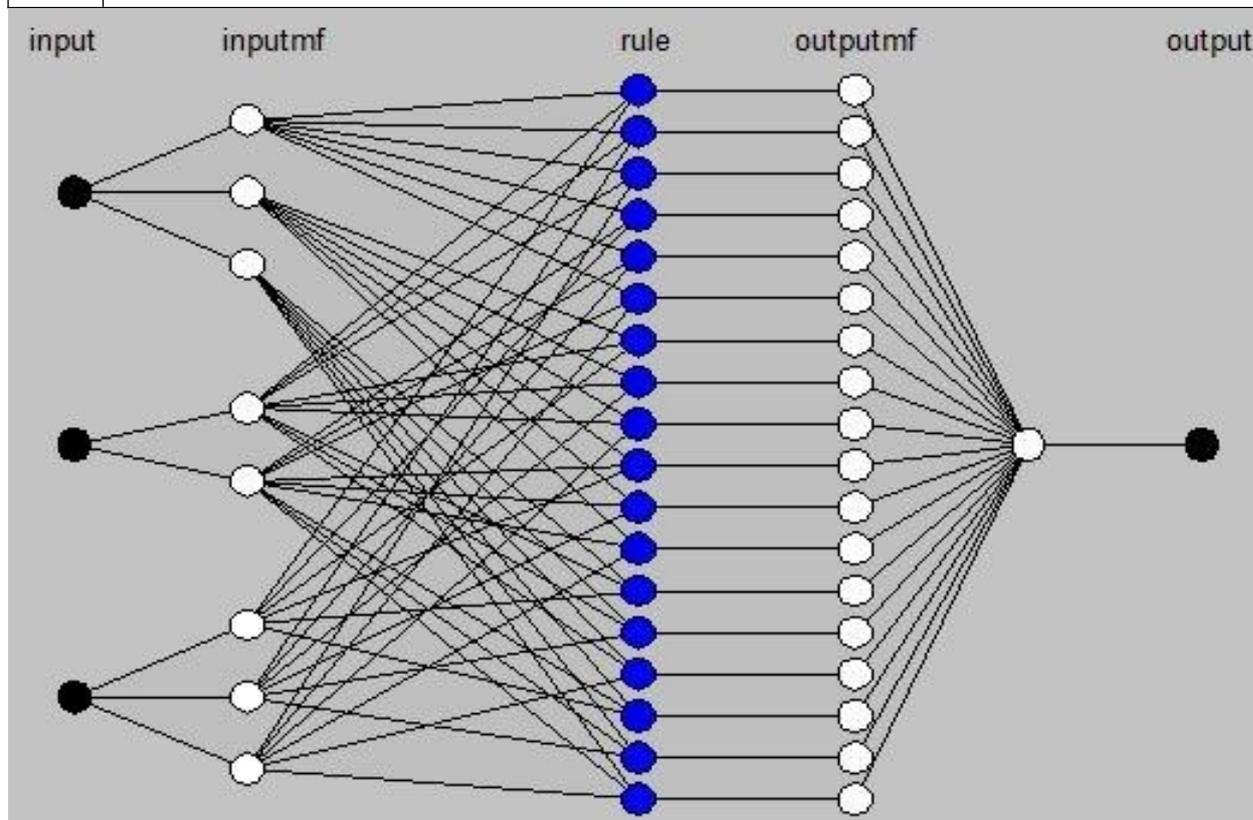


Рисунок 36 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для выявления электрического характера дефекта в трансформаторе

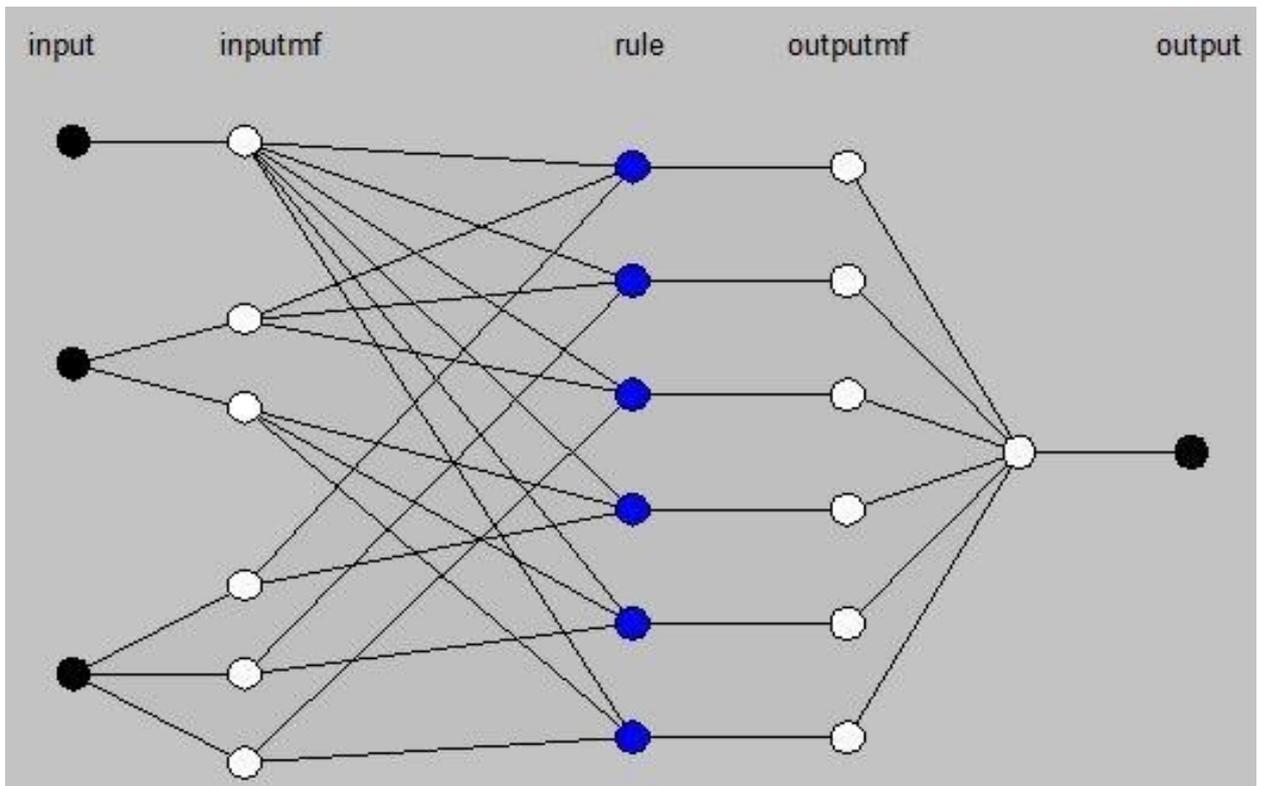


Рисунок 37 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для выявления термического характера дефекта в трансформаторе

Таблица 13 – Результаты расчета для определения вида функций принадлежности

ANFIS данные	Значения		
Электрический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообр.	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число узлов	58	58	58
Число линейных параметров	18	18	18
Число нелинейных параметров	32	32	32
Общее число параметров	42	42	42
Число нечетких правил	18	18	18
Средняя ошибка обучения, %	0,239	0,204	0,185

Продолжение таблицы 13

ANFIS данные	Значения		
Термический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообр.	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число узлов	30	30	30
Число линейных параметров	6	6	6
Число нелинейных параметров	24	24	24
Общее число параметров	30	30	30
Число нечетких правил	6	6	6
Средняя ошибка обучения, %	0,324	0,315	0,287

По результатам расчетов средняя ошибка обучения для электрического характера дефектов при гауссовой функции принадлежности составляет 0,239%, при колоколообразной функции принадлежности - 0,204%, при пи-подобной функции принадлежности - 0,185%; для термического характера дефекта при гауссовой функции принадлежности – 0,324%, при колоколообразной функции принадлежности - 0,315%, при пи-подобной функции принадлежности - 0,287%.

В Табл. 14 представлены итоговые значения средней ошибки обучения по различным вариантам использования числа и вида функций принадлежности.

Таким образом, наименьшая ошибка обучения и для электрического и для термического характера дефектов получается при использовании в модели пи-подобных функций принадлежности. Поэтому для дальнейшего использования в модели силового трансформатора 110 кВ для данных ХАРГ по результатам расчетов по критерию минимальной ошибки обучения были приняты пи-подобные функции принадлежности.

Таблица 14 – Результаты расчета по определению вида функций принадлежности

Отношение концентраций газов	Число функций принадлежности для различных отношений концентраций газов		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Электрический дефект			
Вариант 1	5	5	5
Средняя ошибка обучения, % (Гауссова функция)	0,051		
Средняя ошибка обучения, % (Колоколообр. функция)	0,054		
Средняя ошибка обучения, % (Пи-подобная функция)	0,046		
Вариант 2	3	2	3
Средняя ошибка обучения, % (Гауссова функция)	0,239		
Средняя ошибка обучения, % (Колоколообр. функция)	0,204		
Средняя ошибка обучения, % (Пи-подобная функция)	0,185		
Термический дефект			
Вариант 1	5	5	5
Средняя ошибка обучения, % (Гауссова функция)	0,053		
Средняя ошибка обучения, % (Колоколообр. функция)	0,054		
Средняя ошибка обучения, % (Пи-подобная функция)	0,047		
Вариант 2	1	2	3
Средняя ошибка обучения, % (Гауссова функция)	0,324		
Средняя ошибка обучения, % (Колоколообр. функция)	0,315		
Средняя ошибка обучения, % (Пи-подобная функция)	0,287		

Наименьшая ошибка обучения наблюдается в случае использования первого варианта структуры нейро-нечеткого логического вывода (с количеством 5 функций принадлежности для каждой пары газов).

Данный пример демонстрирует возможность использования метода нечеткой кластеризации для определения вида функций принадлежности в

задачах оценки технического состояния электросетевого оборудования. Итоги расчетов характеризуют метод нечеткой кластеризации как подходящий и дающий хорошие результаты для определения вида функций принадлежности в рамках рассматриваемой задачи.

Тип функций принадлежности и их количество оказывает существенное влияние на результаты работы системы оценки технического состояния электросетевого оборудования, поэтому для каждого объекта необходимо определить, в том числе расчетным путем, оптимальные вид и число функций принадлежности.

3.4.3. Формирование обучающей выборки

Как уже упоминалось, одним из преимуществ ИНС является возможность обучения. Для этого в системе нейро-нечеткого вывода формируется обучающая выборка. Репрезентативность (структурированность) обучающей выборки также влияет на результаты работы системы [87,88], поэтому, прежде чем перейти к использованию адаптивной системы нейро-нечеткого вывода, необходимо выполнить предварительный анализ обучающей выборки.

Формирование обучающей выборки для любой задачи, в том числе и задачи оценки технического состояния оборудования, сводится к оптимизации этой выборки [89,90]. Оптимальная обучающая выборка должна обладать тремя основными свойствами:

- быть достаточной - число обучающих примеров должно быть достаточным для обучения;
- быть разнообразной – иметь большое число разнообразных комбинаций вход-выход при учете, что все классы, характерные для исходного множества, будут представлены;
- быть равномерной – примеры должны быть представлены приблизительно в одинаковых пропорциях.

Рассмотрим задачу формирования обучающей выборки на примере использования диагностических данных о состоянии оборудования. В этом случае обучающая выборка – это совокупность данных, полученных в ходе эксплуатации оборудования при участии экспертов для постановки диагнозов.

Для любого вида оборудования существует три варианта формирования обучающей выборки:

1. В случае отсутствия достаточной ретроспективной информации в виде диагностических данных о рассматриваемом объекте (неполная и недостоверная информация) обучающая выборка формируется на основе диагностических данных по аналогичным объектам сопоставимой мощности и однотипной конструкции.
2. При наличии диагностических данных о рассматриваемом объекте (неполная достоверная информация) обучающая выборка формируется на основе имеющихся диагностических данных с использованием диагностических данных по аналогичным объектам сопоставимой мощности и однотипной конструкции.
3. Если информация представляется не диагностическими данными, а данными измерений без постановки диагнозов, например с датчиков (вибрации, газосодержания и влагосодержания в масле и т. п.) без алгоритмов контроля параметров (полная недостоверная информация), то такую информацию необходимо предварительно проверить на наличие «выбросов».

При обработке информации, полученной с различных измерительных приборов, зачастую приходится иметь дело с выбросами – измерениями, которые резко выделяются среди всей совокупности и не подчиняются теоретическому нормальному распределению. Природа таких выбросов может быть любая – неточность приборов, неправильный способ измерения и т. д. Наблюдаются односторонние и двухсторонние отклонения, соответственно в меньшую и большую стороны [91].

Количество данных в выборке заранее неизвестно, так как в зависимости от объекта оно может варьироваться от десятков до сотен, поэтому анализ влияния данных обучающей выборки на результат работы системы выполнялся на основе нескольких наиболее часто используемых критериев [92]:

1. Критерий Романовского

$$c = \frac{|\chi^2 - df|}{\sqrt{2df}}, \quad (24)$$

где χ^2 - критерий согласия Пирсона, $\sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f'_i)^2}{f'_i}$, где k - число групп, на которые разбито эмпирическое распределение, f_i - наблюдаемая частота признака в i -й группе, f'_i - теоретическая частота, df - число степеней свободы.

2. Критерий Ирвина

$$\lambda = \frac{|y(t) - y(t-1)|}{\sigma}, \quad (25)$$

где $y(t-1)$ - предыдущее значение параметра в вариационном ряду, σ - среднеквадратичное отклонение.

3. Критерий Колмогорова-Смирнова

$$\lambda = d_{\max} \sqrt{n}, \quad (26)$$

где d_{\max} - максимум модуля разницы между функцией распределения для теоретического $F(x)$ и эмпирического $W_n(x)$ распределений, n - первые

элементы выборки.

4. Критерий « 3δ » в интервале

$$\bar{x} \pm 3\delta, \quad (27)$$

где $\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ - среднеквадратическое отклонение, x_i - i -ый элемент

выборки; \hat{x} - среднее арифметическое выборки; n - объем выборки.

Критерий "трех сигм" применяется для результатов измерений, распределенных по нормальному закону [92].

В ходе выполнения диссертационной работы оценивалось влияние каждого из критериев на результат работы системы нейро-нечеткого логического вывода. Результаты приведены в Табл. 15. Для анализа были выбраны данные, полученные с датчика газосодержания в масле силового трансформаторов мощностью 40 МВА и напряжением 110 кВ, состоящие из 78 измерений. В ходе анализа принимались во внимание следующие показатели:

- количество выбросов в зависимости от критерия;
- число пар случаев в выборке после исключения выбросов (обучающая выборка);
- число элементов в тестовой выборке;
- ошибка обучения и ошибка тестирования.

Тестовая выборка состояла из 40 случаев с датчика газосодержания в масле силового трансформаторов мощностью 40 МВА напряжением 110 кВ. Кроме перечисленных критериев рассматривалась также первоначальная выборка исходных значений.

В подразделе 3.3 данной работы уже был выполнен анализ функций принадлежности для представленной модели и в ходе практических расчетов было определено, что оптимальными функциями принадлежности для структуры нейро-нечеткого логического вывода на основе данных хроматографического анализа растворенных в масле газов являются пи-подобные функции принадлежности (Табл. 14).

Анализ влияния различных критериев на оценку фактического состояния электрооборудования показывает, что лучшие результаты по настройке системы (наименьшая ошибка обучения) и при проверке тестовой выборки наблюдаются при использовании критерия Романовского.

Худшие результаты, как и ожидалось, наблюдаются при использовании исходной выборки без применения каких-либо критериев, что еще раз

подчеркивает необходимость предварительной работы с данными перед использованием в системе оценки фактического состояния.

Таблица 15 – Влияние различных критериев на результат работы системы нейро-нечеткого логического вывода

№	Критерий	Выбросы, шт.	Число пар в выборке после исключ. выбросов, шт.	Число пар в тестируемой выборке, шт.	Ошибка обучен., %	Ошибка тест., %
1	Романовского	12	66	40	0,00006	0,83
2	Ирвина	1	77	40	0,05570	1,47
3	Смирнова	7	71	40	0,00360	0,97
4	Зδ	7	71	40	0,00360	0,97
5	Исходная выборка		78	40	0,05640	2,23

Анализ влияния различных критериев на результаты работы системы нейро-нечеткого логического вывода выявил наибольшее число «ошибочных» измерений в обучающей выборке при использовании критерия Романовского. Поэтому, несмотря на наименьшие ошибки тестирования и обучения при расчете, данный критерий не является оптимальным. При исключении «ошибочных» измерений и анализе полученной обучающей выборки стало ясно, что она не удовлетворяет требованиям равномерности и представительности.

Следующими значениями, дающими удовлетворительные результаты по критерию наименьших ошибок обучения и тестирования, являются значения, полученные в ходе использования критериев Смирнова и Зδ. Анализ обучающих выборок, полученных после исключения «ошибочных» измерений, приведенный для обоих критериев, выявил, что только при использовании критерия «Зδ» выборка удовлетворяет всем трем требованиям – представительности, равномерности и непротиворечивости. В соответствии с изложенным, для дальнейших расчетов принимался критерий «Зδ». Еще раз

напомним, что свойство равномерности характеризует равномерность распределения данных в обучающей выборке по диагнозам, свойство противоречивости – количество одинаковых объектов, принадлежащих к разным классам, свойство представительности является не только критерием наличия достаточного числа данных по каждому из диагнозов, но и критерием отсутствия повторяющихся данных.

Все вышесказанное говорит о том, что нельзя использовать в качестве критерия наилучшего решения только ошибки тестирования и обучения нейро-нечеткого логического вывода. Дополнительно необходимо проанализировать, какие именно измерения система распознает в качестве «ошибочных» и удовлетворяет ли полученная выборка (после исключения «выбросов») всем перечисленным требованиям.

Удаление данных после обработки обучающей выборки выполняется только для данных третьего типа, которые относятся к классу «полная недостоверная» информация, так как эта информация является совокупностью данных, не имеющих конкретного диагноза (заключения) по каждому набору данных. Два других типа информации не нуждаются в проверке на наличие выбросов, так как условно мы принимаем, что эта информация уже обработана экспертами и выбросы уже были удалены ранее, а каждому набору данных присвоены свои диагнозы.

Представленный принцип формирования обучающей выборки применим для любой доступной информации об анализируемом объекте.

3.5. Сравнительный анализ с нейронной сетью

С целью оценки эффективности функционирования разработанной системы нейро-нечеткого логического вывода реализовано альтернативное решение, основанное на искусственной нейронной сети типа трехслойного персептрона. Конфигурация модели подразумевает первый и третий слои для ввода и вывода информации, второй для ее хранения и обработки.

В качестве входных параметров приняты отношения концентраций пар газов, признанные в качестве основных обобщенных критериев состояния

силовых трансформаторов. Кодирование входных сигналов x_1, x_2, \dots, x_n происходит по допустимым диапазонам отношений пар газов в зависимости от их проявления или не проявления в определенном диагнозе работоспособности (технического состояния). Диагностическая карта включает девять диагнозов, в том числе, один диагноз, характеризующий состояние как нормальное, четыре диагноза, связанных с электрическими дефектами, и четыре диагноза, идентифицирующие термические дефекты.

В качестве функции активации используется сигмоидальная функция активации (функция Ферми) следующего вида:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-2ks}} \quad (28)$$

где s – выходной сигнал сумматора нейрона; k – константа, коэффициент сжатия функции. Преимуществом сигмоидальной функции активации является ее удобство в применении на практике за счет простого определения производной в аналитическом виде [93,94]:

$$f'(s) = f(s)(1 - f(s)) \quad (29)$$

Выходной сигнал сумматора каждого нейрона представляет собой скалярную величину суммарно взвешенного входного сигнала:

$$s = f(s) \left(\sum_{i=1}^M u_i w_i \right) \quad (30)$$

где M – количество входов, u_i – входной сигнал со входа i , w_i – вес входа i .

Итогом работы нейронной сети является нелинейная модель вида

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n, W^1, W^2, \dots, W^K) \quad (30)$$

где K – количество матриц весовых коэффициентов связей между нейронами разных слоев.

При наличии V пар входных и выходных параметров, представляющих собой обучающую выборку задача, обучение нейронной сети сводится в решении оптимизационной задачи минимизации суммы квадратичных отклонений:

$$\sum_{v=1}^n (F(x^v, \dots, x^v, W^1, W^1 \dots W^K) - \hat{y}^v)^2 \rightarrow \min, \quad (31)$$

где \hat{y}^v – требуемое эталонное значение выходного сигнала [95].

Оптимизация выполнена методом градиентного спуска путем определения приращений пространства весовых коэффициентов и движения в направлении противоположном градиенту.

Показатели эффективности применения системы нейро-нечеткого логического вывода и нейронной сети приведены в Табл. 16

Таблица 16 – Показатели эффективности работы системы нейро-нечеткого логического вывода и нейронной сети

Отношение концентраций газов	Нейро-нечеткий логический вывод		Нейронная сеть	
	Средняя ошибка обучения, %		Средняя ошибка обучения, %	
	Электрич. дефект	Термич. дефект	Электрич. дефект	Термич. дефект
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	0,046	0,047	1,300	0,900
CH ₄ /H ₂				
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆				

Как видно из Табл. 16 наименьшая ошибка обучения наблюдается в случае использования в разработанной модели структуры нейро-нечеткого логического вывода (как в случае определения электрического, так и термического дефектов в трансформаторе). Расчетные показатели свидетельствуют о преимуществе использования нейро-нечеткого логического вывода над методом искусственных нейронных сетей.

3.6. *Определение результирующей оценки технического состояния простого объекта электрической сети*

В результате оценки технического состояния каждого элемента оборудования на основе расчета средневзвешенных оценок и с помощью функций принадлежности формируется итоговая оценка для определения состояния подобъекта

Рассмотрим общий принцип формирования оценки технического состояния подобъекта. В данном случае функции принадлежности LR-типа (треугольной формы): $\mu_i(x) \in R \rightarrow [a; c]$, где R - множество действительных чисел, $[a, c]$ - диапазон изменения параметров переменной, b - наиболее возможное значение переменной, которое задается аналитической формулой:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (32)$$

В результате оценки состояния объекта определяется принадлежность объекта к одному из трех состояний (Рис. 38):

- исправное состояние D_1 , когда объект полностью отвечает всем техническим требованиям. Исправное состояние всегда является работоспособным;
- неисправное, но работоспособное состояние D_2 , когда техническим требованиям соответствуют лишь те свойства объекта, которые характеризуют его способность выполнять заданные функции;
- предельное состояние D_3 – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам опасности, экономическим или экологическим [50].

В разработанной системе оценки состояния оборудования алгоритм Такаги-Сугено используется для предварительной классификации неисправностей объекта или определения его состояния. Обобщенная оценка состояния подобъекта определяется на основе средневзвешенной балльной оценки его элементов (частные оценки) с применением шкалы относительной важности Саати $\{1, 3, 5, 7, \dots\}$ с использованием функций принадлежности, показанных на Рис. 38.

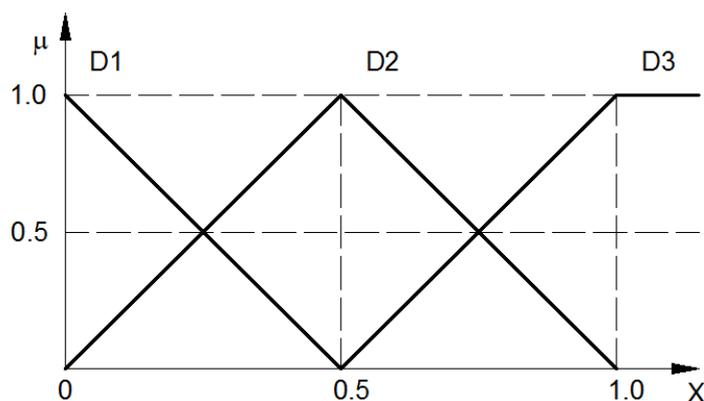


Рисунок 38 – Состояния оборудования

Следует отметить, что поскольку разработанная система позиционируется в качестве экспертной и играет роль «помощника-советника» для персонала, то любая итоговая оценка состояния подбъекта соответствует определенным ранжированным альтернативам решений по его дальнейшей эксплуатации. Возможные решения определяются с использованием функций принадлежности (Рис. 39) и могут быть следующие:

1. оставить в эксплуатации (E_1);
2. провести дополнительные испытания или измерения (E_2);
3. выполнить ремонт (E_3);
4. вывести из эксплуатации (E_4).

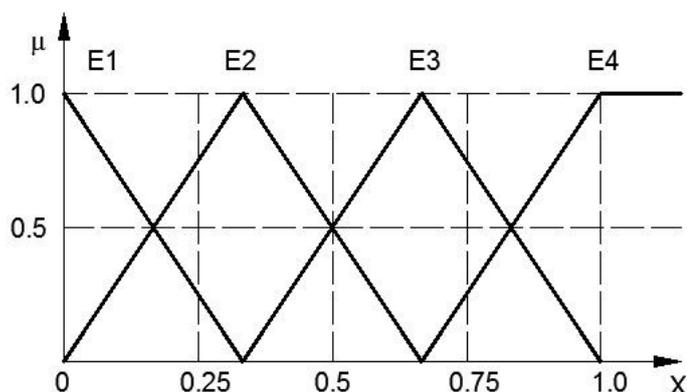


Рисунок 39 – Совокупность возможных решений

Другими словами, второй этап системы оценки технического состояния электросетевого оборудования можно классифицировать как нечеткую

многокритериальную задачу анализа множества частных решений $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, содержащую n элементов (групп параметров), которые получены на первом этапе [96].

Таким образом, в данном случае реализация системы поддержки принятия решений будет заключаться в определении оптимального решения (с учетом ранжирования возможных решений) по дальнейшей эксплуатации электросетевого оборудования на основе оценки его состояния на базе доступной агрегированной информации об объекте исследования с помощью нейро-нечеткого логического вывода.

3.7. Выводы

Рассмотрены основные аспекты формирования системы нейро-нечеткого логического вывода для решения задачи оценки технического состояния электросетевых объектов. Сформулированы принципы построения нейро-нечеткого логического вывода для математической реализации решения задачи оценки технического состояния электросетевых объектов.

Адаптирована структура нейро-нечеткого логического вывода Такаги-Сугено для оценки технического состояния электросетевых объектов.

В ходе разработки системы оценки технического состояния рассмотрены различные способы задания характеристических функций принадлежности в зависимости от масштаба решаемой задачи, доступных для анализа параметров и их граничных значений.

Доказана необходимость индивидуального подхода к определению характеристических функций, определяющего необходимое и достаточное число функций принадлежности с учетом пороговых значений, а также их формы представления.

Расчетный пример для определения вида функций принадлежности демонстрирует возможность использования метода нечеткой кластеризации в задачах оценки технического состояния электросетевого оборудования. Итоги расчетов характеризуют метод нечеткой кластеризации как

подходящий и дающий хорошие результаты для определения вида функций принадлежности в рамках рассматриваемой задачи.

В ходе диссертационного исследования также было проанализировано влияние полноты и достоверности обучающей выборки, а также типа и формы функций принадлежности на достоверность результата оценки состояния объектов электрической сети. На основе представленного анализа определены критерии достоверности итогового результата разработанной системы: ошибки тестирования и обучения сети, а также качественный анализ ошибок.

4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В данном разделе рассмотрена реализация разработанной модели на примере оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов напряжением 110 кВ. В расчетном примере в качестве входных параметров для работы гибридной нейронной сети были выбраны все доступные данные по результатам технического диагностирования анализируемых объектов.

Эффективность предложенной модели подтверждается расчетами, выполненными в программной среде Matlab с помощью системы нейро-нечеткого логического вывода (adaptive neuro fuzzy inference system - ANFIS).

Рассматриваемый подобъект – «силовой масляный трансформатор 110 кВ» – состоит из следующей совокупности элементов:

- магнитопровод (ярма и стержни; стяжные шпильки; элементы крепления магнитопровода);
- обмотка (обмотки ВН, СН, НН; отводы обмоток; детали крепления обмоток);
- твердая изоляция (витковая изоляция; межслоевая изоляция; межкатушечная изоляция; барьеры);
- трансформаторное масло (в баке трансформатора);
- система охлаждения (трубки охладителей; электронасос; двигатель электронасоса; шкаф управления);
- высоковольтные вводы (остов ввода; масло ввода; устройство ПИН; крышка);
- бак (корпус; крышка; элементы уплотнения; расширитель; фильтр расширителя);
- система регулирования под нагрузкой (РПН) (масло в РПН; контактор; избиратель; привод; шкаф управления);
- внешние контактные соединения.

Каждый элемент характеризуется своими возможными видами дефектов и/или неисправностей и принадлежностью к какому-либо состоянию, которые определяются на основе параметров, полученных в ходе эксплуатации или диагностики (испытаний).

4.1 Оценка состояния работы системы

В связи с большой размерностью решаемой задачи при апробации разработанной модели оценка технического состояния силовых масляных трансформаторов 110 кВ (сопоставимой мощности и однотипной конструкции) была выполнена на основе данных диагностики и испытаний следующих элементов:

- трансформаторного масла (в баке трансформатора) – по данным хроматографического анализа растворенных в масле газов;
- магнитопровода – по данным измерений холостого хода;
- твердой изоляции – по данным измерений сопротивления изоляции обмоток;
- общего состояния обмоток – по данным омических сопротивлений обмоток, а также по году выпуска трансформатора и году проведения его капитального ремонта (данные об эксплуатационном ресурсе).

Для каждого элемента была разработана своя конструкция нейронечеткого логического вывода Такаги-Сугено (Рис. 40-43). Точность настройки разработанной системы оценивалась на основе обучающей выборки, состоящей из данных по 74 силовым масляным трансформаторам 110 кВ сопоставимой мощности и однотипной конструкции; точность работы системы оценивалась на основе тестовых выборок.

4.2 Оценка состояния трансформаторного масла

Масло в трансформаторе является жидкой изоляцией и теплоотводящей средой и представляет собой очищенную фракцию нефти. Свойства масла полностью зависят от состава нефти [97].

Заключение о состоянии трансформатора и его возможных неисправностях можно сделать на основе анализа трансформаторного масла, а точнее на основе хроматографического анализа растворенных в масле газов.

В расчетном примере анализ трансформаторного масла производился по данным хроматографического анализа растворенных в масле газов на основе анализа соотношения концентраций пар газов: C_2H_2 / C_2H_4 (ацетилен/этил) (обозначим X), CH_4 / H_2 (метан/водород) ($Y = C_2H_4 / C_2H_6$), (этил/этилен) (Z). По значениям соотношения концентраций этих трех пар делался вывод о воздействиях, которым подвергалось масло, и возможном характере дефектов в трансформаторе.

Практика показывает, что вероятность совпадения прогнозируемого и существующего дефекта трансформатора при использовании ХАРГ составляет 95%, поэтому в данной системе на основе результатов ХАРГ предполагалось не просто определить принадлежность к состоянию, а определить вид дефекта.

Все возможные дефекты, диагностируемые при использовании ХАРГ (Табл. 17), условно были разделены на две группы – электрические и термические. С целью выявления дефектов каждой группы в разработанную модель оценки технического состояния интегрировались отдельные структуры нейро-нечеткого логического вывода, сформированные по индивидуальным правилам. Каждая структура в своем составе в качестве базовой характеристики содержала нормальное состояние оборудования.

Вид функций принадлежности был определен на основе метода нечеткой кластеризации, который описан в третьем разделе настоящей диссертационной работы и представлен в Приложении Б.

В результате анализа были определены три возможных вида функций принадлежности:

- гауссова,
- пи-подобная;

- колоколообразная.

Следует отметить, что некоторые значения отношений концентраций газов, приведенных в Табл. 18, совпадают. С целью определения возможности оценки состояний однотипными и/или универсальными функциями принадлежности был выполнен анализ двух возможных решений (Табл. 13):

- вариант с помощью объединения одинаковых значений в единые универсальные функции принадлежности;
- вариант с пятью функциями принадлежности для каждой входной переменной.

В ходе расчетов и при настройке системы было определено, что оптимальным является второй вариант – с пятью функциями принадлежности для каждой входной переменной. На основе положений, указанных в третьей главе диссертационной работы, разработаны нечеткие правила продукции, представленные в Табл. 17.

Таблица 17 – Нечеткие правила продукции для оценки состояния трансформатора на основе ХАРГ

№	Нечеткие правила продукции
1	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is NF)
Электрический дефект	
2	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is LEPD)
3	if (gr1 is f2) and (gr2 is f1) and (gr3 is f1) then (output1 is HEPD)
4	if (gr1 is f3) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is LED)
5	if (gr1 is f2) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is HED)
Термический дефект	
6	if (gr1 is f1) and (gr2 is f1) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₁)
7	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f1) then (output1 is T ₂)
8	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f2) then (output1 is T ₃)
9	if (gr1 is f1) and (gr2 is f2) and (gr3 is f3) then (output1 is T ₀)

Таблица 18 – Возможные виды дефектов на основе ХАРГ

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентраций характерных газов			Обозначение функции
	X	Y	Z	
Нормальное состояние (NF)	<0.1	0.1-1	≤ 1	f_1
Электрический дефект				
Частичные разряды с низкой плотностью энергии (LEPD)	<0.1	<0.1	≤ 1	f_2
Частичные разряды с высокой плотностью энергии (HEPD)	0.1-3	<0.1	≤ 1	f_3
Разряды малой мощности (LED)	>0.1	0.1-1	1-3	f_4
Разряды большой мощности (HED)	0.1-3	0.1-1	≥ 3	f_5
Термический дефект				
Термический дефект низкой температуры (<150°C) (T_1)	<0.1	0.1-1	1-3	f_6
Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°C) (T_2)	<0.1	≥ 1	<1	f_7
Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°C) (T_3)	<0.1	≥ 1	1-3	f_8
Термический дефект высокой температуры (>700°C) (T_0)	<0.1	≥ 1	≥ 3	f_9

Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния трансформаторов на основе данных ХАРГ представлена на Рис. 40. Основные характеристические параметры сети нейро-нечеткого логического вывода на основе данных ХАРГ и результаты расчетов приведены в Табл. 19.

Еще раз отметим, что использование такого критерия, как средняя ошибка обучения, уже проанализированного в третьей главе, в качестве основного критерия сравнения (оценивания) результатов расчетов модели с использованием различных видов функций принадлежности еще не гарантирует минимизацию ошибки на тестируемой выборке – ошибки тестирования. Ошибка тестирования характеризует способность модели к

обобщению, т. е. процедуру обучения [98]. Поэтому сопоставление результатов работы модели при использовании различных видов функций принадлежности выполнены на базе комплексной характеристики с учетом как ошибки обучения, так и ошибки тестирования

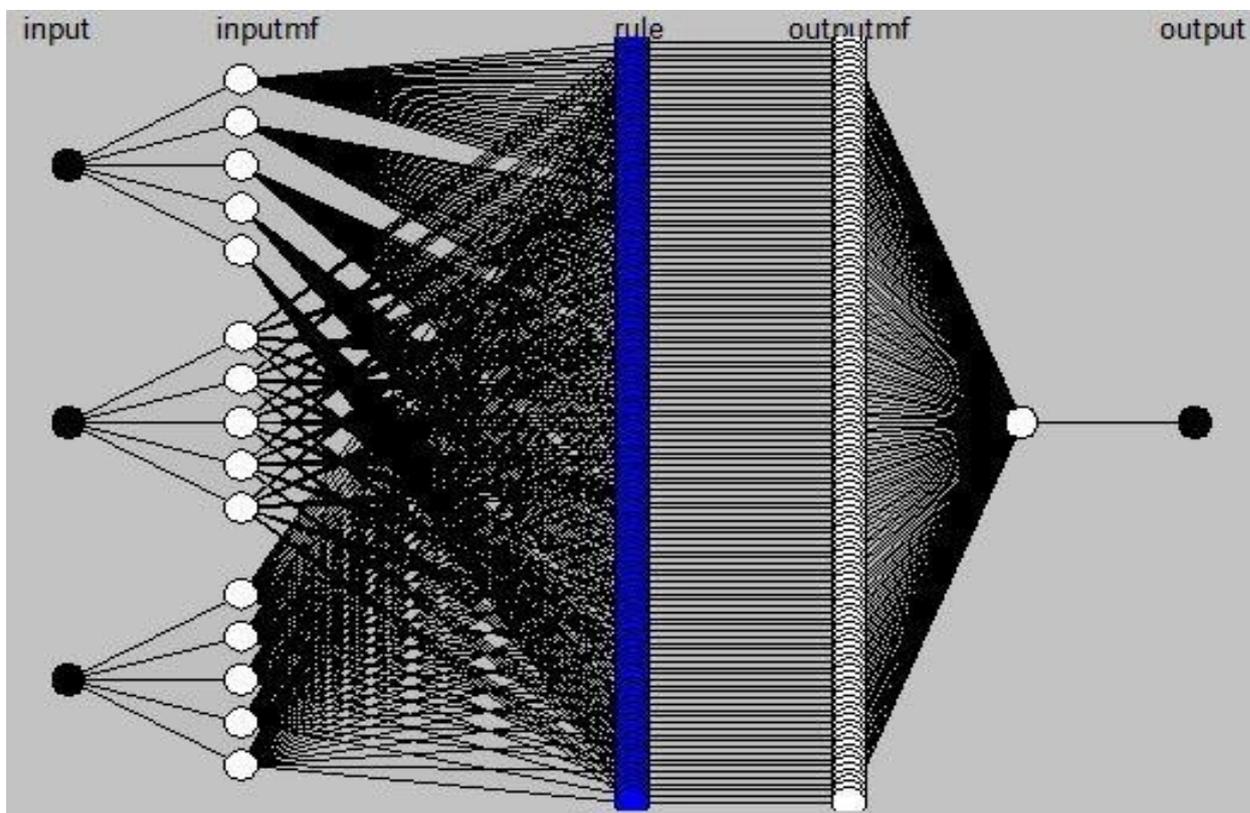


Рисунок 40 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния трансформатора на основе данных ХАРГ

Кроме того, необходимо оценить не просто размер ошибок обучения и тестирования, а выявить среди них ошибки первого рода – отказ от правильной гипотезы («ложный дефект») – и второго рода – принятие неправильной гипотезы («пропуск дефекта») [99]. Это связано с тем, что предельно допустимое значение параметра имеет рассеивание на граничных областях, и одни и те же значения могут соответствовать как одному, так и другому состоянию.

Ошибка первого рода приводит к дополнительным предупредительным работам, а ошибка второго рода влечет за собой затраты, включающие не только аварийный ремонт, но и износ оборудования и т.п.

Таблица 19 – Основные характеристические параметры сети для оценки состояния трансформатора на основе ХАРГ

ANFIS данные	Значения		
Электрический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколо-образная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число пар в тестируемой выборке	40	40	40
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,051	0,054	0,046
Средняя ошибка тестирования, %	6,8	7,5	4,9
Ошибки первого рода, шт.	2	2	2
Ошибки второго рода, шт.	1	1	0
Термический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколо-образная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число пар в тестируемой выборке	40	40	40
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,053	0,054	0,047
Средняя ошибка тестирования, %	7,0	7,9	5,2
Число ошибок первого рода	2	3	2
Число ошибок второго рода	1	1	0

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для оценки состояния трансформатора на основе ХАРГ определено, что оптимальной функцией, как видно из Табл. 19, является пи-подобная функция принадлежности. Что также подтверждается наименьшими ошибками обучения и тестирования: 0,046% и 4,9% для электрического дефекта и 0,047% и 5,2% для термического дефекта соответственно.

Анализ ошибок первого и второго рода на тестовой выборке из 40 пар (при анализе и электрического и термического дефектов) также подтвердил эффективность использования пи-подобных функций принадлежности, при этом из двух ошибочно определенных неисправностей в силовых трансформаторах обе ошибки относятся к ошибкам первого рода («ложный дефект»).

Проведенный анализ характеризует систему как достаточно достоверную и 5 % ошибок в определении состояния трансформаторов в данном случае можно считать хорошим результатом.

4.3 Оценка состояния магнитопровода трансформатора

Оценка состояния магнитопровода трансформатора на базе разработанной модели выполнена на основе измерений потерь холостого хода. Увеличение потерь холостого хода в трансформаторе, как и изменение газосодержания в масле, может свидетельствовать о неисправностях и, соответственно, характеризовать состояние магнитопровода трансформатора.

Опытные расчеты оценки состояния магнитопровода выполнялись для тех же силовых масляных трансформаторов 110 кВ, что и в предыдущем подразделе 4.1, на основе данных пофазных измерений потерь холостого хода для каждого из трех случаев – замкнутой накоротко обмотки каждой из фаз a, b, c соответственно.

Отличие исходных и измеренных при эксплуатации значений потерь холостого хода не должно превышать 30% [100], поэтому число функций

принадлежности (описывающих принадлежности к состояниям D_1 и D_2) для каждой из фаз равно двум (D_1 соответствует нормальному состоянию, а D_2 – неисправному, но работоспособному состоянию). В ходе выполнения диссертационной работы с помощью метода нечеткой кластеризации было определено два возможных вида функций принадлежности – прямоугольные и пи-подобные.

Основные характеристические параметры сети на основе данных потерь холостого хода и результаты расчетов приведены в Табл. 20.

Таблица 20 – Основные характеристические параметры сети для оценки состояния магнитопровода трансформатора

ANFIS данные	Значения	
	Прямоугольная	Пи-подобная
Тип функций принадлежности	Прямоугольная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	74	74
Число пар в тестируемой выборке	70	70
Средняя ошибка обучения, %	0,092	0,084
Средняя ошибка тестирования, %	5,2	4,7
Ошибки первого рода, шт.	2	2
Ошибки второго рода, шт.	2	1

Разработанная структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния магнитопровода трансформатора на основе данных потерь холостого хода представлена на Рис. 41.

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для оценки состояния магнитопровода трансформатора на основе данных потерь холостого хода было определено, что оптимальной функцией принадлежности для оценки состояния магнитопровода силовых трансформаторов по данным потерь холостого хода, как видно из Табл. 19, является пи-подобная функция принадлежности.

Выбор в пользу варианта использования пи-подобных функций принадлежности подтверждается наименьшими ошибками обучения (0,084%) и тестирования (4,7%).

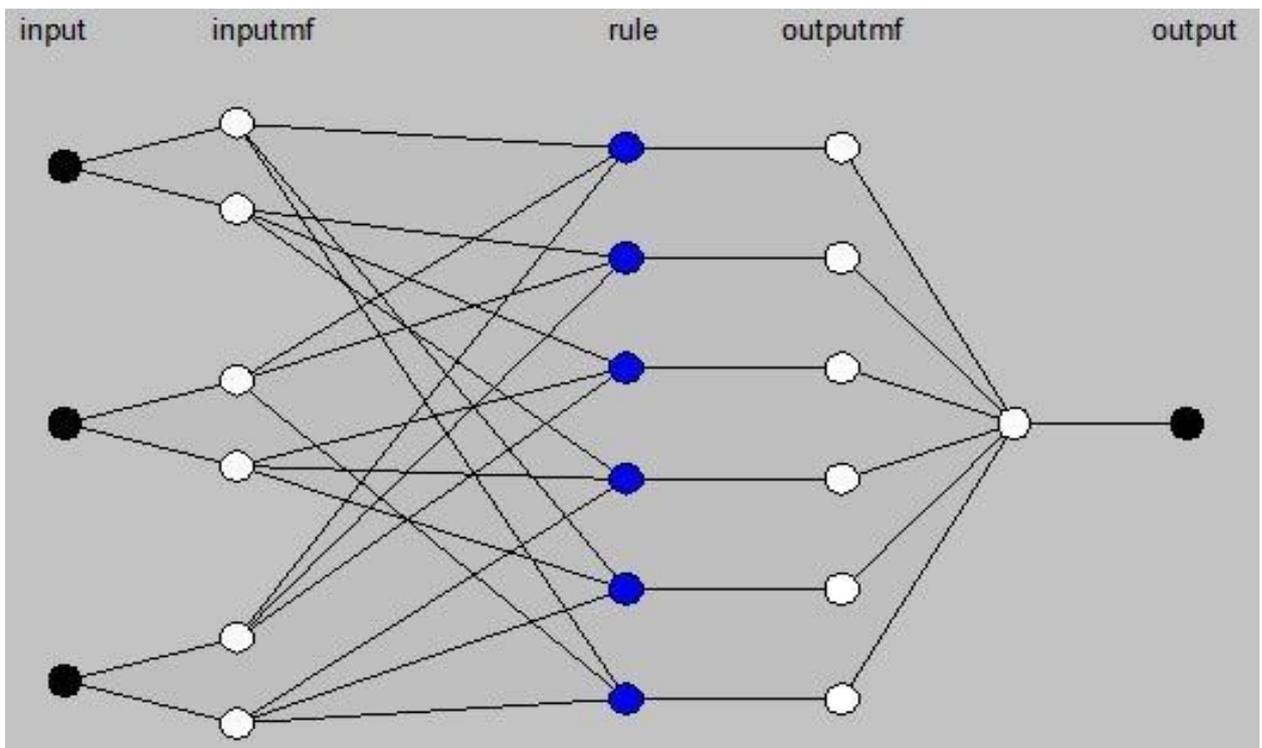


Рисунок 41 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния магнитопровода на основе данных потерь холостого хода

Анализ ошибок первого и второго рода на тестовой выборке из 70 пар также подтвердил эффективность использования пи-подобных функций принадлежности, при этом из трех ошибочно определенных неисправностей магнитопровода две ошибки относились к ошибкам первого рода («ложный дефект») и одна ошибка являлась ошибкой второго рода («пропуск дефекта»).

4.4 Оценка состояния твердой изоляции трансформатора

Одной из характеристик твердой изоляции силового трансформатора 110 кВ является сопротивление его изоляции. Поэтому в данной модели оценка состояния твердой изоляции силового трансформатора выполнялась по данным измерений одноминутного сопротивления изоляции трансформатора R_{60} (испытаний постоянным током). Согласно [100] наименьшее сопротивление изоляции обмоток трансформатора R_{60} , приведенное к 20°C, при схемах измерения ВН-СН+НН+К, СН-НН+ВН+К и НН-ВН+СН+К не должно уменьшаться по сравнению с предыдущим измерением более чем в два раза.

Исходя из сказанного, число функций принадлежности (описывающих принадлежности к состояниям D_1 и D_2) для каждого сопротивления изоляции равно двум (D_1 соответствует нормальному состоянию, а D_2 – неисправному, но работоспособному состоянию). В ходе выполнения диссертационной работы с помощью метода нечеткой кластеризации было определено два возможных вида функций принадлежности – прямоугольные и пи-подобные.

Разработанная структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния твердой изоляции трансформатора на основе данных измерений сопротивления изоляции обмоток трансформатора R_{60} представлена на Рис. 42.

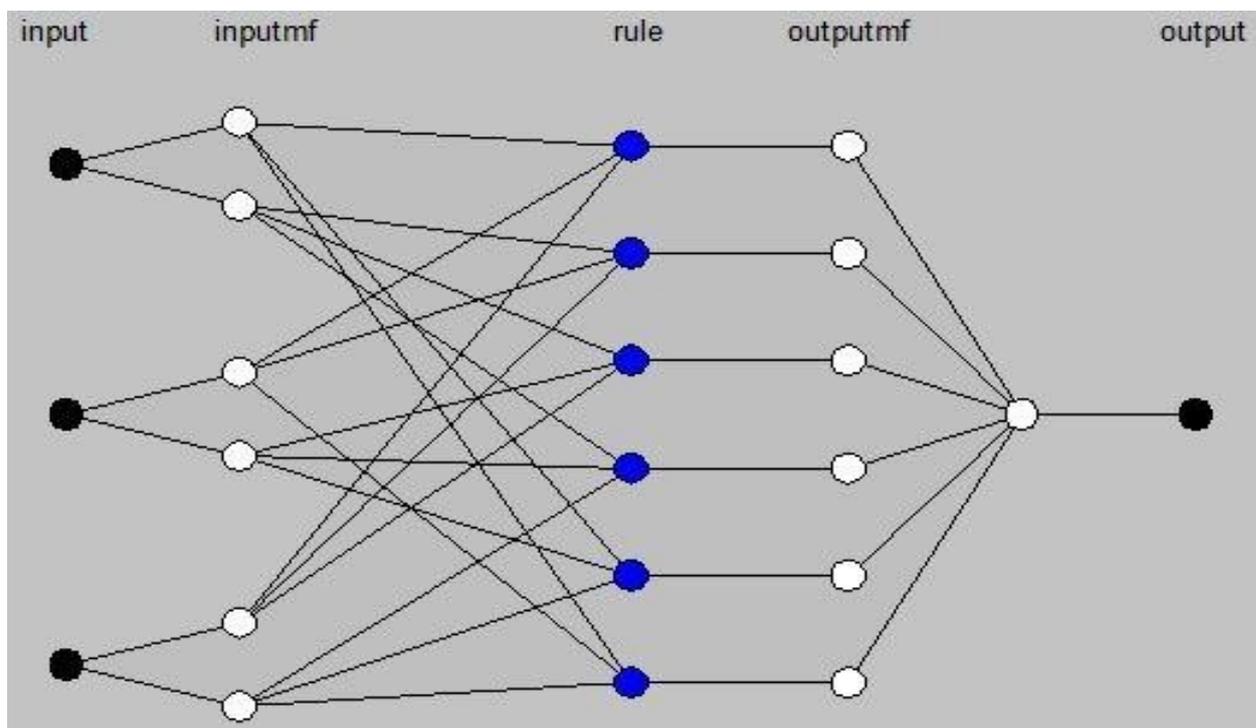


Рисунок 42 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния твердой изоляции на основе данных измерений сопротивления изоляции R_{60}

Основные характеристические параметры сети на основе данных измерений сопротивления изоляции обмоток трансформатора R_{60} и результаты расчетов приведены в Табл. 21.

Таблица 21 – Основные характеристические параметры сети для твердой изоляции трансформатора

ANFIS данные	Значения	
	Прямоугольная	Пи-подобная
Тип функций принадлежности	Прямоугольная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	74	74
Число пар в тестируемой выборке	70	70
Средняя ошибка обучения, %	0,054	0,050
Средняя ошибка тестирования, %	4,0	3,5
Ошибки первого рода, шт.	2	3
Ошибки второго рода, шт.	1	0

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для оценки состояния твердой изоляции трансформатора на основе данных измерений сопротивления изоляции R_{60} было определено, что оптимальной функцией принадлежности, как видно из Табл. 21, является пи-подобная функция принадлежности. Выбор в пользу варианта использования пи-подобных функций принадлежности подтверждается наименьшими ошибками обучения (0,050%) и тестирования (3,5%).

Анализ ошибок первого и второго рода на тестовой выборке из 70 пар также подтвердил эффективность использования пи-подобных функций принадлежности, при этом из трех ошибочно определенных неисправностей твердой изоляции все ошибки относились к ошибкам первого рода («ложный дефект»).

4.5 Оценка состояния обмоток трансформатора

Общее состояние его обмоток, можно определить по данным омических сопротивлений постоянному току обмоток. Сопротивления отдельных фаз не должны различаться более чем на 2%.

С помощью метода нечеткой кластеризации было определено два возможных вида функций принадлежности – прямоугольные и пи-подобные. Результаты расчетов для каждого из вариантов представлены в Табл. 22. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода

представлена на Рис. 43.

Таблица 22 – Основные характеристические параметры сети для ОТС обмоток трансформатора по данным омических сопротивлений

ANFIS данные	Значения	
	Прямоугольная	Пи-подобная
Тип функций принадлежности	Прямоугольная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	74	74
Число пар в тестируемой выборке	70	70
Средняя ошибка обучения, %	0,096	0,089
Средняя ошибка тестирования, %	4,1	3,8
Ошибки первого рода, шт.	1	2
Ошибки второго рода, шт.	2	1

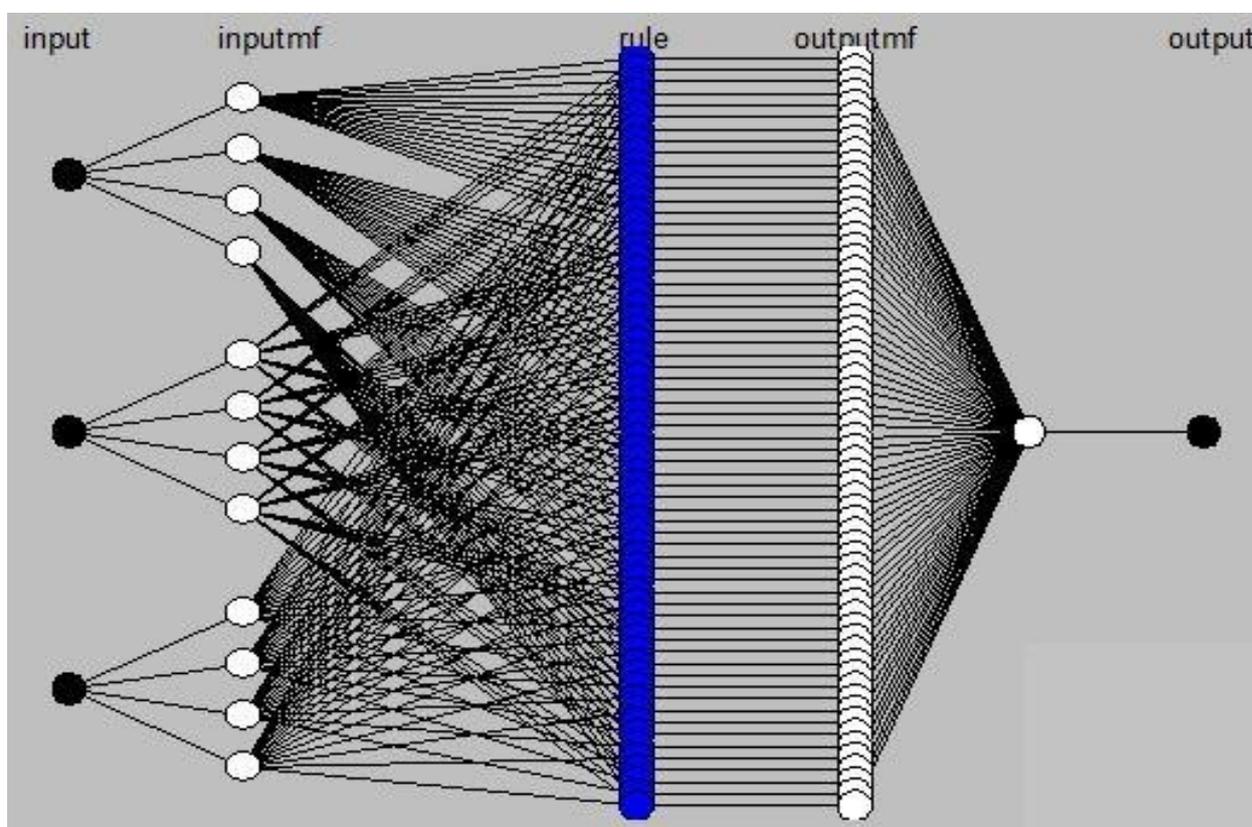


Рисунок 43 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния обмоток трансформатора на основе данных омических сопротивлений

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для оценки состояния обмоток трансформатора на основе

данных омических сопротивлений, как видно из Табл. 22, было определено, что оптимальной, также как и во всех предыдущих случаях, является пи-подобная функция принадлежности. Данное заключение подтверждается наименьшими ошибками обучения (0,089%) и тестирования (4,1%).

Анализ ошибок первого и второго рода на тестовой выборке из 70 пар также подтвердил эффективность использования пи-подобных функций принадлежности, при этом из трех ошибочно определенных неисправностей обмоток две ошибки относились к ошибкам первого рода («ложный дефект») и одна ошибка являлась ошибкой второго рода («пропуск дефекта»).

Многочисленные исследования технического состояния силового оборудования и в частности силовых трансформаторов свидетельствуют о наличии прямой корреляции между сроком службы и ростом аварийности в результате возрастающего износа. При продолжительной эксплуатации электросетевых объектов оборудование подвергается длительному воздействию токовых нагрузок, оказывающих разрушающее термическое и электродинамическое действие на контакты, изоляцию и элементы конструкции, высокого напряжения, а также влиянию окружающей среды. Капитальный ремонт оборудования придает ему новые эксплуатационные свойства, повышает эксплуатационный ресурс и/или замедляет процесс старения.

Состояние трансформатора, в том числе общее состояние его обмоток, можно определить по данным о годе его ввода в эксплуатацию (сроке эксплуатации) и дате капитального ремонта, в ходе которого, например, была выполнена замена обмоток трансформатора. Данные показатели введены в модель оценки технического состояния электрооборудования в качестве косвенного обобщенного дополнительного критерия работоспособности (эксплуатационного ресурса) ввиду отсутствия прямых показателей оценки работоспособности.

С помощью метода нечеткой кластеризации для показателя эксплуатационного ресурса были определены два возможных вида функций

принадлежности – прямоугольные и пи-подобные. Основные характеристические параметры сети на основе данных об эксплуатационном ресурсе трансформатора и результаты расчетов приведены в Табл. 23.

Таблица 23 – Основные характеристические параметры сети для обмоток на основе данных об эксплуатационном ресурсе

ANFIS данные	Значения	
	Прямоугольная	Пи-подобная
Тип функций принадлежности	Прямоугольная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	74	74
Число пар в тестируемой выборке	70	70
Средняя ошибка обучения, %	0,098	0,093
Средняя ошибка тестирования, %	7,3	6,1
Ошибки первого рода, шт.	3	3
Ошибки второго рода, шт.	2	1

Разработанная структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния обмоток трансформатора на основе показателя эксплуатационного ресурса представлена на Рис. 44.

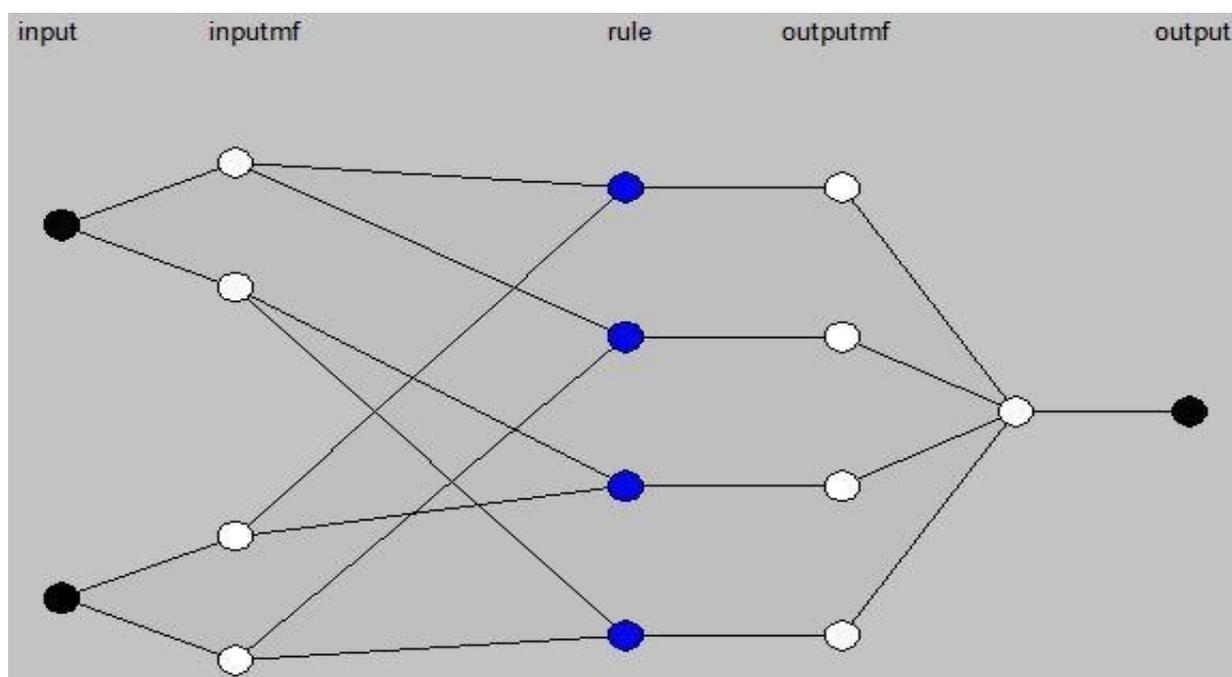


Рисунок 44 – Структура нейро-нечеткого логического вывода для оценки состояния обмоток трансформатора на основе данных об эксплуатационном ресурсе

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для оценки состояния обмоток трансформатора на основе данных о годе выпуска и годе капитального ремонта (эксплуатационного ресурса), как видно из Табл. 22, было определено, что оптимальной, также как и во всех предыдущих случаях, является пи-подобная функция принадлежности. Данное заключение подтверждается наименьшими ошибками обучения (0,093%) и тестирования (6,1%).

Анализ ошибок первого и второго рода на тестовой выборке из 70 пар также подтвердил эффективность использования пи-подобных функций принадлежности, при этом из четырех ошибочно определенных неисправностей обмоток три ошибки относились к ошибкам первого рода («ложный дефект») и одна ошибка являлась ошибкой второго рода («пропуск дефекта»).

Из приведенного выше анализа для оценки каждого из четырех элементов силовых трансформаторов самыми оптимальными функциями принадлежности по критериям средней ошибки обучения и средней ошибки тестирования оказались пи-подобные функции принадлежности. Но стоит заметить, что разработанная система предполагает анализ состояния и других элементов трансформатора, и других типов трансформаторов различных классов напряжения, а также другого вида подстанционного оборудования и совершенно неочевидно, что для каждого из элементов различных подбъектов пи-подобные функции принадлежности будут оптимальными.

Для определения оптимальных структур нейро-нечеткого логического вывода необходимо выполнять анализ вида и числа функций принадлежности для решения каждой конкретной задачи оценки состояния элементов.

Настройка и тестирование разработанной модели были выполнены на различных выборках для 74 трансформаторов. Приведенная в данном разделе настройка модели оценки технического состояния оборудования на примере силовых трансформаторов выполнена с целью адаптации математической

модели к реальному объекту, при этом расхождения между расчетными значениями на основе представленной модели и фактическими (реальными) значениями были минимальными.

Тестирование разработанной модели предполагает проверку гипотезы о структуре и виде разработанной модели, а также анализ способности разработанной системы к обобщению данных.

4.6 Оценка состояния силового масляного трансформатора

В данном подразделе на основе разработанной модели оценки технического состояния нейро-нечеткого логического вывода предлагается более подробно рассмотреть работу системы на конкретном примере.

Расчетный пример был выполнен для оценки технического состояния силового масляного трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ по срезу времени за апрель-май месяцы 2011 г. Анализ технического состояния трансформатора был выполнен на основе всей доступной информации по данному подобъекту, представленной в Табл. 24.

Оценка технического состояния трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ выполнялась на основе оценки состояния его элементов:

- трансформаторного масла (в баке трансформатора) – по данным хроматографического анализа растворенных в масле газов;
- магнитопровода – по данным измерений холостого хода;
- твердой изоляции – по данным измерений сопротивления изоляции обмоток;
- общего состояния обмоток – по данным омических сопротивлений обмоток, а также по году выпуска трансформатора и году проведения его капитального ремонта (данные об эксплуатационном ресурсе).

На основе данных, представленных в Табл. 24, с помощью системы нейро-нечеткого логического вывода формировались частные оценки по

каждому из элементов подобъекта, характеризующие состояние элемента в рассматриваемый промежуток времени.

Таблица 24 – Исходные данные для оценки технического состояния силового трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ

Хроматографический анализ газов							
Газ	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	Дата	
% об	0,000304	0,000395	0,00167	0,0000548	0,00391	12.04.11	
% об	0,000376	0,00044	0,00183	0,0000574	0,00454	27.04.11	
% об	0,000546	0,000501	0,00193	0,0000566	0,00498	03.05.11	
Потери холостого хода							
Фаза	При вводе в эксплуатацию			Последнее измерение			Дата
	АВ	ВС	СА	АВ	ВС	СА	
ΔP_{xx} , Вт	9,2	9,3	11,4	10,5	11,0	15,5	27.04.11
Сопротивление изоляции							
Схема	При вводе в эксплуатацию			Последнее измерение			Дата
	ВН- СН+НН +К	СН- НН+ВН +К	НН- ВН+С Н+К	ВН- СН+НН +К	СН- НН+ВН +К	НН- ВН+С Н+К	
R_{60} , Ом	3000	2500	3000	4600	4100	3900	27.04.11
R_{60} , Ом	3000	2500	3000	2400	2100	3300	03.05.11
Год. изгот.	1993						
Кап. ремонт	2008						

После этого с помощью шкалы относительной важности Саати формировались обобщенные оценки технического состояния по каждому из элементов подобъекта за все анализируемые промежутки времени. Шкала Саати $\{0; 1; 3; 5; 7\}$ использовалась для учета интенсивности проявления тех или иных свойств объектов электрической сети. Балл 0 соответствует отсутствию какой-либо значимости характеристики объекта исследования, 1 – очень слабой значимости, 3 – слабой значимости, 5 – более или менее существенной значимости, 7 – сильной значимости оценки [101].

После определения обобщенной оценки по каждому из элементов

подобъекта формировалась средневзвешенная оценка – оценка состояния.

Вычисление средневзвешенной нормализованной оценки для каждого подобъекта выполняется по следующему выражению:

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_l X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_l} \quad (33)$$

где X_{kjl}^H – нормализованная оценка показателя l относительно элемента j подобъекта k , полученная в результате работы гибридной сети, L – общее количество показателей работоспособности элемента, b_l – балльная оценка по шкале относительной важности Саати характеристического показателя l относительно элемента j .

Следует отметить, что любая итоговая оценка состояния подобъекта соответствует определенным ранжированным альтернативам решений по его дальнейшей эксплуатации.

Результаты расчетов, полученные на основе разработанной системы оценки технического состояния электрооборудования на примере силового масляного трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ, представлены в Табл. 25.

Таблица 25 – Результаты оценки технического состояния силового трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ

№	Элемент трансформатора	Данные	Оценка состояния	Балл
1	Хар-ка трансформаторного масла как хар-ка общего состояния трансформатора	ХАРГ (электр. дефект)	0,83	5
		ХАРГ (терм. дефект)	0	1
2	Магнитопровод	Потери холостого хода	0	1
3	Твердая изоляция	Сопротивление изоляции	0,79	5
4	Общее состояние обмоток	Омическое сопротивление	0,3	3
		Год выпуска и год кап. ремонта	0	1
Оценка состояния трансформатора:			0,628	
Количественная характеристика решения:			0,706	

В результате обработки информации, полученной при использовании системы оценки, состояние масляного силового трансформатора ТДТН-110/35/10 можно характеризовать следующим образом: как неисправное, но работоспособное состояние D_2 с вероятностью 74,4%; как предельное состояние D_3 – с вероятностью 26,6% (Рис. 45).

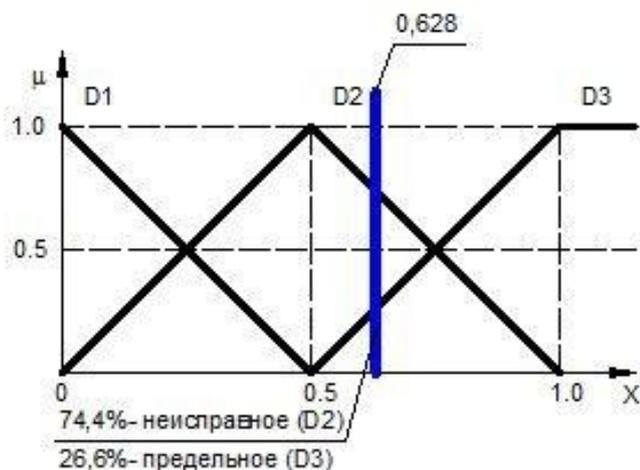


Рисунок 45 - Оценка состояния силового трансформатора ТДТН-110/35/10

По результатам полученной оценки технического состояния силового масляного трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ могут быть приняты следующие решения (Рис. 46):

- а. выполнить ремонт (вероятность принятия данного решения составляет 88,3%);
- б. вывести из эксплуатации (вероятность принятия данного решения составляет 11,7%).

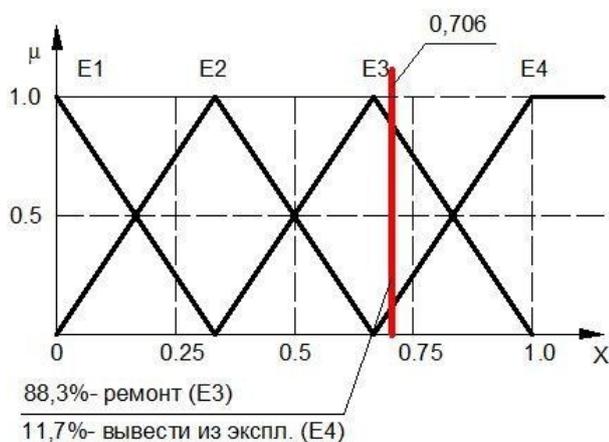


Рисунок 46 - Решения на основе оценки силового трансформатора ТДТН-110/35/10

Несмотря на преобладание вероятности принятия решения о ремонте анализируемого трансформатора, конечное решение о переводе оборудования в требуемое состояние остается за персоналом (человеком).

Для проверки результата оценки состояния трансформатора ТДТН-110/35/10, выполненного с помощью разработанной системы, был проведен анализ данного подбъекта настройка специалистами службы организации диагностики маслонеполненного оборудования Филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирская СПБ (Приложение В), по заключению которой также был зафиксирован дефект электрического характера и даны рекомендации о выводе трансформатора в ремонт, что подтверждает корректность разработанной модели оценки технического состояния масляного трансформатора 110 кВ на основе нейро-нечеткого логического вывода и ее настройки.

Разработанная система является «советчиком» и выполняет агрегирование доступной информации об объекте исследования, а также позволяет формализовать экспертные знания для определения технического состояния оборудования с учетом эксплуатационного опыта.

4.7 Выводы

В рамках апробации разработанной модели выполнена оценка технического состояния такого объекта электрической сети как силовой трансформатор. Тестирование разработанной модели предполагает проверку гипотезы о структуре и виде разработанной модели, а также анализ способности разработанной системы к обобщению данных. С данной целью сформирована база знаний, основанная на принципах диагностики силового маслонеполненного оборудования, эксплуатационном опыте, и допустимых границах технических показателей, и база данных - для настройки и тестирования разработанной модели, включающая различные выборки технических показателей для 70 однотипных силовых трансформаторов.

Для каждого элемента силового трансформатора – обмоток, магнитопровода, масляной и твердой изоляции, которые в совокупности

образуют комплексный объект электрической сети, определена оптимальная структура нейро-нечеткого логического вывода, заключающаяся в определении типа функций принадлежности и их числа.

Результатом работы системы оценки состояния определена качественная, характеризующая принадлежность к какому-либо состоянию работоспособности с рекомендацией по его дальнейшей эксплуатации, и количественная, представляющая собой рейтинг состояния на интервале $[0;1]$ характеристики каждого элемента силового трансформатора.

Обобщенная оценка технического состояния определяется с использованием средневзвешенной балльной оценки. Итоговый результат свидетельствует о наличии дефекта электрического характера, определяющего состояние как неисправное с рекомендацией по выводу оборудования в ремонт.

Корректность разработанного подхода на основе нейро-нечеткого логического вывода подтверждается адекватностью результата в сравнении с аналогичным системным подходом оценки технического состояния: анализ технического состояния тестового силового трансформатора, выполненный специалистами службы организации диагностики маслонаполненного оборудования Филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирская СПБ, показал аналогичный дефект электрического характера с рекомендацией о выводе оборудования из эксплуатации в ремонт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы:

1. Получено и обосновано решение задачи комплексной ОТС электрической подстанции на основе нейро-нечеткого логического вывода.

2. Разработаны структурная и математическая модели ОТС и определена база знаний для поиска возможных неисправностей (дефектов) электросетевого оборудования с целью выбора решений для обеспечения требуемого технического состояния электроэнергетической системы.

3. Определены способы решения задачи совершенствования системы ОТС электросетевого оборудования на основе диагностической информации в соответствии с действующими требованиями и с учетом формализованных знаний и опыта экспертов.

4. Выполнена апробация разработанной модели на базе программного комплекса Matlab на примере ОТС силовых трансформаторов 110 кВ, показавшая достаточную для практической реализации точность оценки, что подтверждает адекватность представленного решения.

5. Для задачи ОТС сложных объектов выполнена адаптация принципа декомпозиции, обеспечивающая возможность определения как индивидуальных характеристик работоспособности каждого объекта, так и, при последующей их агрегации, – учета эмерджентных свойств системы.

В основе обобщенной ОТС объекта электрической сети, такого как подстанция, положено комплексное исследование, которое подразумевает одновременное и согласованное изучение показателей по каждому из совокупности подобъектов и их элементов, являющихся составными элементами подстанции. Каждый показатель характеризует тот или иной физический процесс, оказывающий влияние на состояние подобъекта (элемента) или совокупности подобъектов сети в процессе ее функционирования.

Установлено, что разработанный подход к ОТС может быть распространен и на другие виды электрооборудования при изменении

входных параметров и функций принадлежности в соответствии с техническими, эксплуатационными и технологическими принципами работы этого оборудования.

Разработанная модель ОТС электросетевого оборудования подстанций 35-220 кВ может быть использована для создания интеллектуальной системы управления производственными активами электроэнергетических предприятий по техническому состоянию.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АИИС КУЭ	– автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии;
ВН	– высшее напряжение;
ЕНЭС	– Единая национальная электрическая сеть;
ИНС	– искусственная нейронная сеть;
К	– корпус трансформатора;
НН	– низшее напряжение;
ОАО	– открытое акционерное общество;
ООО	– общество с ограниченной ответственностью;
ПИН	– потенциометрическое устройство для измерения напряжения;
ППР	– планово-предупредительный ремонт;
ПС	– электрическая подстанция;
РЗиА	– релейная защита и автоматика;
РПН	– регулирование под нагрузкой;
РЭС	– район электрических сетей;
СН	– среднее напряжение;
УВН	– ультравысокое напряжение;
ХАРГ	– хроматографический анализ растворенных в масле газов;
ЭС	– электрическая станция;
ANFIS	– адаптивная система нейро-нечеткого логического вывода(adaptive neuro fuzzy inference system);
НED	– разряды большой мощности;
HEPD	– частичные разряды с высокой плотностью энергии;
LED	– разряды малой мощности;
LEPD	– частичные разряды с низкой плотностью энергии;
NF	– нормальное состояние;
OLAP	– технология для оперативной аналитической обработки данных (on-line analytic processing);

- R_{60} – одноминутное сопротивление изоляции трансформатора;
- T_0 – термический дефект высокой температуры;
- T_1 – термический дефект низкой температуры;
- T_2 – термический дефект в диапазоне низких температур;
- T_3 – термический дефект в диапазоне средних температур.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Агрегирование – это определение степени истинности условий для каждого правила в системе нейро-нечеткого вывода – минимизация значений всех подусловий.

Аккумуляция – это определение функции принадлежности для каждой из переменных. Аккумуляция выполняется с целью объединения всех степеней истинности подзаклучений для определения функции принадлежности каждой из выходных переменных.

Дефаззификация – переход от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к её четкому (числовому) значению.

Система нечеткого логического вывода – это процесс получения нечетких заключений об объекте на основе данных о его текущем состоянии, в виде нечетких условий или предпосылок.

Фаззификация – преобразование входных данных в нечеткие переменные с помощью функций принадлежности для определения соответствия входных данных термам лингвистических переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер - М.: Машиностроение, 1978.– 240 с.
2. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. - М.: Машиностроение, 2003. – 657 с.
3. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. - М.: Энергоатомиздат, 1992.– 240 с.
4. Концепция диагностики электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи электрических сетей ОАО "ФСК ЕЭС". М., 2004.- 188 с.
5. Объем и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300– 97: утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 08.05.97. – М. : ЭНАС, 2004. – 153 с.
6. Екатеринбургская электросетевая компания. Годовой отчет ОАО «ЕЭСК» за 2012 год [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://www.eesk.ru/actioners/Otchetnie_dokumenty/Ezhegodnaja_otchetnost. – Загл. с экрана (дата обращения 05.02.2015).
7. МРСК Урала. Годовой отчет 2012 [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://report2012.mrsk-ural.ru/reports/mrskural/annual/2012/gb/Russian/9030.html>. – Загл. с экрана (дата обращения 05.01.2015).
8. Россети. Годовой отчет 2009 год [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://www.rosseti.ru/investors/info/year/>. – Загл. с экрана (дата обращения 05.01.2015).
9. Галкин В. С. Вопросы проектирования автоматизированных систем мониторинга электрооборудования на подстанциях 500–220 кВ с учетом обеспечения надежности электрических сетей / В. С. Галкин, Т. М. Лангборт, В. А. Липаткин, В. А. Смирнов // Электрические станции. – 2006. – № 7. – С. 66–67.

10. Спарлинг Б. Д.. Повышение уровня мониторинга и диагностики для оптимизации передачи и распределения электроэнергии в целях улучшения финансовых показателей / Б. Д. Спарлинг // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования / под ред. А. И. Таджибаева, В. Н. Осотова. – СПб., 2005. – Вып. 28. – С. 178–202.

11. Давиденко И. В. Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / И. В. Давиденко, В. П. Голубев, В. И. Комаров, В. Н. Осотов // Электрические станции: ежемесячный производственно-технический журнал. - 1997. - N 6. - С. 25-27.

12. Димрус [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://dimrus.ru/texts.html>. – Загл. с экрана (дата обращения 05.01.2015).

13. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов: ГОСТ 18353 - 79: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 11.11.79. – М., 1979. – 18 с.

14. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения: ГОСТ 24450 - 80: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 28.11.80. – М., 1980. – 6 с.

15. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения: ГОСТ 25315 - 82: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 18.06.82. – М., 1982. – 7 с.

16. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения: ГОСТ 24289 - 80: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 30.06.80. – М., 1982. – 10 с.

17. Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения: ГОСТ 25313 - 82: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 18.06.80. – М., 1982. – 8 с.

18. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования: ГОСТ 23483 - 79: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 08.02.79. – М., 1979. – 14 с.

19. Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения: ГОСТ 24521 - 80: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 23.02.82. – М., 1982. – 4 с.

20. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения: ГОСТ 24034 - 80: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 12.03.80. – М., 1980. – 12 с.

21. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения: ГОСТ 20415 - 82: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 30.12.80. – М., 1980. – 6 с.

22. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования: ГОСТ 18442 - 80: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 15.05.80. – М., 1980. – 16 с.

23. Khalyasmaa A. I. Electrical equipment life cycle monitoring / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev, D. A. Glushkov, D. A. Baltin, N. A. Babushkina // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1008-1009 – P. 536–539.

24. Бром А. Е. Базовая модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования / А. Е. Бром, О. В. Белова, А. Сиссиньо // *Гуманитарный вестник*. – 2013. – Вып. 10. – С. 1–11.

25. Давиденко И. В. Системы диагностирования высоковольтного маслонаполненного силового электрооборудования. / В. Н. Осотов, И. В. Давиденко // *Учебное пособие для студентов и специалистов*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 117 с.

26. Хальясмаа А. И. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова // *Вопросы современной науки и практики*. – 2013. – №1(45). – С. 289–300.

27. Осотов В. Н. Некоторые аспекты оптимизации системы диагностики силового электрооборудования на примере Свердловэнерго: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Осотов Вадим Никифирович. – Екатеринбург, 2000. – 31 с.

28. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года. ОАО РАО «ЕЭС России». [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступ: http://www.rao-ees.ru/ru/invest_inov/concept_2030.pdf. – Загл. с экрана (дата обращения: 05.02.2015).

29. Asset management systems. Разработка методических указаний по оценке технического состояния оборудования «Холдинг МРСК» [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://amstm.ru/projects/holding_mrsk/. – Загл. с экрана (дата обращения 01.03.2015).

30. Попов Г. В. Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатъев, Л. В. Виноградова, Ю. Ю. Рогожников, Д. А. Ворошина // Электрические станции. – 2011. – № 5. – С. 36–45.

31. Давиденко И. В. Структура экспертно-диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / И. В. Давиденко, В. П. Голубев, В. И. Комаров, В. Н. Осотов // Электрические станции. – 1997. – №6. – С. 25–27.

32. Давиденко И. В. Система компьютерной диагностики маслонаполненного оборудования в рамках энергосистемы / И. В. Давиденко, В. П. Голубев, В. И. Комаров, В. Н. Осотов, С. В. Туркевич // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 52–56.

33. Хальясмаа А. И. Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – Том 13. – №2. – С. 114–12.

34. Шутенко О. В. Анализ функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования [Электронный ресурс] / О. В. Шутенко, Д. В. Баклай, // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – С. 179–193.

35. Кокин С. Е. Энерго-информационные модели функционирования и развития систем электроснабжения больших городов: дис. д-р. техн. наук: 05.14.02 / Кокин Сергей Евгеньевич. – Екатеринбург, 2013. – 367 с.

36. Дмитриев С. А. Мониторинг системы электроснабжения мегаполиса на основе объектно-ориентированной графовой модели: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Дмитриев Степан Александрович. – Екатеринбург, 2007. – 174 с.

37. Мошинский О. Б. Разработка модели оценки функционального состояния системы электроснабжения мегаполисов: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Мошинский Олег Борисович. – Екатеринбург, 2011. – 199 с.

38. Соколов В. В. Ранжирование состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию / В. В. Соколов // Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования: материалы совместного заседания совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при УРЦОТ и секции «Техническое обслуживание, мониторинг и диагностика электрооборудования» Четвертой Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск: НГТУ. - 2006.

39. Хальясмаа А. И. Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Сборник трудов V международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2014». – 2014. –С. 187–193.

40. Jang J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System / J.-S. R. Jang // IEEE Trans. Systems & Cybernetics. - 1993. - N 23. - С. 665 - 685.

41. Ларичев О. И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / О. И. Ларичев, А. В. Петровский // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. – 1987. – Т.21. – С. 131–164.

42. Нейронные сети в Matlab. Предварительная обработка данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://neural-networks.ru/Predvaritelnaya-obrabotka-dannyh-59.html>. – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

43. Левин В. М. Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей: учебное пособие / В. М. Левин. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010. – 97 с.

44. Управление знаниями. Базы знаний [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/upravlenieznaniami/inzeneria-znaniy/bazy-znaniy.html> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

45. Портал искусственного интеллекта. Базы знаний [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/knowledge-models/knowledge-bases.html> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

46. Энергетика и электрификация. Термины и определения: ГОСТ 19431 – 84: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 27.03.84. – М., 1986. – 73 с.

47. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова и др. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 576 с.:

48. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные данные для курсового и дипломного проектирования: Учеб. Пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.

49. Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения: ГОСТ 24291 – 90: утв. Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам 27.12.90. – М., 1992. – 153 с.

50. Глушков В. М. Энциклопедия кибернетики: в 2 т. / В. М. Глушков, Н. М. Амосов, И. А. Артеменко. – Киев: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. 2 т. - 624 с.

51. Хальясмаа А. И. Вопросы реализации систем оценки фактического состояния электрооборудования для энергетических предприятий / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков // Научное обозрение. – 2013. – №4. – С. 241–245.

52. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ 53480 – 2009: утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09.12.2009 г. 15.11.89. – М.: Стандартиформ, 2010. – 33 с.

53. Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов: РД ЭО 0410 – 02: принят и введен в действие концерном «Росэнергоатом» 01.01.2004. – М. : Альвис, 2004. – 44 с.

54. Учебник по базам данных. Типы моделей данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://dssp.petrso.ru/~IVK/book/2/2_1_3.html – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

55. Технологии баз данных и знаний. Лекция на тему модели данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: http://dssp.petrso.ru/~IVK/book/2/2_1_3.html – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

56. Интуит: Национальный открытый университет. Работа с базами данных. Лекция №5: модели организации баз данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа <http://www.intuit.ru/studies/courses/3439/681/lecture/14023> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

57. Постреляционная, многомерная и объектно-ориентированная модели представления данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа http://www.e-reading.club/chapter.php/97791/123/Kozlova_-_Informatika_konspekt_lekciii.html – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

58. Cit forum. Объектно-ориентированные модели данных [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа http://citforum.ru/database/osbd/glava_112.shtml – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

59. Кафедра UNESCO по новым информационным технологиям. Гудов А. М. Базы данных и системы управления базами данных. Программирование на языке PL/SQL. Учебно-методическое пособие [электронный ресурс] офиц. сайт. – Режим доступа http://unesco.kemsu.ru/study_work/method/bd/umk/book/ – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

60. Криват Б. Microsoft SQL Server 2008: Data Mining - интеллектуальный анализ данных / Б. Криват, Д. Макленнен, Ч. Танг. - Спб.: BHV, 2009.– 720 с.

61. Ананьев Н. С. Методы и средства анализа данных в системах поддержки принятия решений: дис. ...канд. техн. наук: 05.25.05 / Ананьев Николай Сергеевич. – М., 2005. – 123 с.

62. Microsoft Developer Network. Ячейка куба (службы Analysis Services) [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms175449.aspx> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

63. Башмаков А. И. Интеллектуальные информационные технологии: учебное пособие / А. И. Башмаков, И. А. Башмаков – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. - 304 с.

64. Беркинблит М. Б. Нейронные сети / М. Б. Беркинблит - М.: МИРОС и ВЗМШ РАО, 1993. - 96 с.

65. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие. - 2-е изд. / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик - М: Физматлит, 2006. - С. 320.

66. База и генератор образовательных ресурсов МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кафедра САПР. Основы САПР [электронный ресурс]: офиц. сайт. –

Режим доступа http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=140_CADedu/CAD.cou – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

67. Экспертные системы. Искусственный интеллект и экспертные системы: учебное пособие [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа http://expro.ksu.ru/materials/ii_i_es/book.html – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

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

69. Рубанов В. Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах: учебное пособие [электронный ресурс] / В. Г. Рубанов, А. Г. Филатов, И. А. Рыбин. Режим доступа <http://nrsu.bstu.ru/> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

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

71. Наместников А. М. Разработка и исследование нечетких систем и генетических алгоритмов для решения задач автоматизированного проектирования: дис. канд. техн. наук: 05.13.02 / Наместников Алексей Михайлович. – Ульяновск, 2000. – 181 с.

72. Шумилова Г. П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур [электронный ресурс] / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева. Режим доступа http://energy.komisc.ru/downloads/docs/prognozirovanie_jelektricheskikh_nagruzok_pri_operativnom_upravlenii_jelektrojenergeticheskimii_sistemami_na_osnove_nejrosetevyh_struktur.pdf – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

73. Сухбаатырын М. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования нагрузки центральной электроэнергетической системы Монголии: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Сухбаатарын Мунхжаргал. – Новосибирск, 2004. – 177 с.

74. Хохлов М.В. Устойчивость динамической нейронной сети для оценивания состояния электроэнергетических систем // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы IV всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары. - 2002. - с. 166-169.

75. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: Учеб. для вузов / Ю. П. Зайченко – К.: «Издательский Дом «Слово», 2008. – 344 с

76. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с

77. Общероссийский математический портал Math-net.ru. А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба, Моделирование надежности человека-оператора с помощью нечеткой базы знаний Сугено, Автоматика и телемеханика, 2009, № 1. - С. 180–187.

78. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский – М.: Горячая Линия-Телеком, 20075. – 452 с

79. Hung T. Nguyen Fuzzy Modeling and Control: Selected Works of Sugeno / Hung T. Nguyen, Nadipuram R. Prasad – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 429 с

80. Fuzzy modeling Group. Лекция №8. Системы нечеткого вывода [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа http://fuzzy-group.narod.ru/files/Fuzzy_Modeling/Lecture08.1.Fuzzy.inference.system.pdf – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

81. СИИ. Курс лекций по дисциплине «Системы искусственного интеллекта». Лекция №9: Методы работы со знаниями [электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа <http://www.mari-el.ru/mmlab/home/AI/9/> – Загл. с экрана (дата обращения 10.01.2015).

82. Дэвид Г. А. Метод парных сравнений: пер. с англ. / Г. А. Дэвид - М.: Статистика, 1978.– 144 с.

83. Yager R. R. Essentials of Fuzzy Modeling and Control / R. R. Yager, D. P. Filev - USA: John Wiley & Sons, 1994. - 387 с.

84. Khalyasmaa A. I. Defining membership functions in power equipment state assesment problem / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev, S. E. Kokin, D. A. Glushkov // 5th International conference on power engineering, energy and electrical drives (POWERING). 11-13 May, 2015 Riga, Latvia. P. 115-119.

85. Babuska R. Fuzzy Modeling for Control / R. Babuska – Boston, Kluwer Academic Publishers. - 257 с.

86. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00: утв. Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 12.12.00. – М.: ВНИИ Электроэнергетики, 2000. – 41 с.

87. Кобзарь Л. В. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников - М.: Физматлит, 2006.– 814 с.

88. Головкин В. А. Нейронные сети: обучение, организация и применение /В. А. Головкин - Издательство: ИПРЖР, 2004.– 656 с.

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

90. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – Изд-во: Springer, 2009. - 745 с.

91. Елисеева И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев - М.: Финансы и статистика, 2002.– 256 с.

92. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф - Л.: Энергоатомиздат, 1991.– 304 с.

93. Розенблат Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга / Ф. Розенблат. - М.: Мир, 1965. – 478 с.

94. Anastassiou G. A. Intelligent systems. Approximation by artificial neural networks. - Изд-во: Springer, 2011. - 116 с.
95. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. - М.: Горячая Линия-Телеком,, 2014. – 496 с.
96. Давиденко И.В. Методика принятия решения для вывода общего заключения о состоянии силового трансформатора при многоаспектном анализе / И. В. Давиденко // Известия вузов: электромеханика. – 1998. - N 2-3. - С. 91-92.
97. Брай И. В. Регенерация трансформаторных масел / И. В. Брай, - М.: Химия, 1972.– 168 с.
98. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин, - М.: Вильямс, 2006.– 1104 с.
99. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения: ГОСТ Р 50779.10-2000: принят и введен в действие. Постановлением Госстандарта России от 29.12.00. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 42 с.
100. Правила устройства электроустановок. Утв.. Приказом Минэнерго России 08.07.02. – М.: Энас, 2013. – 556 с.
101. Саати Т. Принятие решений / Т. Саати - М.: Радио и связь, 1993.– 278 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А - Обучающая выборка

Таблица А1 – Обучающая выборка для оценки состояния силовых масляных трансформаторов 110 кВ

№	Хроматографический анализ газов			Потери ХХ при вводе в эксплуатацию			Потери ХХ измеренные			Сопротивление изоляции		Год изгот.
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	а	б	с	а	б	с	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послед.	
1	0,068	1,925	7,083	39,16	45,13	38,02	43,47	60,92	42,20	1100	7050	1983
2	0,717	0,191	5,823	10,13	13,82	11,28	12,26	16,72	13,65	10000	10000	1987
3	0,038	1,358	10,280	70,94	93,33	66,72	78,74	103,60	74,06	2820	2820	1970
4	0,172	2,057	10,000	66,18	89,17	54,55	80,08	107,90	70,91	10000	10000	1981
5	0,012	3,407	3,912	102,91	276,32	123,78	130,70	214,20	137,40	3620	3620	1966
6	0,020	0,200	2,500	6,40	9,20	6,30	6,44	9,22	6,37	2000	2000	1957
7	0,000	0,068	1,853	6,10	4,86	6,08	6,40	5,10	6,38	2625	2625	1981
8	0,485	0,149	1,478	5,14	4,95	7,38	5,50	5,30	7,90	4225	6500	1973
9	0,000	0,091	0,863	25,50	25,50	34,00	25,50	25,50	34,00	1692	2820	2008
10	0,075	0,084	0,930	9,60	13,40	10,00	9,60	13,40	10,00	4913	4913	2007
11	0,001	0,240	3,046	52,50	82,50	60,00	40,00	52,00	37,00	850	2800	1962
12	0,700	0,036	1,034	4,00	4,00	4,00	4,10	4,00	4,10	210	150	1964
13	1,000	0,021	0,741	11,70	11,70	11,70	11,70	11,80	11,70	15500	15000	1994
14	0,000	0,200	3,000	49,90	68,00	49,80	49,90	68,00	49,80	1000	1500	1968
15	3,000	0,030	0,667	3,40	3,40	4,20	4,60	4,60	6,70	45000	44250	1977
16	0,750	0,017	0,316	7,50	7,50	10,80	8,44	8,00	11,80	3500	8000	1976
17	1,000	0,116	1,000	5,16	7,60	5,36	6,20	9,50	6,50	800	750	1980
18	0,000	0,525	6,261	51,20	63,30	50,80	51,20	63,30	50,80	5000	10000	1976
19	0,094	2,800	3,118	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	60000	45000	2004

Продолжение таблицы А1

№	Хроматографический анализ газов			Потери ХХ при вводе в эксплуатацию			Потери ХХ измеренные			Сопротивление изоляции		Год изгот.
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послед.	
20	0,066	1,589	5,051	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	50000	30500	1985
21	0,084	0,128	2,418	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	47000	24000	1981
22	0,086	1,571	1,841	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	30000	33000	1980
23	0,102	0,963	2,885	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	40000	23800	1979
24	0,102	0,299	3,447	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	56000	25400	1966
25	0,061	0,385	3,014	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	38000	18000	1974
26	0,097	2,444	2,214	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	70000	68000	2008
27	0,100	0,500	1,000	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	1700	4500	1992
28	0,100	0,333	1,000	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	2500	2500	1992
29	0,010	0,500	1,667	6,17	6,09	8,99	7,96	8,04	11,59	3600	2000	1,3545
30	0,013	3,609	5,455	16,50	20,00	16,50	17,00	25,00	18,00	4800	10000	1983
31	0,161	0,200	3,100	4,60	4,60	5,95	4,60	4,60	5,95	8850	10000	2007
32	0,000	0,117	0,269	6,75	6,75	9,75	6,80	6,60	9,20	7500	10000	2004
33	0,000	3,784	2,143	31,80	31,80	40,00	29,00	30,00	39,00	9483	11610	2009
34	0,033	0,156	1,084	30,00	29,00	41,00	64,00	62,00	90,00	1400	2700	1968
35	0,500	0,400	1,000	13,00	19,00	13,00	15,50	21,50	15,50	1500	2500	1974
36	0,125	0,100	4,000	17,40	23,50	17,40	14,00	23,00	14,50	1300	12000	1976
37	0,500	0,200	1,000	16,92	26,69	18,05	22,50	35,50	24,00	660	13900	1971
38	0,884	0,433	8,636	4,50	6,50	4,50	4,50	6,50	4,50	3000	8580	1977
39	0,100	1,000	2,000	3,51	3,39	6,03	4,00	4,00	7,00	1950	3000	1987

Продолжение таблицы А1

№	Хроматографический анализ газов			Потери ХХ при вводе в эксплуатацию			Потери ХХ измеренные			Сопротивление изоляции		Год изгот.
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	а	б	с	а	б	с	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послед.	
40	0,030	2,000	8,250	54,33	70,08	54,33	69,00	89,00	69,00	3000	5800	1976
41	0,500	0,773	6,000	38,82	50,00	38,82	66,00	85,00	66,00	3000	2500	1976
42	0,037	1,083	13,500	7,21	10,61	7,21	9,30	14,00	9,30	3000	3500	1985
43	0,000	0,525	1,000	5,39	5,20	7,75	5,50	5,30	7,90	2000	3000	1983
44	0,000	1,000	4,632	10,00	15,00	10,63	16,00	24,00	17,00	984,2	984,2	1964
45	0,000	1,000	7,250	3,60	5,90	3,60	5,00	7,00	5,00	900	2250	1967
46	0,000	1,987	1,010	8,28	11,21	8,62	9,60	13,00	10,00	567	567	1964
47	0,012	1,100	4,689	3,60	5,90	3,60	5,00	7,00	5,00	32400	32400	1966
48	0,167	1,000	1,200	80,00	60,00	62,00	132,00	99,00	102,30	1046,5	1610	1960
49	0,313	0,623	2,667	21,00	30,00	20,00	23,50	33,00	23,70	1040	1600	1966
50	0,500	0,650	2,000	17,00	17,00	17,00	21,00	21,00	21,00	47000	36000	1965
51	0,556	0,210	11,250	16,00	16,00	16,00	20,00	20,00	20,00	46000	39000	1966
52	6,364	0,188	2,200	19,00	19,00	19,00	22,00	22,00	22,00	49000	34000	1963
53	0,000	2,429	3,722	32,00	44,00	32,00	36,00	50,00	36,00	6000	10000	1966
54	2,941	0,260	1,133	4,74	7,26	4,67	6,40	9,80	6,30	3900	6000	1970
55	3,030	0,200	2,357	2,99	3,94	2,99	4,10	5,40	4,10	6500	10000	1968
56	0,818	0,533	4,231	6,55	8,64	6,36	7,20	9,50	7,00	4000	5500	1973
57	1,062	0,611	4,629	1,00	1,18	1,05	1,10	1,10	1,10	7500	10000	1983
58	0,141	0,316	12,103	1,22	1,44	1,28	0,90	0,90	0,90	7000	10000	1982
59	1,594	0,811	4,085	0,98	0,96	0,96	1,17	1,20	1,20	7500	10000	1983

Продолжение таблицы А1

№	Хроматографический анализ газов			Потери ХХ при вводе в эксплуатацию			Потери ХХ измеренные			Сопротивление изоляции		Год изгот.
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	a	b	c	a	b	c	R ₆₀ пуск	R ₆₀ послед.	
60	0,431	0,815	1,656	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	6500	10000	1984
61	0,000	0,459	2,938	9,00	12,00	9,00	10,00	13,00	10,00	8000	1200	1971
62	3,196	0,766	10,240	6,00	8,00	6,00	7,00	10,00	7,00	700	600	1971
63	0,000	2,016	1,825	7,00	10,00	7,00	6,00	9,00	6,00	3000	4000	1987
64	0,081	0,924	2,879	4,00	4,00	3,00	5,30	5,30	6,80	1950	3000	1997
65	0,000	0,083	0,794	23,50	31,50	23,50	6,00	8,00	6,00	10000	70000	1971
66	0,000	1,000	0,833	0,25	0,36	0,26	0,12	0,17	0,10	3000	10200	1973
67	0,000	1,000	4,000	0,25	0,36	0,26	0,26	0,40	0,26	1350	1450	1971
68	0,000	0,333	0,167	0,18	0,23	0,19	0,18	0,25	0,20	1520	1600	1972
69	0,034	1,769	4,000	9,58	16,72	8,66	11,11	17,05	11,00	8000	1200	1967
70	0,486	0,412	3,111	6,00	7,50	6,00	6,00	8,00	5,50	5000	7000	1966
71	1,800	0,867	2,000	22,00	22,00	32,00	23,00	23,00	34,00	770	8700	1978
72	0,610	0,407	8,200	32,00	32,00	46,00	35,00	36,00	51,00	520	2500	1974
73	0,005	1,000	10,000	49,06	64,80	49,06	62,30	82,30	62,30	1200	1100	1966
74	1,000	0,900	1,000	7,60	11,50	7,60	16,60	23,60	16,80	8800	14000	2007

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

```
function potenVal = e_potenc(N, alpha)

kolPoints=length(N);
% Масштабирование параметров диагностики на интервал от 0 до 1
minN = min(N);
maxN = max(N);
N=(N-minN)./(maxN-minN);
N = min(max(N,0),1);

%Определение потенциала:
potenVal = zeros(1,kolPoints);
temp=ones(size(N));
k=-4*alpha.^2;
for i=1:kolPoints
    thePoint = N(i);
    otkl=(N-thePoint*temp).^2;
    potenVal(i)=sum(exp(k*otkl));
end

end

%Определение функций
%принадлежности по концентрации пар газов
%на базе потенциальной функции % горной кластеризации

g=S2(:,4)'

g1=ss1(:,3)'
g2=ss2(:,3)'
g3=ss3(:,3)'
g4=ss4(:,3)'
g5=ss5(:,3)'
g6=ss6(:,3)'
g7=ss7(:,3)'
g8=ss8(:,3)'
g9=ss9(:,3)'

g=sort(g);
N=length(g);

g1=sort(g1);
N1=length(g1);
```

```
g2=sort(g2);  
N2=length(g2);
```

```
g3=sort(g3);  
N3=length(g3);
```

```
g4=sort(g4);  
N4=length(g4);
```

```
g5=sort(g5);  
N5=length(g5);
```

```
g6=sort(g6);  
N6=length(g6);
```

```
g7=sort(g7);  
N7=length(g7);
```

```
g8=sort(g8);  
N8=length(g8);
```

```
g9=sort(g9);  
N9=length(g9);
```

%Определение потенциалов всех точек исходных параметров:

```
potenc1=e_potenc(g1, 2); %alpha=1;  
potenc2=e_potenc(g2, 2); %alpha=2;  
potenc3=e_potenc(g3, 2); %alpha=3;  
potenc4=e_potenc(g4, 2); %alpha=4;  
potenc5=e_potenc(g5, 2); %alpha=5;  
potenc6=e_potenc(g6, 2); %alpha=6;  
potenc7=e_potenc(g7, 2); %alpha=7;  
potenc8=e_potenc(g8, 2); %alpha=8;  
potenc9=e_potenc(g9, 2); %alpha=9;
```

% Преобразование потенциалов в степени принадлежности:

```
mu1= potenc1./max(potenc1);  
mu2= potenc2./max(potenc2);  
mu3= potenc3./max(potenc3);  
mu4= potenc4./max(potenc4);  
mu5= potenc5./max(potenc5);  
mu6= potenc6./max(potenc6);  
mu7= potenc7./max(potenc7);  
mu8= potenc8./max(potenc8);  
mu9= potenc9./max(potenc9);
```

```
%Вывод распределений данных диагностики
```

```
h(1:N)=0;
```

```
for i=2:N
```

```
    if g(i-1)==g(i);
```

```
        h(i)=h(i-1)+0.015;
```

```
    end
```

```
end
```

```
subplot(2,1,1)
```

```
plot(h, f, 'k.', 'markersize', 12)
```

```
hold on
```

```
plot(g1, mu1, '-m.')
```

```
plot(g2, mu2, '-k+')
```

```
plot(g3, mu3, '-r*')
```

```
plot(g4, mu4, '-go')
```

```
plot(g5, mu5, '-b.')
```

```
plot(g6, mu6, '-k+')
```

```
plot(g7, mu7, '-m*')
```

```
plot(g8, mu8, '-c.')
```

```
plot(g9, mu9, '-r+')
```

```
legend('input data', 'mu1', 'mu2', 'mu3', 'mu4', 'mu5', 'mu5', 'mu6', 'mu7', 'mu8',  
'mu9')
```

```
xlabel('relations of gases pairs, pu')
```

```
handle=ylabel('\mu');
```

```
set(handle, 'Rotation', 0);
```

```
ylim([-0.02, 1.05])
```

```
xlim(minmax(g))
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В



ЭЛЕКТРОСЕТЬ СЕРВИС
ЕДИНОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

НОВОСИБИРСКАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БАЗА
ФЛИАЛ ОАО "ЭЛЕКТРОСЕТЬ СЕРВИС ЕНЭС"
Россия, 630126, г. Новосибирск, Микрорайон «Зеленый бор», д. 7
Телефон/факс: 8 (383) 269-23-00, 269-95-15
E-mail: nspb@nspb.ru

Заключение

Рассмотрены результаты оценки технического состояния силового масляного трансформатора напряжением 110 кВ, приведённые в автореферате диссертации Хальясмаа Александры Ильмаровны на тему «Разработка системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода».

Для проверки адекватности разработанной системы проведём оценку технического состояния трансформатора по данным приведённым в таблице 7 автореферата.

Так по результатам хроматографического анализа растворенных газов прогнозируется дефект электрического характера, а именно - дефект, вызванный дугой (дуговые разряды; искрение; пробой масла между обмотками или катушками или между катушками на землю). При этом концентрация ацетилена превышает граничное значение практически в 5 раз. Относительная скорость нарастания газа равняется 27 % в месяц. Согласно СО 34.46.302-00 (РД 153-34.0-46.302-00), п.8.2.6 при превышении концентрации любого газа и, если скорость нарастания концентрации данного газа более 10 % в месяц, то необходимо планировать вывод трансформатора из работы.

Опыт диагностики трансформаторного оборудования, накопленный нашей организацией, показывает, что подобный дефект можно отнести к категории опасных и затягивать с выводом оборудования в ремонт не следует.

Следует отметить, что образ дефекта не полностью соответствует типовому образу. В данном случае концентрация водорода в несколько раз меньше, чем бывает обычно при подобном дефекте. При этом разработанная экспертная система смогла правильно определить вид дефекта, что, несомненно, является плюсом.

Потери холостого хода выросли на 35% от значений, измеренных при вводе в эксплуатацию. Согласно РД 34.45-51.300-97 п.6.11 отличие измеренных значений

