

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Кокин Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Назарычев Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» Министерства энергетики Российской Федерации, ректор;

Манусов Вадим Зиновьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий».

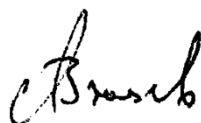
Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»), г. Москва.

Защита диссертации состоится 30 сентября 2015 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, зал Ученого совета (ауд. И-420).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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).

Техническое состояние объекта электрической сети характеризует его способность выполнять свои функции по передаче, распределению и/или преобразованию электрической энергии с параметрами, установленными нормативно-технической документацией по данному объекту, при определенных условиях внешней среды и схемно-режимных факторах.

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 ОТС 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.

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 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 эффективность 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.

Практическая ценность 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.

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 на примере 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы и дана ее общая характеристика. Рассмотрены наиболее значимые проблемы оценки технического состояния (ОТС) электросетевого оборудования. Сформулированы цели и задачи настоящей работы.

Первый раздел посвящен анализу современных методов и систем ОТС электросетевого оборудования.

Современные методы оценки технического состояния

Сегодня в России ОТС электросетевого оборудования производится методами технического диагностирования (методами неразрушающего контроля), многие из которых регламентируются нормативной документацией РФ. Практически для всех видов и типов электросетевого оборудования существует как минимум один метод, с помощью которого можно получить данные о его состоянии с периодичностью проведения контроля не реже одного раза в год: электрический, тепловой, механический, и др. Это позволяет иметь ретроспективу состояния оборудования.

Система мониторинга по сравнению с методами технического диагностирования обладает рядом технических преимуществ, но для определения интегральной ОТС подстанций потребуется установка систем мониторинга на каждую единицу оборудования, что трудно реализовать как технически, так и экономически. Для решения задачи ОТС электрооборудования хорошей альтернативой системе мониторинга может служить система анализа данных, полученных на основе данных технического диагностирования.

Современные системы оценки технического состояния

Современные системы ОТС электросетевого оборудования представляют собой автоматизированные экспертные системы, направленные, в основном, на решение двух видов задач – определения состояния оборудования с целью выявления дефектов и неисправностей и оптимизации управляющих воздействий на электросетевые объекты с целью повышения надежности работы оборудования и продления срока эксплуатации объектов.

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, диагностированию, составу оборудования и его эксплуатации, которые не позволяют использовать зарубежные системы ОТС 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.

С точки зрения математической реализации, существующие системы выполняются как на основе самых простых моделей (на основе обычных

правил продукции), так и на основе более сложных, например, на основе метода Байеса.

Несмотря на все безусловные достоинства применяемых в России систем, они имеют ряд существенных недостатков:

1. Ориентированы на решение конкретной задачи определенного собственника (под конкретные схемы, конкретное оборудование и т.д.) и, как правило, не могут использоваться для комплексной ОТС подстанции.

2. Используется разнородная и разноточная информация, использование которой может приводить к неоптимальности принимаемых решений.

3. Как правило, не учитывают динамику изменения критериев ОТС оборудования, другими словами, системы не обучаемы.

4. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации новых типов и видов оборудования может приводить к сложности диагностирования неисправностей.

Все сказанное выше говорит об отсутствии универсальности современных российских систем ОТС 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 ОТС электросетевого оборудования.

Реализация на основе нейро-нечеткого логического вывода обеспечивает представленную систему ОТС электросетевого оборудования всеми перечисленными свойствами.

В разработанной системе ОТС в качестве входных параметров (X) может использоваться любая доступная информация об анализируемом объекте (ПС) и подобъекте (оборудовании), не только в числовом, но и в лингвистическом виде (Рисунок 1). Например, для ОТС электрооборудования на ПС могут применяться схемно-режимные параметры, данные диагностирования, паспортные данные, информация о ремонтах, данные с датчиков и систем мониторинга и т.п.



Рисунок 1 – Модель оценки технического состояния объекта сети

Из перечисленных выше данных к общедоступным сведениям относятся паспортные данные и данные диагностирования. Все остальные носят не обязательный, а рекомендательный характер и могут производиться выборочно для отдельных объектов, поэтому получить их для каждого объекта ПС, как правило, не представляется возможным.

Второй раздел посвящен разработке архитектуры системы ОТС электрооборудования на ПС.

В рамках диссертационного исследования была разработана архитектура системы ОТС электрооборудования на подстанциях напряжением 35-220 кВ. В результате выполнения алгоритма определяется состояние каждого простого объекта (подобъекта) подстанции (объекта), таких как: силовой трансформатор; линии электропередачи (воздушные и кабельные); трансформатор собственных нужд; реакторы; система релейной защиты и автоматики; выключатель; разъединитель; секции шин; измерительные трансформаторы (тока и напряжения); ограничители перенапряжения и пр.

Для каждого подобъекта производится своя ОТС по совокупности оценок состояния его элементов. Например, для силового выключателя это: контактная система; дугогасительная камера; привод; корпус; вводы; внутренняя изоляция; блок управления. Таким образом, нейро-нечеткий логический вывод в системе ОТС электросетевого оборудования ПС формируется для ОТС элементов подобъекта и уже на базе совокупности оценок состояния его элементов определяется собственная ОТС подобъекта.

Разбиение простого объекта на совокупность элементов обосновано тем, что любой электросетевой объект представляет из себя сложную техническую систему и состоит из N структурных элементов, в которых протекают различные взаимосвязанные процессы. Сложность и взаимосвязность этих процессов затрудняют определение технического состояния электросетевого оборудования. Поэтому одним из эффективных способов системного анализа состояния объекта является принцип декомпозиции.

Несмотря на сложную иерархическую организацию внутри каждого вида, отсутствует необходимость создавать отдельные структуры для каждого типа или марки оборудования в отдельности. 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 ОТС. Так как разработанная система ОТС 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.

В данном разделе разработана структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) на основе ОТС оборудования ПС, позволяющая корректировать ремонтные циклы оборудования и принимать

эффективные решения по его дальнейшей эксплуатации. В состав СППР входят пять основных компонентов (подсистем): сбора данных; формирования данных; формирования знаний; принятия решений и вывода.

В рамках разработанной структуры системы особое внимание уделено информационной системе, на базе которой и осуществляется анализ ОТС оборудования. В данном случае модель данных конструируется с использованием OLAP - технологии (On-line Analytic Processing). Показатели хранятся в кубах не в виде простых таблиц, а в разрезах, представляющих собой основные категории системы ОТС: принадлежность объекта (к району электрических сетей (РЭС), подстанции (станции)), вид электросетевого оборудования, время и т.д., используемые для анализа и принятия решений.

В данном случае выбор вида информационной системы в виде OLAP-кубов связан с возможностью формирования ОТС электросетевого оборудования в различных разрезах и с произвольной глубиной детализации.

В третьем разделе рассматриваются основные аспекты формирования системы нейро-нечеткого логического вывода для решения задачи ОТС электросетевых объектов. Сформулированы принципы построения нейро-нечеткого логического вывода для математической реализации рассматриваемой задачи. Описан механизм настройки системы ОТС электрооборудования с целью адаптации математической модели к реальному объекту.

Использование стандартных математических методов для решения задачи ОТС электросетевых объектов 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.

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 ОТС оборудования, когда необходимо оперировать не только численными данными, но и лингвистическими, например, такими как «состояние оборудования» и т.п. Кроме того, использование аппарата нечетких множеств позволяет адекватно формализовать знания экспертов.

Использование методов ИНС обусловлено их основным преимуществом – возможностью обучения (самообучения), что позволяет путем объединения в обучающей выборке экспертных знаний и аналитических зависимостей идентифицировать неоднозначные параметры (диагнозы) электрооборудования. Такая структура позволяет воспользоваться преимуществами обоих методов при решении задачи ОТС оборудования.

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

В настоящее время наиболее распространены виды нейро-нечеткого логического вывода, созданные Мамдани, Такаги-Сугено, Цукамото, и Ларсена.

Для моделирования многопараметрических задач, к которым относится и задача ОТС оборудования, целесообразно использовать алгоритм Такаги-Сугено. При этом 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

$$R^{(k)} : \text{если } (x_1 \text{ есть } D_1^k \text{ И } \dots \text{ И } x_N \text{ есть } D_N^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1, \dots, x_N) \quad (1)$$

где $R^{(k)}$ - нечеткие правила, а $k=1, \dots, K$, где K - количество нечетких правил; D_i^k - нечеткие множества, где $D_i^k \in X_i \subset R, i=1, \dots, N$; x_1, \dots, x_N - входные переменные; y - выходная переменная, представляющая собой функцию входных переменных. В результате применения данной модели была реализована сеть необходимой структуры.

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

$$y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij}x_j, \quad (2)$$

где N – количество параметров множества X ; $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$ – параметры полинома Такаги-Сугено.

Формирование функций принадлежности

При формировании системы нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено для каждой входной переменной задается диапазон значений с помощью функции принадлежности (ФП). В данном случае каждая переменная x определяется ФП. В зависимости от типа элемента, вида предельных значений, метода диагностирования и т.п. тип и количество ФП могут быть различными. Определение оптимального вида и числа ФП является отдельной задачей в рамках задачи ОТС электрооборудования.

В рамках диссертационного исследования было проанализировано два возможных метода определения ФП с помощью наиболее часто используемых методов кластеризации – метода потенциалов и метода нечеткой кластеризации. В результате в разработанной системе ФП для ОТС

каждого параметра для каждого элемента оборудования определяются на основе метода нечеткой кластеризации (предложенного С. Д. Штвобой). ФП и их количество оказывает существенное влияние на результаты работы системы, поэтому для работы представленной системы для каждого элемента необходимо предварительно произвести анализ и определить, в том числе расчетным путем, оптимальные вид и число ФП.

Формирование обучающей выборки

Как уже упоминалось, одним из преимуществ ИНС является возможность обучения. Для этого в системе нейро-нечеткого вывода формируется обучающая выборка. Объем обучающей выборки и ее качество также влияют на результаты работы системы, поэтому, прежде чем перейти к использованию нейро-нечеткого вывода, необходимо выполнить предварительный анализ обучающей выборки на полноту и репрезентативность.

Формирование исходной обучающей выборки для любой задачи, в том числе и задачи ОТС оборудования, сводится к оптимизации этой выборки. 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. Она включает результаты испытаний, диагностирования и т.п. и данные нормативной документации о регламентированных значениях параметров оборудования. Данные нормативной документации в разработанной модели выражаются в виде нечетких продукционных правил («если *A* есть условие» ..., «то *B* есть заключение»), в которых условия и заключения правил представлены в форме нечетких высказываний относительно значений соответствующих переменных.

Для любого вида оборудования существует несколько вариантов формирования исходной обучающей выборки:

1. В случае отсутствия ретроспективной информации в виде диагностических данных о рассматриваемом объекте (неполная и недостоверная информация) 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) выборка формируется на основе имеющихся диагностических данных с использованием диагностических данных по аналогичным объектам сопоставимой мощности и однотипной конструкции.

3. В случае, когда ретроспективная информация представлена не в виде диагностических данных, а в виде данных измерений без постановки диагнозов, например с датчиков (полная недостоверная информация), такую информацию необходимо предварительно проверить на наличие «выбросов». Фильтрация данных позволяет считать данный вид информации полной и достоверной.

На основе многочисленных расчетов в ходе выполнения диссертационного исследования было определено, что оптимальным методом для фильтрации выбросов во временном ряду является метод скользящего среднего. Для определения выбросов в простой независимой статистической выборке оптимальным для решения представленной задачи является критерий «3 σ ». Только после обработки входных данных (исключения выбросов для третьего варианта выборки) можно использовать обучающую выборку в совокупности с диагностическими данными по аналогичным объектам сопоставимой мощности и однотипной конструкции.

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

Структура нейро-нечеткого вывода и алгоритм ее работы

На рисунке 2 представлена обобщенная структура нейро-нечеткого логического вывода для ОТС электросетевого оборудования. На вход системы поступает набор параметров $X_n = (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nk})$ об анализируемом объекте, определяемых Z_n методом, в ходе которого получен данный набор параметров X_n (диагностика, испытания, данные АИИС КУЭ, телеизмерений и т.д.). При этом нейро-нечеткий логический вывод формируется только на этапе ОТС каждого элемента объекта. Согласно разработанной технологии для каждой группы параметров подбирается свой набор функций принадлежности $\mu(\bar{X})$.

В соответствии с системой нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено сеть будет состоять из 5 слоев.

На первом слое выполняется фаззификация входных параметров оборудования. Преобразование входных данных в нечеткие переменные осуществляется с помощью ФП, механизм определения числа и вида ФП описан выше.

На втором слое осуществляется агрегирование подусловий, т.е. определение степени истинности условий для каждого правила в системе нейро-нечеткого вывода – минимизация значений всех подусловий. 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. Также на третьем слое определяется выходная агрегированная функция $y(X)$, согласно (2), характеризующая множество параметров X . В ходе действия алгоритма $y(X)$ 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.

На пятом слое выполняется дефаззификация выходных параметров - переход от ФП выходной лингвистической переменной к её числовому значению. Итоговый результат агрегируется путем расчета средневзвешенных функций $y(X)$ с учетом множества w в соответствии с выражением (3), в результате формируется ОТС элемента оборудования.

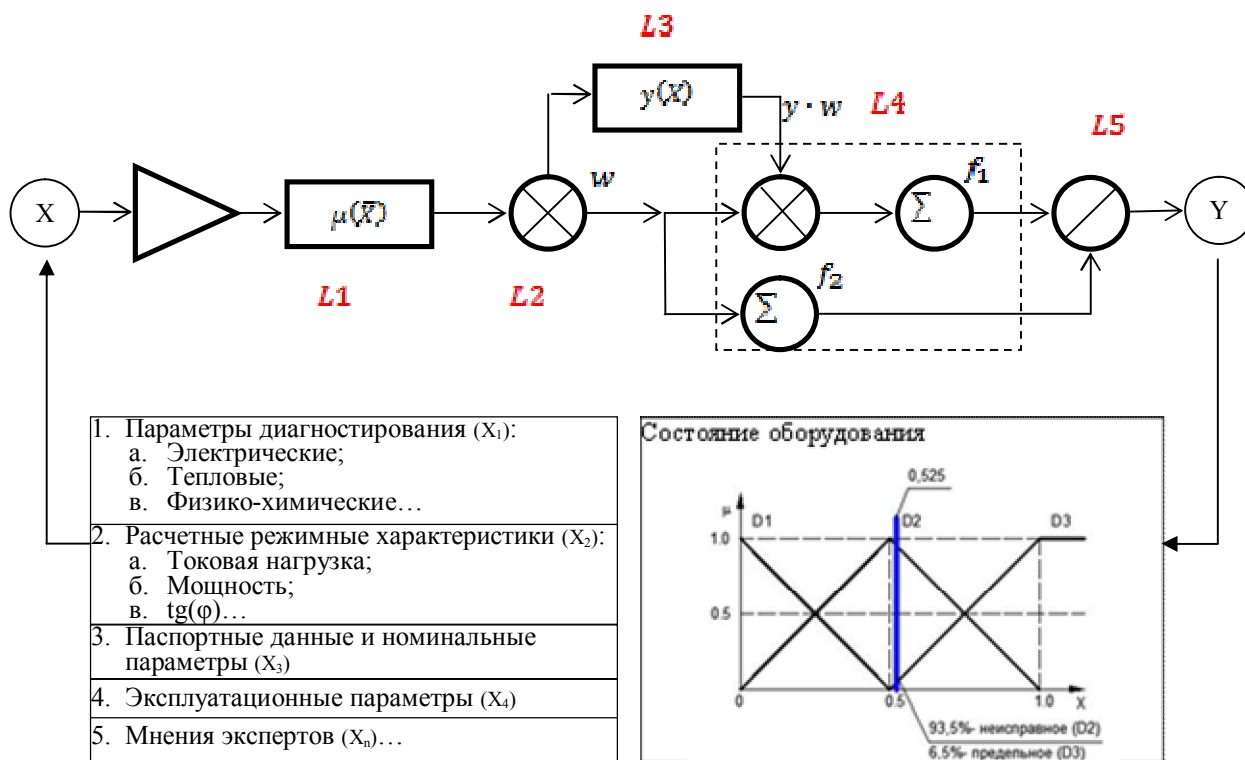


Рисунок 2 – Обобщенная структура нейро-нечеткого логического вывода

Решения и управляющие воздействия

В результате ОТС каждого элемента оборудования на основе расчета средневзвешенных оценок и с помощью ФП формируется итоговая ОТС для определения состояния подобъекта.

Далее представлен общий принцип формирования ОТС простого объекта. В данном случае ФП 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 (4).

В данной задаче в результате ОТС подобъекта определяется принадлежность подобъекта к одному из трех состояний (Рис. 3). Как правило, можно выделить три возможных состояния оборудования:

- исправное состояние D_1 , когда подобъект полностью отвечает всем техническим требованиям (работоспособное);
- неисправное, но работоспособное состояние D_2 , когда техническим требованиям соответствуют лишь те свойства подобъекта, которые характеризуют его способность выполнять заданные функции;
- предельное состояние D_3 , при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по различным причинам.

$$y(x) = f_1/f_2 = \sum_{i=1}^N w_i y_i(x) / \sum_{i=1}^N w_i. \quad (3)$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}. \quad (4)$$

В разработанной системе ОТС оборудования алгоритм Такаги-Сугено используется для предварительной классификации неисправностей элемента или определения его состояния. Следует отметить, что поскольку разработанная система позиционируется в качестве «помощника-советника» для персонала, то любая итоговая ОТС подobjекта соответствует определенным ранжированным альтернативам решений по его дальнейшей эксплуатации. Возможные решения определяются с использованием ФП (Рисунок 4) и могут быть следующими:

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).

Другими словами, второй этап 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 предыдущем этапе.

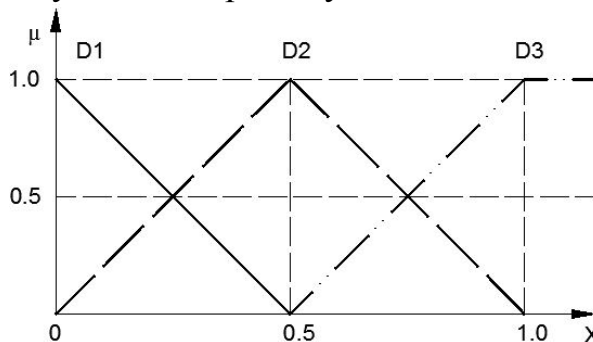


Рисунок 3 – ФП состояния оборудования

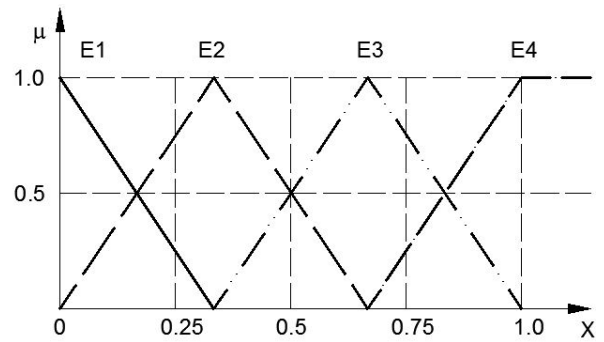


Рисунок 4 – ФП совокупности решений

В четвертом разделе рассмотрена апробация разработанной модели на примере ОТС силовых масляных трансформаторов напряжением 110 кВ. В расчетном примере в качестве входных выбраны все доступные данные по результатам диагностирования анализируемых объектов.

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

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

- магнитопровод (сталь магнитопровода: 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 измерения напряжения - 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 диагностирования.

Оценка состояния работы системы

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

- трансформаторного масла (в баке трансформатора) – по данным хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ);
- магнитопровода – по данным измерений холостого хода (ХХ);
- 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 структура нейро-нечеткого логического вывода (Рис. 5-8). Точность настройки разработанной системы оценивалась на основе обучающей и тестовой выборок. Обучающая выборка состоит из данных 74 силовых масляных трансформаторов 110 кВ сопоставимой мощности и однотипной конструкции, среди которых 32 представлены с дефектом электрического характера, 32 - с дефектом термического характера и 10 - в нормальном состоянии. Тестовая выборка включает данные 70 масляных трансформаторов 110 кВ сопоставимой мощности и однотипной конструкции, 30 из которых представлены с дефектом электрического характера, 30 - с дефектом термического характера и 10 - в нормальном состоянии. Обучающая и тестовая выборки независимы.

Трансформаторное масло

Анализ трансформаторного масла производился по данным ХАРГ 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 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 определить не только принадлежность к состоянию, но и вид дефекта в трансформаторе.

Все возможные дефекты, диагностируемые при использовании ХАРГ (Таблица 2), были разделены на две группы – электрические и термические. С целью выявления дефектов каждой группы в разработанную модель ОТС 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 ФП был определен на основе метода нечеткой кластеризации, который описан в третьем разделе настоящей диссертационной работы. В результате анализа были определены три возможных вида ФП: гауссова, пи-подобная; колоколообразная. Результаты расчетов для каждого варианта представлены в таблице 3. Следует отметить, что некоторые значения отношений концентраций газов, приведенные в таблице 2, совпадают. С целью определения возможности ОТС однотипными и/или универсальными ФП был выполнен анализ двух возможных решений: вариант с помощью объединения одинаковых значений в единые универсальные ФП; вариант с пятью ФП для каждой входной переменной. В ходе расчетов и при настройке системы было определено, что оптимальным является второй вариант.

Нечеткие правила продукции вида "*если* (x_1 *есть* D_1^k *И*...*И* x_N *есть* D_N^k), *то* (y_1 *есть* A)" (A – наименование прогнозируемого дефекта, формируются для каждого возможного дефекта, представленного в таблице 2. Основные характеристические параметры сети нейро-нечеткого логического вывода на основе данных ХАРГ и результаты расчетов приведены в таблице 3. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода представлена на Рисунке 5.

В результате расчета и анализа основных характеристических параметров сети для ОТС трансформатора на основе ХАРГ определено, что оптимальной функцией является пи-подобная ФП. Это 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.

Таблица 2 – Возможные виды дефектов на основе ХАРГ

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентр. газов			Обознач. ФП
	X	Y	Z	
Нормальное (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

Таблица 3 – Основные характеристические параметры сети для ОТС трансформатора на основе ХАРГ

ANFIS данные	Значения		
Электрический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообразная	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	Колоколообразная	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

Кроме этого необходимо оценить не только размер ошибок, а выявить среди них ошибки первого («ложный дефект») и второго («пропуск

дефекта») рода. Это связано с тем, что входное 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.

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 ФП, при этом из двух ошибочно определенных неисправностей в 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.

Магнитопровод

Увеличение потерь ХХ в трансформаторе, как и изменение газосодержания в масле, может свидетельствовать о неисправностях, и соответственно, характеризовать состояние магнитопровода трансформатора. Опытные расчеты ОТС магнитопровода выполнялись для тех же силовых масляных трансформаторов 110 кВ, что и в предыдущем подразделе, на основе данных пофазных измерений потерь ХХ для каждого из трех случаев – замкнутой накоротко обмотки каждой из фаз а, b, с соответственно.

Отличие исходных и измеренных при эксплуатации значений потерь ХХ не должно превышать 30%, поэтому число ФП для каждой из фаз равно двум. С помощью метода нечеткой кластеризации было определено два возможных вида ФП – прямоугольные и пи-подобные. Результаты расчетов для каждого из вариантов представлены в таблице 4. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода представлена на рисунке 6.

Таблица 4 – Основные характеристические параметры сети для ОТС 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

Твердая изоляция

Состояние твердой изоляции силового трансформатора можно оценить по данным измерений сопротивления изоляции трансформатора R_{60} (испытаний постоянным током). 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. Результаты

расчетов для каждого из вариантов представлены в таблице 5. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода представлена на рисунке 7.

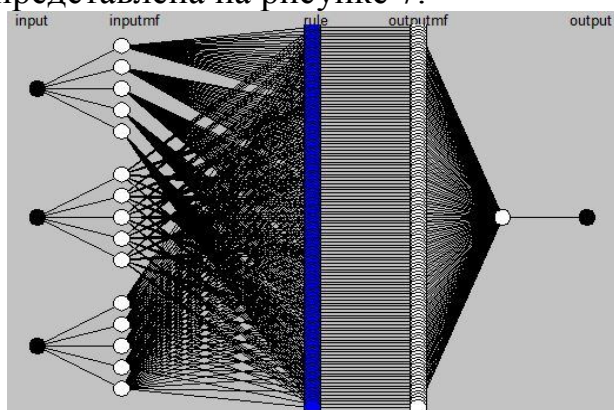


Рисунок 5 – Структура нейро-нечеткого вывода на основе данных ХАРГ

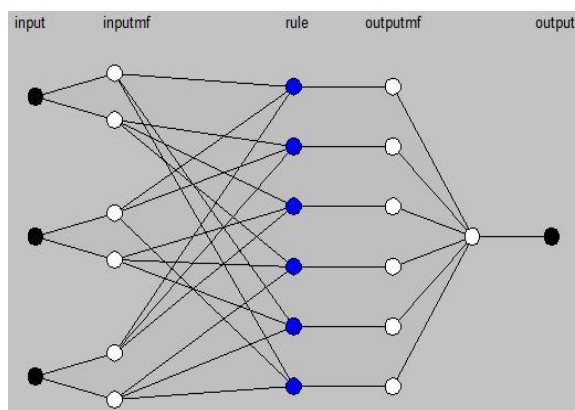


Рисунок 6 – Структура нейро-нечеткого вывода на основе данных потерь XX

Таблица 5 – Основные характеристические параметры сети для ОТС 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

Оценка состояния обмоток трансформатора

Общее состояние 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 ФП – прямоугольные и пи-подобные. Результаты расчетов для каждого из вариантов представлены в таблице 6. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода представлена на рисунке 8.

Таблица 6 – 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

Общее состояние обмоток также 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 ОТС электрооборудования в качестве

косвенного обобщенного дополнительного критерия работоспособности (эксплуатационного ресурса).

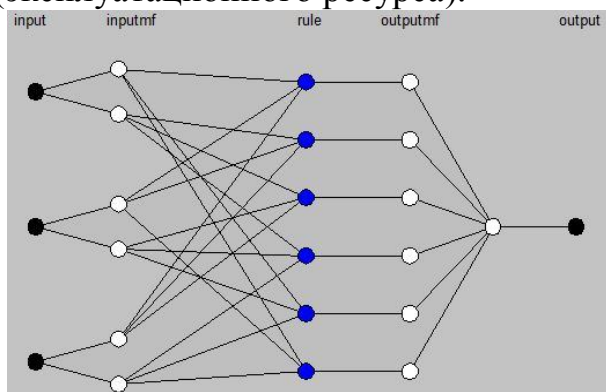


Рисунок 7 – Структура нейро-нечеткого вывода на основе данных сопротивления изоляции

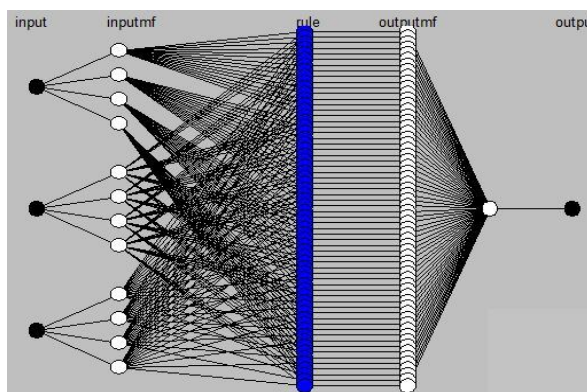


Рисунок 8 – Структура нейро-нечеткого вывода на основе данных омических сопротивлений

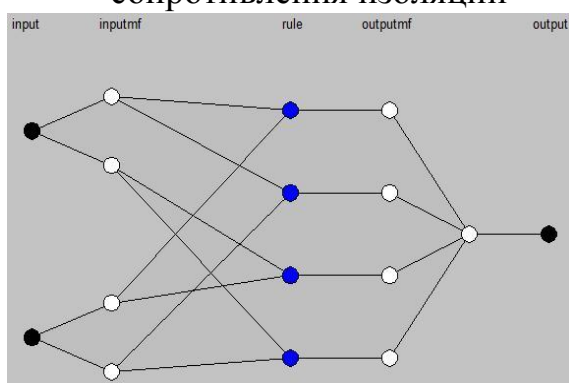


Рисунок 9 – Структура нейро-нечеткого вывода на основе данных об эксплуатационном ресурсе

С помощью метода нечеткой кластеризации было определено два возможных вида функций принадлежности – прямоугольные и пи-подобные. Результаты расчетов для каждого из вариантов представлены в таблице 7. Сформированная структура нейро-нечеткого логического вывода представлена на рисунке 9.

Таблица 7 – Основные характеристические параметры сети для ОТС обмоток трансформатора 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

Оценка состояния силового масляного трансформатора

Рассмотрим работу представленной системы на примере ОТС силового масляного трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ по срезу времени за апрель-май месяцы 2011 г. Анализ ОТС трансформатора был выполнен на основе всей доступной информации по данному объекту, представленной в таблице 8.

Обобщенная ОТС оборудования рассчитывается на основе средневзвешенной балльной оценки. Для учета интенсивности проявления тех или иных свойств объектов электрической сети предложено

использование шкалы Саати $\{0;1;3;5;7\}$. 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.

Таблица 8 – Исходные данные для ОТС 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+Н Н+К	СН-НН+ВН +К	НН-ВН+СН +К	ВН-СН+НН +К	СН-НН+ВН +К	НН-ВН+СН +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						

Результаты расчетов разработанной системы ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты ОТС 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 полученных расчетов состояние трансформатора ТДТН-110/35/10 можно характеризовать как неисправное, но работоспособное состояние D_2 с вероятностью 74,4%, и как предельное состояние D_3 – с вероятностью 26,6% (Рисунок 10).

По результатам полученной ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ могут быть приняты следующие решения (Рисунок 11):

- выполнить ремонт (вероятность принятия данного решения составляет 88,3%);
- вывести из эксплуатации (вероятность принятия данного решения

составляет 11,7%).

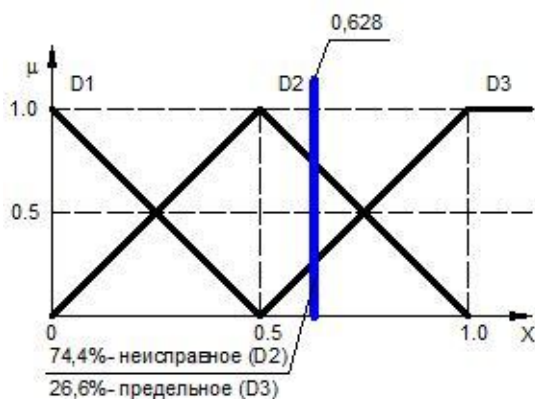


Рисунок 10 - ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10

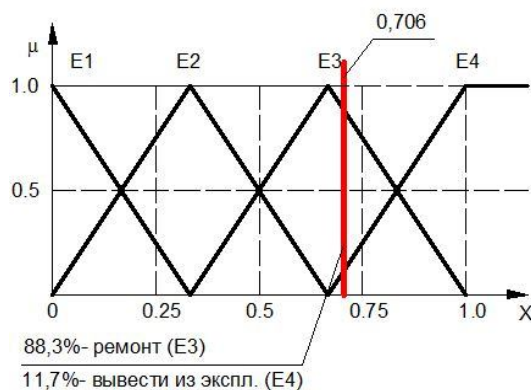


Рисунок 11 - Решения на основе ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10

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

Для проверки результата ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10, выполненного с помощью разработанной системы, специалистами службы организации диагностики маслонаполненного оборудования Филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирская СПБ был проведен анализ данных и зафиксирован дефект электрического характера и даны рекомендации о выводе трансформатора в ремонт, что подтверждает корректность разработанной модели ОТС трансформатора 110 кВ на основе нейро-нечеткого логического вывода и ее настройки.

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 подбъектов и их элементов, являющихся составными элементами подстанции. Каждый показатель характеризует тот или иной физический процесс, оказывающий влияние на состояние подбъекта (элемента) или совокупности подбъектов 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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Хальясмаа А. И. Энергоинформационная модель мониторинга электроэнергетических систем / А. И. Хальясмаа, С. Е. Кокин, С. А. Дмитриев // Научное обозрение. - 2012. - №6. - С. 267-275. (0,7 п. л. / 0,25 п. л.)

2. Хальясмаа А. И. Методы оценки технического состояния воздушных линий электропередачи в условиях ограниченной информации / А. И. Хальясмаа, С. Е. Кокин, С. А. Дмитриев // Научное обозрение. - 2013. - №1. - С. 136-142. (0,6 п. л. / 0,4 п. л.)

3. Хальясмаа А. И. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А. И. Хальясмаа, С. Е. Кокин, С. А. Дмитриев, М. В. Осотова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. - №1 (45). – С. 289-300. (1,0 п. л. / 0,7 п. л.)

4. Хальясмаа А. И. Предпосылки и причины применения методов искусственных нейронных сетей для анализа данных технической диагностики электрооборудования на ПС 35-110 кВ / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Научное обозрение. – 2013. - №2. – С. 126-131. (0,45 п. л. / 0,3 п. л.)

5. 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 Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. - 2013. - Том 13. - №2. - С. 114-120. (0,6 п. л. / 0,35 п. л.)

6. Хальясмаа А. И. Система управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Промышленная энергетика. - 2014. - №2. - С. 36-40. (0,45 п. л. / 0,25 п. л.)

7. Хальясмаа А. И. Формирование системы оценки технического состояния оборудования подстанций на основе методов нечеткой логики / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность - 2014. - №3. - С. 1-4. (0,35 п. л. / 0,2 п. л.)

8. Хальясмаа А. И. Принципы формирования оценки технического состояния электрооборудования на подстанциях/ А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова // Электричество. - 2014. - №10. - С. 1-4. (0,35 п. л. / 0,2 п. л.)

9. Хальясмаа А. И. Вопросы реализации систем оценки технического состояния электрооборудования для энергетических предприятий / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Научное обозрение. - 2014. - №4. - С. 241-245. (0,45 п. л. / 0,3 п. л.)

10. Khalyasmaa A. I. Power equipment technical state assessment principles / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev // Applied Mechanics and Materials. – 2014. - Vol. 492. - P. 531-535. (0,4 п. л. / 0,25 п. л.)

11. Khalyasmaa A. I. Fuzzy neural networks' application for substation integral state assessment / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev, S. E. Kokin, S. A. Eroshenko // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. - Vol. 190. - №1. - P. 599-605. (0, 5 п. л. / 0,35 п. л.)

12. Khalyasmaa A. I. Development of 110-220 kV power transformer model for equipment functional state assessment system / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev // Advanced Materials Research. - 2014. - Vol. 950-951. - P. 653-658. (0,5 п. л. / 0,4 п. л.)

Другие работы по теме диссертации

13. Khalyasmaa A. I. Hybrid neural network and fuzzy logic methods for implementation of equipment actual state assessment of power stations and substations / A. I. Khalyasmaa, S. A. Dmitriev, A. A. Verxozin, S. F. Sarapulov // Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification and Control (MIC 2015). – 2015. - P. 167-171. (0,45 п. л. / 0,3 п. л.)

Подписано в печать
Офсетная печать

Формат 60 x 84 1/16
Тираж 120

Бумага писчая
Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19