

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**На правах рукописи**



**АХЬЁЕВ ДЖАВОД САЛАМШОЕВИЧ**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ  
ЛОГИКИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Манусов Вадим Зиновьевич

Новосибирск – 2018

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Исторический экскурс развития методов технической диагностики электрооборудования электроэнергетических систем .....	10
1.2 Новая парадигма: совершенствование планово-предупредительных ремонтов и ремонтов по техническому состоянию электрооборудования на основе теории нечетких множеств .....	11
1.3 Основные понятия и термины надежности и диагностики .....	19
1.4 Основные понятия о системах диагностирования электрооборудования ..	28
1.5 Выводы.....	36
<b>2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНИКЕ .....</b>	<b>38</b>
2.1 Постановка задачи.....	38
2.2 Нечеткие системы .....	38
2.3 Основы теории нечетких множеств .....	42
2.4 Математическое представление нечетких множеств .....	46
2.5 Нечеткие рассуждения.....	47
2.6 Нечеткие правила.....	50
2.7 Системы нечеткого логического вывода .....	55
2.8 Выводы.....	59
<b>3 НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....</b>	<b>60</b>
3.1 Постановка задачи.....	60
3.2 Нечеткая логика: новая концепция для технической диагностики неисправностей электрооборудования .....	62
3.3 Нечеткие отношения: основные понятия, определения и операции над ними .....	70
3.4 Признаки неисправности и дефекты силовых трансформаторов при эксплуатации.....	79
3.5 Диагностическая модель текущего технического состояния электрооборудования на основе нечетких отношений .....	85
3.6 Углубленная нечеткая модель технической диагностики трансформатора	93

3.7	Согласование экспертных оценок в задаче технической диагностики .....	98
3.8	Выводы.....	110
<b>4</b>	<b>РЕЖИМЫ И ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С КРИОГЕННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ.....</b>	<b>112</b>
4.1	Постановка задачи.....	112
4.2	Математическая модель исследования режимов трансформатора со сверхпроводящими обмотками.....	114
4.3	Электромагнитные переходные процессы в сверхпроводниковом трансформаторе как ограничителя тока короткого замыкания.....	119
4.4	Нечеткие диагностические модели трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой.....	127
4.5	Диагностическая модель трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой на основе метода иерархии.....	133
4.6	Выводы.....	146
<b>5</b>	<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ .....</b>	<b>148</b>
5.1	Постановка задачи.....	148
5.2	Уравнения тепловых процессов трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой .....	148
5.3	Влияние различных параметров трансформатора на уровень перегрева .	153
5.4	Анализ влияния показателя нелинейности вольтамперной характеристики на уровень токоограничения .....	158
5.5	Влияние времени бестоковой паузы на уровень охлаждения трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой.....	161
5.6	Исследование опытного образца физической модели трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой.....	165
5.7	Преимущества трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой.....	170
5.8	Выводы.....	172
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>173</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>176</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>190</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Развитие электроэнергетических систем (ЭЭС) приводит к усложнению их структуры и повышению требований к качеству функционирования. Наряду с этим повышаются требования к оценке текущего технического состояния электрооборудования электросетевого комплекса электроэнергетических систем. При этом к современному электрооборудованию электрических станций, подстанций и электрических сетей предъявляются более высокие требования эксплуатационной надежности, что является одним из основных направлений улучшения технико-экономических показателей функционирования электроэнергетических систем.

Таким образом, необходима техническая диагностика текущего состояния электрооборудования и его своевременный профилактический ремонт. В настоящее время еще не создана такая система технической диагностики, которая бы оценивала текущее техническое состояние электрооборудования и обеспечивала раннее обнаружение возможных дефектов, а также прогнозировала их развитие в будущем. Современные диагностические методы основаны на математических моделях, которые не отображают всех возможных признаков развивающихся дефектов. Поэтому актуальной становится задача использования эвристического подхода, основанного на методах искусственного интеллекта, а именно, на искусственных нейронных сетях, теории нечетких множеств, нечеткой логике и генетических алгоритмах.

Актуальность темы подтверждается тем, что более 60% электрооборудования выработало свой эксплуатационный ресурс, и, в связи с динамикой старения, требуется более тщательное диагностирование его состояния. В этих условиях актуальность диагностики технического состояния обусловлена следующими факторами:

- необходимостью продления нормативного срока службы;
- тенденцией перехода к ремонтам по текущему состоянию;
- сменой диэлектрической среды охлаждения электрооборудования;
- предотвращением аварий и убытков от их возникновения.

Кроме того, в настоящее время актуальной представляется задача технической диагностики немаслонаполненного электрооборудования, для

которого не применимы методы хроматографического анализа растворенных газов в масле (ХАРГ), в то время как основное количество работ по диагностике выполнено именно с учетом ХАРГ для маслonaполненного электрооборудования. Это обусловлено тем, что в качестве диэлектрической среды в ВТСП трансформаторах используется жидкий азот. В частности новой задачей здесь является анализ текущего технического состояния трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой (ВТСП). В этом новом инновационном устройстве возникают задачи ограничения тепловыделения при коротких замыканиях с тем, чтобы предотвратить выход ВТСП трансформатора из сверхпроводящего состояния.

Таким образом, важным моментом для обеспечения работоспособного состояния электрооборудования в ЭЭС является принятие разумного решения о его эксплуатационном техническом состоянии в связи с индивидуальными особенностями каждой единицы электрооборудования. Полученные данные позволяют составлять более обоснованные планы первоочередных мероприятий по ремонту и обновлению электрооборудования на основе оценок работающих на местах специалистов – экспертов, повысив при этом качество управленческих решений. Все вышесказанное подтверждает *необходимость* разработки диагностических моделей и методов для оценки текущего технического состояния электрооборудования электросетевого комплекса на основе технологии искусственного интеллекта.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в разработку методов и моделей диагностики электрооборудования ЭЭС внесли Ю.Н. Львов, А.И. Таджибаев, А.Н. Назарычев, В.А. Шуин, С.Е. Кокин, И.В. Давиденко, В.З. Манусов, В.В. Литвак, С.М. Коробейников, А.Г. Овсяников, В.М. Левин и др.

**Объект исследования** – электрооборудование электрических станций, подстанций и электрических сетей, включая инновационные технологии на основе явления сверхпроводимости.

**Предмет исследования** – модели, методы математического моделирования и многокритериального анализа эксплуатационного состояния электрооборудования на основе нечетких признаков его неисправностей.

**Концепция работы** заключается в создании и разработке диагностических моделей и методов оценки состояния электрооборудования на основе экспертных заключений с использованием нечетких причинно-следственных отношений признаков и причин их возникновения.

**Цель работы:** разработка диагностических моделей и методов оценки текущего технического состояния электрооборудования, включая трансформаторы с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками и криогенной диэлектрической средой охлаждения.

**Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:**

- выполнить критический обзор методов оценки технического состояния электрооборудования и необходимости применения методов искусственного интеллекта;

- составить матрицы нечетких причинно-следственных отношений между признаками (симптомами) и реальными причинами дефектов электрооборудования;

- разработать метод решения системы линейных нечетких алгебраических уравнений для электрооборудования, включая трансформаторы со сверхпроводящей высокотемпературной обмоткой;

- разработать метод определения степени согласованности экспертов на основе медианы Кемени;

- верифицировать математическое описание электромагнитных переходных процессов в ВТСП трансформаторе с функцией ограничения тока КЗ на физической модели.

**Методы исследования:** теория электромагнитных процессов, теория нечетких множеств, метод анализа иерархий, а также методы согласования экспертных оценок.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана новая диагностическая модель определения дефектов высоковольтного электрооборудования, основанная на системе уравнений с нечеткими причинно-следственными отношениями.

2. Исследованы переходные электромагнитные процессы в трансформаторе с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой и функцией ограничения токов короткого замыкания.

3. Обосновано применение метода анализа иерархий для выбора предпочтительных экспертных оценок о текущем техническом состоянии электрооборудования.

4. Разработан метод определения согласованности экспертных мнений с учетом интегрированного мнения эксперта по медиане Кемени.

### **Практическая значимость и реализация работы:**

1. Экспертные оценки текущего технического состояния электрооборудования, выполненные на основе нечетких отношений причинно-следственных связей признаков и дефектов, позволяют повысить достоверность выявления причин возникновения дефектов.

2. Обобщение экспертных оценок позволяет повысить достоверность диагноза о техническом состоянии объектов электросетевого комплекса.

3. Результаты работы использованы в диагностической процедуре оценки состояния электрооборудования электросетевой компании Республики Таджикистан. Математические модели и методы на основе нечеткой логики излагаются в курсах «Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций», «Диагностика и эксплуатация оборудования объектов и систем электроэнергетики», «Технические средства диагностики электрооборудования высокого напряжения» Новосибирского государственного технического университета и Таджикского технического университета им. академика М. С. Осими.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование нечетких моделей в задачах технической диагностики электрооборудования позволяет повысить достоверность оценки технического состояния объекта.

2. Предложенная модель определения дефектов электрооборудования, основанная на уравнениях с нечеткими причинно-следственными отношениями, позволяет повысить достоверность выявления дефектов.

3. Верифицированная функция ограничения токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой.

4. Доказанная обоснованность применения метода анализа иерархий для выбора предпочтительных экспертных оценок о текущем техническом состоянии электрооборудования.

5. Применимость медианы Кемени для оценки согласованности мнений в экспертной группе.

### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

1. пункт 5 - «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок».

2. пункт 6 – «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике».

3. пункт 13 – «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

**Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов**, заключается в корректном использовании теоретических основ электротехники, теории электромагнитных процессов и теории нечетких множеств, которые хорошо подтверждены и апробированы на практике.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и технических совещаниях:

- Двадцатая всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность надежность безопасность». Томский политехнический университет, г. Томск, Россия, 2 - 4 декабря 2014 г.;

- VII международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика». Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия 9 - 12 июня 2015г.;



- International Conference on Sustainable Cities (ICSC 2016). Ekaterinburg, Russia, 19 May, 2016;

- XIII Международная научно-техническая конференция «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ». Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, 3-6 октября 2016 г.;

- 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016;

- VI Всероссийская научно-практическая конференция «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы», посвященная 70-летию Рубцовского индустриального института. Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» г. Рубцовск, Россия, 24 – 25 ноября 2016 г.;

- Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия 5 - 9 декабря 2016 г.;

- Научно-практической конференции: Энергетика: экология, надёжность, безопасность, посвященной 25-летию Независимости Республики Таджикистана и 60-летию образования кафедры «Электрические станции» Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан, 24 декабря 2016 г.

**Публикации.** По материалам исследований диссертационной работы опубликовано 24 печатных работ, в том числе 8 работ в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Российской Федерации, 6 работ включены в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS и 10 работ в прочих изданиях. В работах, опубликованных в соавторстве личный вклад автора не менее 60 %.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего в себя 135 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 195 страниц, включая 63 таблицы и 46 рисунков.

# 1 МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ

## 1.1 Исторический экскурс развития методов технической диагностики электрооборудования электроэнергетических систем

Развитие электроэнергетических систем и повышения требований к качеству их функционирования в значительной степени зависит от технического состояния электросетевого оборудования и уровня его эксплуатации. В настоящее время электрооборудование электрических станций (ЭС), подстанций (ПС) и электрических сетей, в основном, выработало свои нормативные сроки эксплуатации. Надежность эксплуатации электрооборудования в значительной степени зависит не только от технологического уровня его изготовления, но и от условий соблюдения правил технической эксплуатации и контроля текущего технического состояния.

Проблема технической диагностики и идентификации состояний таких сложных технических систем, как электросетевой комплекс, является одной из наиболее актуальных проблем, которая обеспечивает надежность и качество эксплуатации электроэнергетических систем.

Решению задачи диагностики и оценки текущего технического состояния электрооборудования электроэнергетических систем в последнее время придается все большее значение, что подтверждается работами по технической диагностике оборудования [1–5]. Значительный вклад в диагностику трансформаторного оборудования внес В.В. Соколов [6–8]. В Российской Федерации большой вклад в решение задачи диагностики состояния электрооборудования и совершенствования методов диагностики внесли: М.Ю. Львов, Б.А. Алексеев, В.В. Соколов, А.Г. Овсянников, П.М. Сви, В.П. Вдовико, Л.А. Дарьян, В.Н. Осотов и другие. В разработку экспертных систем и методов технического диагностирования большой вклад внесли следующие ученые: А.И. Таджибаев, А.Н. Назарычев, А.Ю. Хренников, И.В. Давиденко, Г.В. Попов и другие.

Построение автоматизированной системы оценки текущего технического состояния представляет собой сложную и актуальную задачу. От ее решения

зависит качество функционирования современных электроэнергетических систем. Сложность современного электрооборудования и разнообразие режимов его эксплуатации требуют пересмотра существующих традиционных концепций построения диагностических систем и поиска новых путей решения проблемы. Одним из таких путей, разработанных в настоящей диссертационной работе, является концепция сочетания традиционных экспертных систем с методами искусственного интеллекта, а именно, с теорией нечетких множеств и нечеткой логикой.

Построению моделей принятия решений на основе нечеткой информации и нечеткого логического вывода посвящены работы Л. Заде, Е. Мамдани, А.Н. Аверкина, И.З. Батыршина, Д. Баршдорф, В.З. Манусова, Р.А. Алиева, А.Н. Борисова, О.А. Крумберга и других.

## **1.2 Новая парадигма: совершенствование планово-предупредительных ремонтов и ремонтов по техническому состоянию электрооборудования на основе теории нечетких множеств**

**Концепция системы планово-предупредительных ремонтов.** Разработка системы рациональной эксплуатации и планового ремонта оборудования была начата в СССР в 1923 году. Одновременно с решением об индустриализации страны и созданием Государственного института по проектированию металлических заводов, на которые была возложена функция по разработке проектных зданий по всем заводам тяжелой промышленности, был определен подход к организации ремонта в стране. Он заключался в определении численности ремонтного персонала по полному списку электрических машин, трансформаторов, низковольтной и высоковольтной аппаратуры, освещения, в проектировании электроремонтных мастерских на каждом из заводов.

В середине 30-х, когда уже начали работу многие заводы, была развернута модернизация, и проблема ремонта обострилась. Был принят ряд документов, в соответствии с которыми начали издавать приказы о планово-предупредительном ремонте (ППР) на всех промышленных предприятиях и разрабатывать нормы на ремонт.

Система ППР основана, прежде всего, на некоторых заранее определенных межремонтных циклах. Они устанавливают перечень и последовательность ремонтных работ, обусловленных технической эксплуатацией в период между капитальными ремонтами. Можно также выделить виды плановых ремонтов: малый, средний и капитальный. Малый связан с заменой или восстановлением электрооборудования, с тем, чтобы обеспечить техническую эксплуатацию оборудования до очередного планового ремонта. Средний представляет собой возможную разборку оборудования, капитальный ремонт отдельных узлов и восстановление наиболее изношенных деталей, их сборку, регулирование и испытание оборудования под нагрузкой. Капитальный ремонт предполагает полную разборку оборудования, замену изношенных деталей и узлов, их сборку и приемо-сдаточные испытания.

ППР необходимо проводить для предотвращения эксплуатационного возрастающего износа, преждевременного выхода из строя эксплуатируемого электрооборудования и для сохранения его эксплуатационной надежности, а также для обеспечения его эффективной и безопасной работы. ППР включает в себя циклически повторяющиеся на некотором интервале времени профилактические и текущие работы по осмотру и, при необходимости, ремонту оборудования.

Основное содержание системы ППР заключается в следующем:

- обязательное выполнение правил технической эксплуатации оборудования и норм его технического обслуживания;
- своевременное и качественное проведение плановых ремонтов оборудования.

Система ППР электрооборудования является рекомендательным материалом прямого действия, а также может быть пособием при разработке предприятиями собственных регламентов «Положений по планово-предупредительному ремонту энергетического оборудования» в соответствии с требованием Федеральной службы по технологическому надзору (далее – Федерального надзора) ПБ 05-356.00, п. 242.

Система ППР электрооборудования создана, в основном, без учета новых технико-экономических и рыночных условий, а в техническом плане – при

недостаточном использовании всех возможных стратегий и методов ТОиР, включая новые экспертные методы технической диагностики: современные методы искусственного интеллекта и компьютерных технологий обработки информации о текущем состоянии электрооборудования, календарного планирования ремонтно-профилактических воздействий.

При использовании ППР проявляются некоторые недостатки, начиная от запаздывания оптимальных решений, связанных с ремонтом, заканчивая простоем бригад ремонтного персонала, что приводит к снижению безопасности оборудования и эффективности работы предприятия. На предприятиях повышенного риска для исключения возникновения аварий и защиты от поломок сокращают период между ремонтами и выполняют замену деталей, даже если последние не выработали полностью ресурс. Каждая из приведенных проблем на материалоёмких предприятиях, где оборудование связано в жесткую цепочку, и лишний час простоя выливается в колоссальные убытки, создает необходимость анализа и перехода к ремонту по фактическому состоянию [9].

**Концепция системы ремонтов по текущему техническому состоянию электрооборудования.** Техническая диагностика (ТД) может представлять собой важный элемент общей системы ППР; она позволяет устанавливать некоторые признаки неисправности (работоспособности) электрооборудования и определять методы и средства, на основании которых делается заключение (устанавливается диагноз) о наличии или отсутствии некоторых дефектов (неисправностей). Изучая динамику изменения показателей текущего технического состояния электрооборудования, техническая диагностика позволяет прогнозировать (предвидеть) время безотказной работы и остаточный ресурс электрооборудования на определенном интервале времени эксплуатации.

Техническая диагностика, прежде всего, направлена на установление и анализ внутренних причин отказов. Наружные дефекты определяются либо визуально, либо при помощи метрологических инструментов. Особенность ТД состоит в том, что она измеряет и определяет техническое состояние электрооборудования или его основных частей в процессе эксплуатации,

направляет свои усилия на поиск дефектов и установление внутренних причин их возникновения [9].

Идея перехода от использования системы ППР к ремонту оборудования по фактическому состоянию обсуждается, но развитию такой системы препятствует отсутствие оперативного анализа состояния интересующих составляющих и данных о состоянии оборудования [10–11].

Данная технология основана на том, что все работы по ремонту и наладке производятся в зависимости от реального текущего технического состояния механизма, контролируемого в процессе эксплуатации без каких-либо разборок и ревизий на базе измерения соответствующих параметров.

Никто из нас не станет разбирать и полностью ремонтировать двигатель собственного автомобиля просто потому, что он отработал 60 или 80 тысяч часов. Мы контролируем состояние двигателя в процессе эксплуатации по давлению, температуре, расходу масла, компрессии и т.д., то есть по определенным диагностическим признакам, и только после этого принимаем решение о проведении определенных ремонтных работ.

Ремонт по фактическому состоянию дает значительный экономический эффект. Успешное его использование позволяет [12]:

- сократить время и объем ремонта не менее, чем на треть;
- уменьшить число внезапных отказов в десятки раз;
- сократить упущенную прибыль из-за простоев в несколько раз.

Для осуществления ремонта по фактическому состоянию необходима детальная диагностика объекта, причем желательно обнаруживать все дефекты задолго до отказа, чтобы подготовиться к ремонту.

В пользу решения о переходе на ремонт и эксплуатацию оборудования по фактическому состоянию говорят факты, которые известны многим ремонтникам:

- оказывается, что не менее 50% из числа всех технических обслуживаний по ППР выполняются без фактической их необходимости;

- очень часто обслуживание и ремонт по регламенту не снижает частоту выхода оборудования из строя. Есть данные, что простая разборка - сборка

оборудования может уменьшить ресурс на 30%, так же нет гарантии, что вы при ремонте установите комплектующие лучшего качества;

Данная технология коренным образом меняет систему обслуживания оборудования на предприятии и позволяет:

- контролировать реальное текущее техническое состояние механизмов;
- технически обоснованно определять сроки и содержание ремонтных и наладочных работ, контролировать качество их выполнения;
- сократить финансовые и трудовые затраты на эксплуатацию оборудования;
- продлить межремонтный период и срок службы ваших механизмов;
- сократить потребность в запасных частях, материалах и оборудовании;
- избавиться от «внезапных» поломок механизмов и остановок производства;
- повысить общую культуру производства и квалификацию персонала.

Технология ремонта «по состоянию» позволяет сократить эксплуатационные расходы, существенно повысить ресурс и надежность оборудования, однако для ее внедрения необходимо достаточно точное приборное и методическое обеспечение.

Третий метод ремонта и обслуживания оборудования - наработка оборудования «на отказ» - заключается в том, что ремонт оборудования производится при его отказе. Данный вид диагностики не дает значительного экономического эффекта, поскольку с отказом агрегата могут быть связаны тяжелые последствия. В некоторых случаях оборудование не подлежит ремонту.

Надежность работы сетей, электростанций и энергосистем в значительной степени зависит от надежности работы трансформаторов, тем более, что значительная часть трансформаторов отработала определенный стандартом минимальный срок службы - 25 лет [13]. По всей видимости, в ближайшие годы произвести замену большинства из них не удастся, поэтому контроль эксплуатационной надежности исчерпавших свой ресурс трансформаторов приобретает особую актуальность с точки зрения энергосбережения ресурсов. Техническое обслуживание предусматривает

выполнение комплекса работ, направленных на обеспечение работоспособного состояния оборудования, надежной и экономичной его эксплуатации, проводимых с определенной периодичностью и последовательностью при оптимальных трудовых и материальных затратах.

С ростом энергопотребления и развитием экономики в целом связано большое количество строящихся подстанций. На рисунке 1.1 показана динамика роста объема обслуживаемого энергетического оборудования ОАО «Ноябрьскэнергонефть» с 2001-2005 гг.

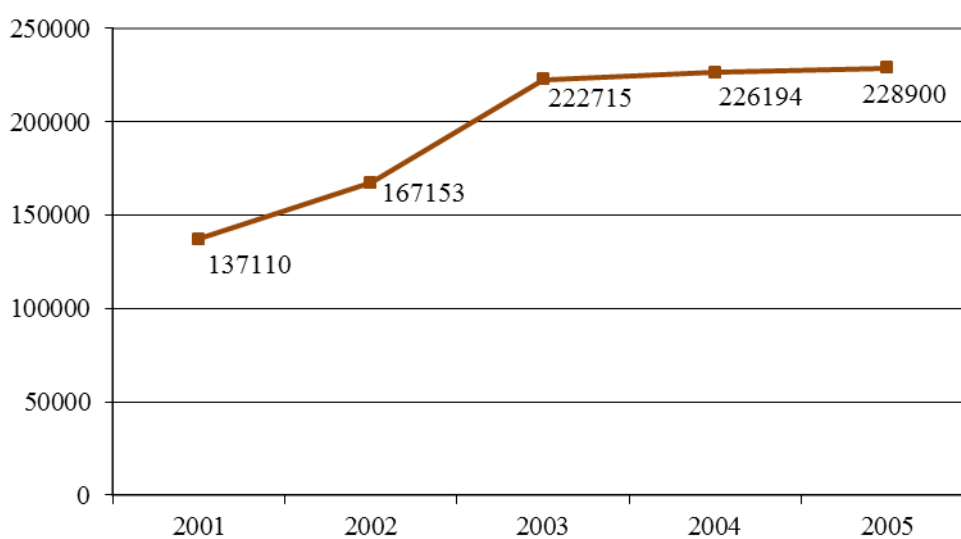


Рисунок 1.1 – Динамика роста объема обслуживаемого энергетического оборудования на ОАО «Ноябрьскэнергонефть»

В условиях новых рыночных отношений в электроэнергетике плановая система ремонтов не всегда позволяет обеспечить выбор оптимальных с точки зрения ресурсов решений. Это обусловлено тем, что выбор тех или иных профилактических текущих работ осуществляется по плану регламентировано и не учитывает реального фактического текущего технического состояния электрооборудования к моменту осуществления ремонта. Кроме того, не в полной мере учитываются приоритет вывода в текущий ремонт того или иного вида электрооборудования, а также технологические и материальные ограничения. Наряду с этим, не разработаны принципы оптимизации выбора рациональных управленческих решений, связанные с состоянием уровня



эксплуатации и более рационального расходования материальных ресурсов для каждой отдельной единицы электрооборудования. Необходимо учитывать также, что система ППР содержит достаточно высокую трудоемкость профилактических ремонтных работ. С учетом роста количества единиц электрооборудования пропорционально увеличивается общая трудоемкость профилактических ремонтных работ, что влечет за собой увеличения численности необходимого ремонтного персонала. Выполнение профилактических ремонтных работ через некоторые статистически усредненные периоды даже при наличии поправочных коэффициентов на режимные условия эксплуатации, без точной оценки текущего технического состояния нельзя гарантировать, что будут возникать признаки отказов электрооборудования в некоторый межремонтный период [14–16].

В целом проблема совершенствования системы диагностики технического состояния, обслуживания и ремонта (ТОиР) электрооборудования предполагает решение следующих задач [17–19]:

- оптимальная организация диагностики и контроля технического состояния электрооборудования;
- оценка и прогнозирование эксплуатационной надежности электрооборудования;
- оптимизация сроков проведения ТОиР;
- определение оптимального объема ТОиР;
- выбор стратегии управления состояниями процесса эксплуатации электрооборудования;
- планирование ТОиР электрооборудования с учетом технического состояния.

Основным преимуществом новой технологии диагностики и управления техническим состоянием электрооборудования является метод ТОиР энергообъектов, основанный на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации [20–21]. Тогда система ТОиР представляет собой совокупность правил, обеспечивающих заданное управление производственной эксплуатацией электрооборудования на основе текущего контроля технического состояния.

Классически применяется два подхода к планированию ремонта объектов и объемов работ и управлению техническим обслуживанием:

- система планово-предупредительного ремонта;
- ремонт по состоянию.

Принципиальное отличие указанных подходов заключается в том, что они используют разные основания для определения объекта, сроков и объемов работ.

Как отмечено ранее, корректность планирования ремонтов и технического обслуживания оборудования в первую очередь определяется наличием информации о реальном техническом состоянии оборудования. Соответственно, будущее за планированием ремонтов и технического обслуживания оборудования на основе его технического состояния.

Тем не менее, быстрый переход на такую схему невозможен. Если только не брать во внимание крайний случай функционирования системы планирования ремонта по техническому состоянию – работа «на отказ». Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что необходимо совмещать системы планирование ремонтов на основе ППР и планирование по оценке текущего технического состояния [22–23].

Кроме того, полный отказ от системы планирования ремонтов на основе ППР невозможен и по юридическим причинам. В соответствии с нормативными документами, система ППР является основным инструментом по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации оборудования в настоящее время.

Благодаря текущей технической диагностике оборудования, могут быть значительно сокращены финансовые затраты электросетевого предприятия. Дешевле будет поддерживать электрооборудование в рабочем состоянии, на ранней стадии предотвращать дефекты, чем заменить вышедший из строя трансформатор на новый или капитальный ремонт после тяжелой аварии, тем более, что отказ одной из его составных частей еще не требует замены всего трансформатора, особенно если возможен ремонт в короткие сроки.

Наряду с этим, при отсутствии оценки текущего технического состояния электрооборудования могут быть приняты необоснованные решения о

проведении капитального ремонта, технологии и его объеме, что в лучшем случае приводит к неоправданным затратам, а в худшем – к снижению надежности, отказам, и в конечном итоге – к значительным материальным финансовым затратам предприятия.

Поэтому крайне важно определить повреждения трансформаторов и иного электрооборудования для оценки их эксплуатационного состояния и принятий решения о дальнейшей возможной эксплуатации, ремонте или замены. Совершенствование методов текущего технического состояния необходимо в связи с тем, что сроки ППР являются очень усредненными для различных видов электрооборудования и не учитывают индивидуальных режимов работы и условий эксплуатации отдельных электроустановок. Эти условия могут значительно отличаться друг от друга в процессе эксплуатации для разных электроустановок. В данной работе рассмотрено решение этой задачи с помощью теории нечетких множеств, экспертных оценок и нечетких выводов.

### **1.3 Основные понятия и термины надежности и диагностики**

В настоящее время в различных отраслевых документах существует большое многообразие определения основных понятий надежности, которые отражают субъективное мнение тех или иных специалистов. Например, новый ГОСТ Р 53480-2009 «Надежность в технике, Основные понятия. Термины и определения», введенный взамен ранее действовавшего одноименного ГОСТ 27.002-89 [24], вызвал острую дискуссию среди научных и технических специалистов, так как является, по сути, не самым удачным переводом аналогичных международных стандартов. В настоящее время ГОСТ Р 53480-2009 отменен и вновь введен в действие ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». Поэтому в работе используются следующие общие понятия и определения, которые традиционно применяются в отечественной технической литературе в соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

- **Надежность** – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в общем случае включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, или сочетание этих свойств. Для неремонтируемых видов оборудования основным свойством, составляющим понятие надежности, является безотказность, а для ремонтируемых – ремонтпригодность. Для оборудования, представляющего потенциальный источник опасности, важным понятием является «безопасность»;
- **Безотказность** – свойство оборудования непрерывно сохранять работоспособное состояние в течении некоторого времени или наработки. Безотказность свойственна оборудованию в любом из возможных режимов его существования, но в основном она рассматривается применительно к его использованию по назначению. Однако в ряде случаев необходима оценка безотказности при хранении и транспортировке оборудования;
- **Долговечность** – свойство оборудования сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Оборудование может перейти в предельное состояние, даже сохраняя работоспособность, если его дальнейшая эксплуатация станет недопустимой по требованиям безопасности, экономичности или эффективности;
- **Ремонтпригодность** – свойство оборудования, заключающееся в приспособленности его к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Понятие ремонтпригодности включает в себя также приспособленность оборудования к техническому обслуживанию, диагностированию, предупреждающего повреждений и отказов;

Для характеристики состояния оборудования в процессе эксплуатации используются следующие понятия и определения:

- **Исправное состояние** – состояние оборудования, при котором оно соответствует всем требованиям нормативно-технической или конструкторской документации;
- **Неисправное состояние** – состояние, при котором оборудование не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или конструкторской документации;
- **Работоспособное состояние** – состояние, при котором значение всех параметров, характеризующих способность оборудования выполнить заданные функции, соответствуют нормативным требованиям. Работоспособное оборудование может быть неисправным, если отклонения от номинальных требований не представляют выполнения заданных функций. Например, нарушение наружного лакокрасочного покрытия бака масляного выключателя не препятствует выполнению им коммутационных операций, которые являются для него заданными функциями;
- **Ограниченно работоспособное** – состояние, при котором оборудование может выполнить свои заданные функции при некоторых ограничениях. Например, при снижении эффективности работы системы охлаждения генераторы или силовые трансформаторы могут выполнить свои заданные функции при определенных ограничениях передаваемой мощности. Ограниченно работоспособным можно считать оборудование, которое из-за появления тех или иных дефектов может выполнить заданные функции при ограничении некоторых показателей надёжности. Ремонтпригодное оборудование может быть переведено из ограниченно работоспособного состояния в работоспособное путем проведения соответствующего ремонта. Для уточнения степени ограничения работоспособности электрооборудования часто пользуются следующими понятиями: аномальное состояние или критическое состояние;
- **Неработоспособное состояние** – состояние, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность оборудования выполнять заданные функции, не соответствует нормативным требованиям. Ремонтпригодное оборудование может быть переведено из

неработоспособного состояния в работоспособное путем проведения соответствующего ремонта;

- **Предельное состояние** – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация оборудования недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния технически невозможно или нецелесообразно по условиям безопасности или экономичности.

Переход оборудования из работоспособного состояния в неработоспособное происходит вследствие повреждения или отказа. Под повреждением (неисправностью) понимают событие, заключающееся в нарушении исправного состояния оборудования при сохранении им работоспособного состояния. Переход из работоспособного состояния в неработоспособное связан с появлением и развитием дефектов. Под дефектом в этом случае понимается такая неисправность, при развитии которой со временем произойдет отказ оборудования. Под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния оборудования.

Один из вариантов классификация отказов в зависимости от причин и последствий приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Виды отказов

Признаки отказов	Вид отказа
Временной характер признака отказа	Внезапный Постепенный
Степень утраты эксплуатационных свойств	Неработоспособное Работоспособное
Связь с состоянием других элементов	Зависимый Независимый
Виды дефектов	Конструктивный Производственный Эксплуатационный
Период эксплуатации	Приработка Деградация

**Техническая диагностика** – область научно-технических знаний, охватывающая теорию, методы и средства обнаружения и поиска дефектов

оборудования. Основное назначение технической диагностики заключается в повышении надежности оборудования в процессе эксплуатации и предотвращении производственного брака при изготовлении оборудования и его элементов. В эксплуатации техническая диагностика позволяет, в частности:

- предупреждать отказы оборудования;
- улучшать коэффициент готовности и коэффициент технического использования оборудования;
- увеличивать наработку до отказа, ресурс и срок службы оборудования;
- прогнозировать остаточный ресурс оборудования;
- снижать затраты на ремонт оборудования;
- сокращать эксплуатационные расходы;
- уменьшать количество обслуживающего персонала;
- оптимизировать количество запасных частей;
- уменьшать затраты на страхование.

На стадии изготовления предотвращение производственного брака достигается диагностированием комплектующих изделий и материалов на операциях входного контроля и контролем технологических процессов, включающим приемосдаточные испытания. По данным Международной конфедерации по измерительной технике и приборостроению (IMECO), за счет внедрения средств диагностики для энергетических установок сокращается трудоемкость и время ремонта примерно на 40%, уменьшается расход топлива на 4%, коэффициент технического использования оборудования увеличивается на 12%.

Основные термины и определения технической диагностики даны действующими нормативными документами, например ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения» [25]. Некоторые понятия теории надежности и теории технической диагностики являются общими, например понятие дефекта и понятие работоспособности. Однако в общем виде некоторые определения слишком широки, и поэтому для практического применения недостаточно продуктивны. Поэтому на практике в ряде случаев

используются термины, которые еще не вошли в нормативные документы, или же нормированным терминам придается другое смысловое содержание.

Одним из важнейших понятий технической диагностики является понятие дефекта. В нормативных документах под дефектом понимают любое несоответствие свойств оборудования заданным, требуемым или ожидаемым. Основным недостатком такого общего определения дефекта является отсутствие связи со степенью работоспособности оборудования. Например, наличие точечной микроскопической течи масла через уплотнение бака масляного выключателя, безусловно, не является ни заданным, ни требуемым, ни ожидаемым его свойством, но никоим образом не влияет на выполнение выключателем его основных функций. Поэтому на практике понятие дефекта связывают с изменением технического состояния оборудования. В этом случае под дефектом понимают такую неисправность, при развитии которой со временем неизбежно произойдет отказ оборудования. Виды дефектов оборудования приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Виды дефектов электрооборудования

Название дефекта	Описание дефекта
Явный (диагностируемый)	Для его определения существуют правила, методы и средства диагностики
Скрытый (не диагностируемый)	Для его определения не существует правил, методов и средства диагностики
Внезапный (критический)	Дефект развивается быстро, предотвращается действием релейных защит и автоматики.
Быстро развивающийся (значительный)	Дефект развивается в течение нескольких месяцев. Предотвращение отказа возможно с помощью диагностики и систем мониторинга
Деградационный (малозначительный)	Дефект развивается достаточно медленно, диагностика возможна при периодическом контроле
Конструктивный	Дефекты возникают из-за нарушения норм проектирования и конструирования
Производственный	Дефект возникает из-за нарушения технологического процесса изготовления или ремонта оборудования
Эксплуатационный	Дефекты возникают из-за нарушения правил технической эксплуатации оборудования



Наиболее часто используются следующие термины и определения технической диагностики.

- **Техническое состояние** – совокупность свойств оборудования, установленных технической документацией на него, определяющих возможность его функционирования и подверженных изменению в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. Определение видов технического состояния приведены в предыдущем разделе;
- **Параметры состояния** – количественные характеристики определяющих работоспособность оборудования свойств, заданные в технической документации на изготовление, эксплуатацию и ремонт;
- **Контроль технического состояния** – проверка соответствия значений параметров оборудования требованиям технической документации и определение на этой основе вида технического состояния, в котором оборудование находится в данный момент времени;
- **Техническое диагностирование** – процесс определения технического состояния оборудования, при котором наряду с контролем технического состояния проводится поиск места и определение причин появления дефектов (отказов), а также дается вероятностный прогноз технического состояния оборудования на предстоящий интервал времени;
- **Рабочее (функциональное) диагностирование** – диагностирование, при котором на оборудование подаются только рабочие воздействия без нарушения режима его функционирования. Основным достоинством рабочего диагностирования является то, что для его реализации не нужны специальные внешние воздействия, а необходимая информация собирается и обрабатывается в процессе эксплуатации оборудования. Простейшими видами рабочего диагностирования являются аварийные защиты оборудования. По мере развития методов и средств мониторинга рабочее диагностирование занимает все большее место в общей системе диагностирования;
- **Диагностический признак** – явление или свойство оборудования, которое сопутствует дефекту и на основании появления (или отсутствия) которого косвенно судят о появлении (или отсутствии) дефекта. Например,

признаком дефекта контактов коммутационных аппаратов может быть увеличение их переходного сопротивления или повышенный нагрев, как самых контактов, так и прилегающих к ним конструктивных элементов этих аппаратов;

- **Диагностический сигнал** – контролируемая характеристика, используемая для обнаружения диагностических признаков. По виду диагностического сигнала зачастую классифицируют вид диагностирования, например тепловизионное или виброакустическое диагностирование;
- **Диагностический параметр** – количественная характеристика диагностического сигнала, включенная в совокупность показателей состояния оборудования, например размах колебаний, амплитуда и фазы составляющих частот сигнала;
- **Диагностический симптом** – разность между фактически измеренным и заданным эталонным значением диагностического параметра. Для отражения степени опасности дефекта можно вводить несколько эталонных значений: зону риска, зону отказа, предельно допустимое значение и т.п. Погрешность, с которой оценивается значение диагностического симптома, существенно влияет на достоверность диагноза и прогноза состояния контролируемого оборудования;
- **Диагностическое правило** – совокупность диагностических признаков и параметров, характеризующих появление в оборудовании определенного вида дефекта, и эталонных (пороговых) значений, разделяющих множество бездефектного оборудования и оборудования с различной величиной дефекта;
- **Диагностическая модель** – формализованное описание оборудования, представляющее совокупность диагностических правил по всем потенциально опасным дефектам этого оборудования. Диагностическая модель включает также правила принятия решений в тех случаях, когда одним и тем же дефектам соответствует группа различных признаков и параметров или, наоборот, когда один и тот же признак и параметр соответствует появлению разных дефектов в различных режимах работы диагностируемого оборудования. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической или другой форме;

- **Алгоритм диагностирования** – совокупность предписаний по выполнению определенных действий для постановки диагноза в соответствии с диагностической моделью оборудования;
- **Диагноз** – заключение о техническом состоянии оборудования;
- **Система мониторинга (диагностирования)** – совокупность диагностируемого оборудования, технических средств мониторинга и диагностирования, обеспечивающих постановку диагноза и прогноза состояния оборудования;
- **Автоматическое диагностирование** – процесс определения состояния оборудования без участия оператора по данным измерений, выполненных техническими средствами диагностирования, или с помощью оператора, или автоматически. Программы автоматического диагностирования - это программное обеспечение, позволяющее заменить эксперта персональным компьютером при решении типовых диагностических задач.

Техническая диагностика электрооборудования – это направление науки и техники, находящееся на стыке многих областей знаний. Для разработки и эксплуатации систем диагностирования электрооборудования необходимо иметь базовые знания и практические навыки во многих областях науки и техники:

- Теоретические основы электротехники, теоретические основы электрических машин и аппаратов, электрофизические основы техники высоких напряжений, позволяющие описать работу диагностируемого оборудования и выбрать основные виды диагностических сигналов;
- Закономерности влияния дефектов на функционирование оборудования и на свойства диагностических сигналов, позволяющие выбрать и оптимизировать комплексы диагностических признаков для различных дефектов;
- Теории сигналов и информации, позволяющие оптимизировать качество информации при ограниченном объеме измерений;

- Теория распознавания состояний, позволяющая с максимальной возможной достоверностью определять состояние оборудования и идентифицировать дефекты по результатам диагностических измерений;
- Основы компьютерной техники и операционных систем, позволяющие грамотно эксплуатировать современные технические средства диагностирования.

#### **1.4 Основные понятия о системах диагностирования электрооборудования**

Начальным этапом оценки технического состояния при формировании систем диагностирования является определение номенклатуры дефектов (составление словаря классов состояния оборудования), которые представляют наибольшую опасность для нормального функционирования оборудования и должны обнаруживаться в процессе диагностирования. Для этого необходимо обобщить и проанализировать опыт эксплуатации оборудования, результаты специальных исследований, разделить дефекты на диагностируемые и недиагностируемые, на явные и скрытые, проранжировать дефекты по вероятности их появления, степени опасности и скорости развития, по возможности классифицировать их по причинам возникновения. Далее проводится выбор диагностических сигналов, т.е. определяется природа явлений, сопутствующих дефектам (электромагнитные, тепловые, оптические), создаются новые или используются имеющиеся инструментальные средства измерения диагностических сигналов. После этого в результате целенаправленной специализированной обработки выделяют из диагностических сигналов диагностические параметры, например, размах колебаний, амплитуды и фазы составляющих частот и т.д. На основе диагностических параметров формируются диагностические признаки, т.е. устанавливается соответствие определенной области значения диагностического параметра определенному значению диагностического признака.

Наибольшее распространение получили признаки бинарного типа, принимающие только два значения: 1 (да – признак есть) или 0 (нет – признак

отсутствует). Такой подход подразумевает обязательное знание эталонного (порогового) значения (установки) диагностического параметра. Всякое превышение эталонного значения рассматривается как повышенное значение диагностического параметра, т.е. значение диагностического признака 1. Внешняя простота такого подхода скрывает существование трудности, связанные с выбором и обоснованием эталонного значения, обоснованием чувствительности диагностического признака и т.п. Кроме того, данный подход страдает «статичностью», т.е. не позволяет оценить степень развития или опасности дефекта.

Более информативными являются признаки, образованные по принципу отклонения. В этом случае в качестве диагностического признака выступает диагностический симптом, по величине которого можно установить пороговые значения отклонения, характеризующие степень развития дефекта, например, внезапный, быстро или медленно развивающийся. Для отражения степени развития (опасности) дефекта для признаков обоих типов можно вводить несколько эталонных значений: предельно допустимое, зона риска, зона отказа и т.п. Эталонные значения диагностических параметров (признаков) могут определяться различными способами.

Расчетный способ подразумевает наличие математической модели оборудования, которая представляет собой набор формул, по которым рассчитываются эталонные и пороговые значения всех выбранных диагностических параметров для конкретного режима работы оборудования с учетом конкретных внешних условий при появлении тех или иных дефектов. Экспериментальный способ заключается либо в анализе с помощью методов математической статистики результатов непосредственных измерений параметров состояний и диагностических параметров (признаков) в группе однотипных объектов, работающих в одинаковых режимах и условиях, либо в периодических измерениях каждого из этих параметров у одного объекта. При проведении экспериментальных исследований на испытательных стендах часто создают специальные режимы работы, ускоряющие процессы старения конструкционных материалов и развития дефектов. При экспертной оценке

эталонные значения выбираются на основании мнений нескольких экспертов – специалистов по диагностике электрооборудования.

На следующем этапе формирования системы диагностирования определяется совокупность максимально возможных параметров состояния оборудования и соответствующих диагностических параметров (признаков), которые могут быть измерены для оценки технического состояния оборудования. Избыточность параметров в этой совокупности на данном этапе необходима, чтобы в дальнейшем выработать из всех возможных параметров наиболее доступные для измерений, имеющие минимальные ошибки определения диагностических симптомов и позволяющие обнаруживать дефекты на стадии их зарождения. Эта задача решается на основе многочисленных исследований влияния тех или иных дефектов на различные параметры состояния и, как следствие, на диагностические параметры (характеристики) сигналов контролируемого оборудования. После этого наступает этап оптимизации совокупности измеряемых параметров состояния и диагностических параметров. Эта совокупность в идеале должна отразить развитие всех дефектов, определяющих ресурс работоспособности отдельных узлов или объекта в целом. Предпочтение отдается тем параметрам, которые в основном зависят от характера и степени развития дефектов, и слабо зависят от режимов и условий работы оборудования, наиболее доступны для измерений, имеют наименьшие ошибки определения диагностических симптомов и позволяют обнаруживать дефекты на стадии их зарождения. Выделяется группа диагностических параметров для систематического контроля, измерение которых проводится постоянно или с заданной периодичностью, и группа параметров для дополнительного контроля, которые используются для уточнения характера дефекта, степени опасности и стадии его развития, локализации дефекта и т.п. Желательно, чтобы параметры систематического контроля позволили определять состояние оборудования без вывода его из работы, проводить раннюю диагностику и охватили широкий спектр обнаруживаемых дефектов, а каждый параметр дополнительного измерения зависел бы только от одного вида дефекта. Большинство дополнительных параметров определяется на выведенном из работы оборудовании.

Результаты контроля включают в себя ошибки, определяемые рядом факторов: погрешности измерительных приборов, влияния внешних помех, влияние условий контроля, несовершенство методов измерений, квалификацию персонала. Поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата:

- работоспособное оборудование может быть признано негодным к дальнейшей эксплуатации – ложный дефект, или ошибка первого рода; такие ошибки увеличивают затраты на ремонтное оборудование;
- неработоспособное оборудование может быть признано годным к дальнейшей эксплуатации – необнаруженный дефект, или ошибка второго рода; такие ошибки приводят к аварийному повреждению оборудования и увеличению затрат на аварийно-восстановительный ремонт.

Графически формирование результата описанного контроля представлено на рисунке 1.2 [5].

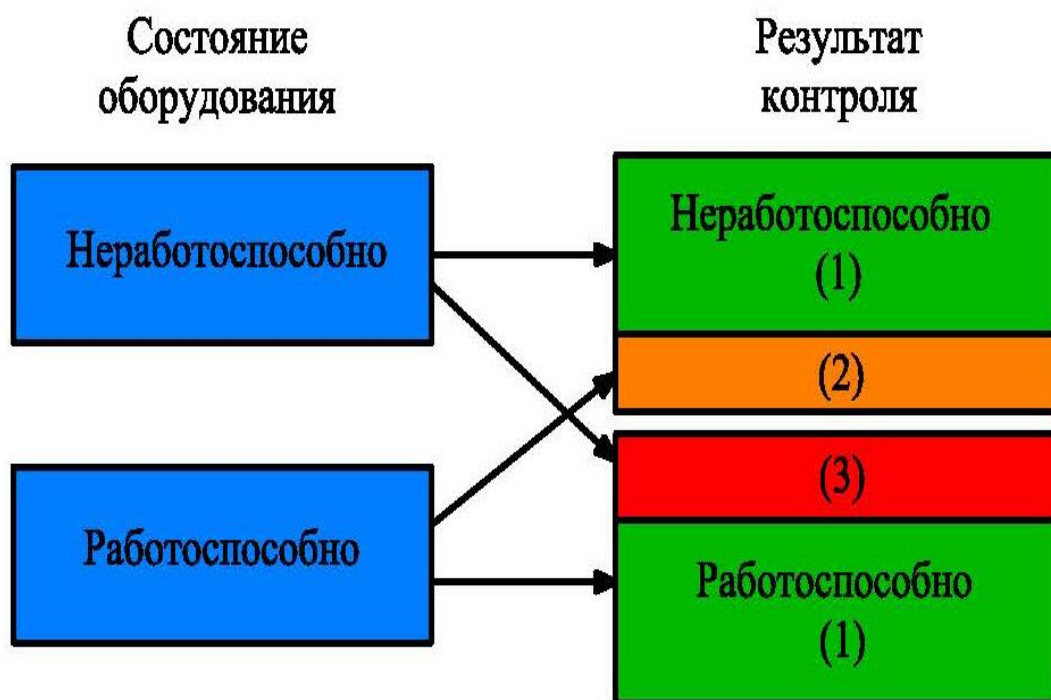


Рисунок 1.2 – Формирование результата контроля:

1 – достоверный результат; 2 – ошибка первого рода (ложный дефект);

3 – ошибка второго рода (необнаруженный дефект).

Причина появления таких ошибок проиллюстрирована на рисунке 1.3.

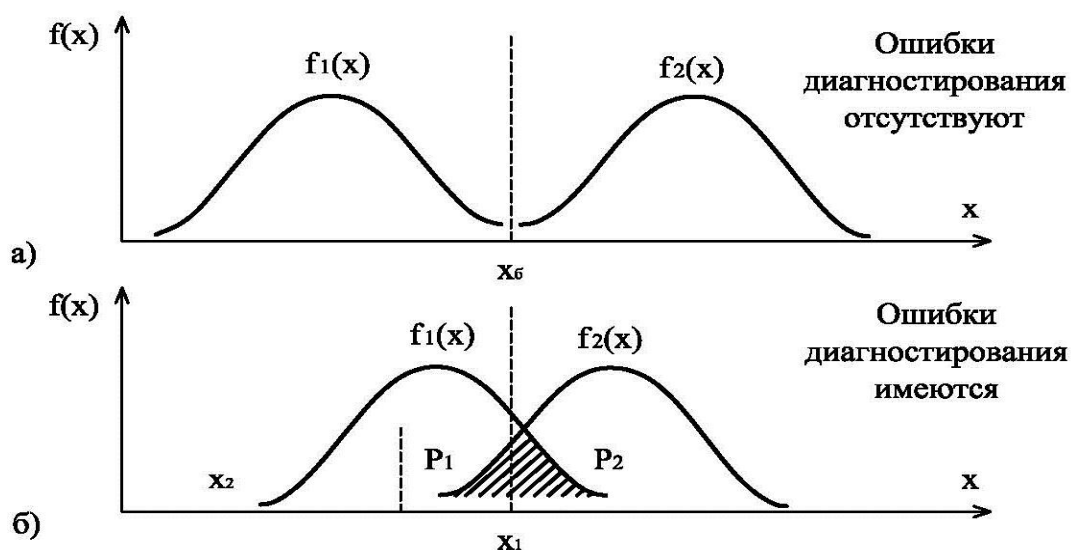


Рисунок 1.3 – Распределение плотности вероятности значений контролируемого параметра для двух совокупностей объектов одного вида: не имеющих дефектов  $f_1(x)$  и с дефектами  $f_2(x)$  – при различной достоверности диагностирования ( $x_0$  – браковочное значение параметра)

Снижение вероятности появления таких ошибок может быть достигнуто, если для обнаружения дефекта использовать несколько физически независимых методов. Это проще всего пояснить следующим примером. Дефект может быть обнаружен двумя методами, достоверность одного из которых равна  $P_1$ , а другого –  $P_2$ . Тогда при совпадении результатов, полученных тем и другим методом, общая достоверность контроля  $P$  будет равна

$$P = P_1 + P_2 - P_1P_2.$$

Например, при достоверности каждого метода, равной 0,7, при совпадении результатов контроля, выполненного тем и другим методом, общая достоверность контроля будет равна 0,91 ( $P = 0,7 + 0,7 - 0,7 \cdot 0,7 = 0,91$ ).

Следующим этапом разработки системы диагностирования является создание диагностической модели, т.е. совокупности диагностических параметров и правил и правил измерения, их эталонных и пороговых значений. Диагностическая модель включает также правила принятия решений в случаях,



когда одним и тем же дефектам соответствует группа различных признаков и параметров или, наоборот, когда один и тот же признак и параметр соответствует появлению разных дефектов в различных режимах работы диагностируемого оборудования.

Комбинированные системы диагностирования представляют собой сочетание функциональных и тестовых систем и позволяют наиболее точно оценить состояние оборудования. При этом методы функциональной диагностики чаще используются для систематического контроля, а тестовые как дополнительные. Именно такие системы позволяют дать долгосрочный прогноз состояния оборудования, что создает базу для перехода от регламентированного обслуживания и ремонта оборудования к обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию.

По режиму работы можно выделить системы непрерывного диагностирования (мониторинг), системы периодического диагностирования и разовые. При непрерывном диагностировании контроль диагностических параметров (признаков) ведется постоянно в процессе работы оборудования, поэтому такие системы могут быть только функциональными. В системах периодического диагностирования контроль параметров (признаков) при функциональном и тестовом диагностировании осуществляется через определенные промежутки времени, определяемые правилами системы диагностирования. Например, система диагностирования силового электрооборудования, закрепленная нормативными документами [26], может быть отнесена к системам периодического диагностирования. Разовые системы диагностирования применяются в специальных случаях для получения дополнительной информации, когда объем информации полученной с помощью непрерывного и периодического диагностирования, недостаточен для решения поставленных задач. Примером таких систем могут служить комплексные обследования, основной целью которых является оценка остаточного ресурса работоспособности электрооборудования. В этом случае результаты действующей для данного вида оборудования системы диагностирования дополняются результатами специальных методов и алгоритмов диагностирования, применение которых в повседневной практике

нерационально по целому ряду причин, например, очень высокой стоимости диагностической аппаратуры, необходимости привлечения специалистов-экспертов высшей квалификации и т.п.

В настоящее время системы диагностики и мониторинга технического состояния высоковольтного электрооборудования представляют собой экспертные автоматизированные системы в режиме «советчика». Они имеют два направления для решения следующих задач: определение технического состояния электрооборудования оборудования для выявления дефектов и неисправностей; выбор оптимальных управляющих воздействий на электрооборудования электросетевого комплекса для повышения надежности функционирования и продления эксплуатационного ресурса объекта [27].

В Российской электроэнергетике экспертные диагностические системы используются, в основном, для диагностики технического состояния отдельных видов электрооборудования, например, отдельно для трансформаторов или отдельно для выключателей и других коммутационных аппаратов.

Для последующего анализа данных, полученных в результате мониторинга технической диагностики применяются современные математические методы обработки информации на базе современных информационных технологий, а именно:

- методы распознавания и разделения в пространстве признаков;
- теории статических решений;
- методы, основанные на определении ценности признаков;
- методы, основанные на теории вероятности;
- метрические методы распознавания образов;
- статистические методы теории информации;
- методы искусственных нейронных сетей.

Выбор того или иного метода обработки информации зависит от поставленной задачи и однородности информации, а также от ее неопределенности и нечеткости.

В современных системах диагностики электрооборудования, используются простые модели на основе правил продукции (например, как в системе управления производственными активами ОАО «Холдинг МРСК»,

разработанной ООО «АМС» [28]), или более сложные на основе теоремы Байеса [29] (например, «Диагностика+»), или экспертная система диагностики маслонаполненного оборудования «ЭДИС Альбатрос» [30–32].

В настоящее время во многих странах мира происходит усиление конкурентной борьбы между предприятиями, производящими, передающими и распределяющими электроэнергию. Это, в свою очередь, привело к стремлению повысить рентабельность производства и снизить расходы на эксплуатацию парка оборудования. Для основного оборудования энергосистемы России прямым последствием этого явилось снижение капитальных вложений в обновление парка оборудования, стремление как можно дольше эксплуатировать уже работающее оборудование.

Как известно, эффективность электрического хозяйства неразрывно связана с эксплуатационным обслуживанием, текущим и капитальным ремонтом, а также утилизацией оборудования. При этом одним из главных путей поддержания эксплуатационной надежности является применение новой системы планово-предупредительного ремонта на основе новейшей технологии организации эффективного контроля текущего состояния работающего оборудования [33–34].

Диагностика электрооборудования подразумевает наличие диагностических признаков для оценки его состояния, а также методов диагностики, представляющих собой детерминированную и случайную диагностическую ценность [35]. Необходимо подчеркнуть, что признаки со случайной диагностической ценностью, определяемой отсутствием монотонности изменения значений при развитии контролируемого им процесса, не могут быть использованы для принятия им решений о состоянии трансформатора, а лишь в некоторых случаях могут свидетельствовать о необходимости более полного обследования. Диагностическим признакам, обладающим детерминированной ценностью свойственна монотонность изменения во времени при развитии процесса.

В процессе эксплуатации электрооборудование подвергается неблагоприятному воздействию многих факторов, таких как перенапряжения

(грозовые, коммутационные), неправильная эксплуатация (ошибки оперативного или ремонтного персонала), некачественный монтаж и т.д.

Современная система обслуживания и ремонта электрооборудования подразумевает проведение плановых работ без учета фактического состояния. Диагностирование электрооборудования также можно отнести к плановым работам [36].

Следует отметить, что в настоящее время в Российской электроэнергетике отсутствуют и не разработаны диагностические системы для криогенного высоковольтного электрооборудования, где в качестве диэлектрической среды используется жидкий азот, так называемые высокотемпературные сверхпроводниковые трансформаторы – ВТСП трансформаторы, накопители энергии и ограничители токов КЗ на такой же основе. В данной работе предполагается отчасти заполнить это пробел (см. главы 4 и 5).

## 1.5 Выводы

1. Показано, что система планово-предупредительных ремонтов электрооборудования предполагает проведение плановых работ по ремонту и обслуживанию без учета фактического состояния. Система имеет ряд недостатков, таких как:

- невозможность отслеживать состояние электрооборудования в режиме реального времени и, тем самым, сокращать последствия аварийных ситуаций;
- большая статья расходов системы технического обслуживания и ремонта энергопредприятий, что в конечном итоге сказывается на стоимости электроэнергии для потребителя;
- недостаточно эффективное использование ремонтных бригад в межремонтные периоды.

2. Основным фактором, определяющим эффективность системы планирования по техническому обслуживанию и ремонту оборудования, является наличие достоверной информации о техническом состоянии оборудования. В условиях недостатка такой информации, а также наличия ограничений со стороны внешних контролирующих и инспектирующих

организаций, отказ от системы ППР и переход на планирование ремонтов и технического обслуживания оборудования по техническому состоянию не представляется возможным. Рассматриваемый вариант организации системы планирования по техническому обслуживанию и ремонту оборудования позволяет решить определенную часть возникающих проблем. Так, его применение позволило в разы увеличить точность планирования и уменьшить число конфликтов, возникающих при обосновании ремонтного фонда предприятия.

3. Обоснована необходимость текущих ремонтов стареющего электрооборудования по фактическому состоянию, что является актуальным решением для поддержания его работоспособного состояния и эксплуатационной надежности.

## **2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТЕХНИКЕ**

### **2.1 Постановка задачи**

Первой публикацией по теории нечетких множеств принято считать работу Лотфи Заде, опубликованную в 1965 г [37]. Понятие нечеткого множества положило начало новому импульсу в области математических и прикладных исследований, в рамках которых за короткий срок были предложены нечеткие обобщения всех основных теоретико-множественных и формально-логических понятий. Наиболее значимыми в этой области следует считать публикации Л. Заде (L. Zadeh) [38], Д. Дюбуа (D. Dubois) и А. Прада (H. Prade) [39–40] по теории нечеткой меры, М.Сугено (M. Sugeno) по нечеткому выводу, Р. Ягера (R. R. Yager) [41–42] по нечеткой логике.

Введение и развитие нечеткой логики было обусловлено пониманием того, что реальные решения основаны на субъективных восприятиях, а не объективных фактах. Неопределенность присуща восприятию: вопрос о том, соответствует ли сущность конкретному типу, не является вопросом утверждения или отрицания, а скорее вопросом степени. Замечательная способность людей и других живых существ - интегрировать неопределенность в логические рассуждения, что позволяет эффективно принимать решения в сложном мире. Нечеткая логика - это подход к формализации этого способа рассуждения.

Однако, несмотря на большое количество теоретических работ, прикладное значение нечетких моделей долгое время ставилось под сомнение. Даже сегодня, когда имеется информация о многих десятках успешных применений нечетких моделей, некоторые ученые все еще скептически относятся к возможностям нечеткого моделирования. В этой главе приводится введение в нечеткую логику и ее основную теорию нечетких множеств.

### **2.2 Нечеткие системы**

Если искусственный интеллект будет перерабатывать только микроразнания, то область его применения будет весьма ограничена. Поэтому

подобно тому, как человек, имея левое и правое полушария, умело ими пользуется, искусственному интеллекту следует поручить анализ, упорядочение старых знаний, хранение в памяти, поиск и другую логическую работу, а генерацию идей, синтез, творчество и другую «правостороннюю» работу полностью доверить человеку. В этом состоит идея человеко-машинных систем, которые смогут продемонстрировать поразительные способности, компенсируя достоинства и недостатки как человека, так и искусственного интеллекта. В будущем исследования искусственного интеллекта, по-видимому, следует проводить в этом направлении, решая проблему того, как можно удачно реализовать сотрудничество человека и машины.

В человеческом мозге важнейшую роль играет часть, которая называется мозолистым телом: она соединяет левое и правое полушария. Но что будет связывать человека и искусственный интеллект, когда появятся человеко-машинные системы? Автор считает, что для полного взаимопонимания и человек, и искусственный интеллект должны иметь до некоторой степени общие язык, знания и метод мышления. Если что-то будет отсутствовать, то, какими бы превосходными ни были оставшиеся функции, реализация комплексной системы невозможна.

Язык – важнейшее средство общения, поэтому идеально было бы применение естественного языка и по возможности использование также изображений и других средств. Общность знаний – самое главное для взаимопонимания людей, но поскольку партнером в нашем случае является компьютер, такая общность необходима для возможности общения и исключения ошибочного понимания. По содержанию общими должны быть специальные знания и, в идеальном случае, здравый смысл. Наконец, если метод мышления будет хотя бы до некоторой степени аналогичен методу мышления человека, то даже при относительно несовершенной информации, выдаваемой партнерами, можно делать точные рассуждения и выводы. Человек мыслит качественно, нечетко, поэтому и от искусственного интеллекта по возможности требуются макромысли.

Человеко-машинная система будет полностью создана, когда человек и искусственный интеллект будут понимать возможности друг друга и одновременно четко осознавать свои цели в системе.

Научная методология требует логической строгости, но проблемы доказательства предпосылок и гипотез, входящих в методологию, не вызывают энтузиазма. Причины этого явления в науке и технике, по-видимому, заключаются в том, что предпосылки и гипотезы, так же как, впрочем, и аксиомы в математике, сами по себе нелогичны. Подобные проблемы решаются в настоящее время благодаря опыту и интуиции выдающихся специалистов. Однако в технических областях существует риск совершить серьезную ошибку, если тщательно не изучить предпосылки и гипотезы. Например, непредсказуемые аварии в системах обеспечения безопасности, неразумные выводы в информационных системах, разбалансированные системы автоматизации и многое другое возникает из-за того, что все предпосылки проектирования слишком расходятся с реальным положением дел.

Наука и техника полностью отвергают субъективизм, но, как сказано выше, новые открытия и изобретения рождаются в результате деятельности правого полушария человека, основанной на субъективных мыслях, а объективизация и логическое обоснование - всего лишь вторичные средства для передачи идей другому человеку. Более того, даже в процессе объективизации необычайно полезно проявление субъективизма. Например, с точки зрения обработки нечеткостей даже в теории вероятностей, которую часто противопоставляют теории нечетких систем, нельзя получить выдающиеся результаты, пока экспериментатор не исследует в полной мере исходные данные, не оценит общую структуру проблемы, не исключит сомнительные данные или не примет других субъективных решений. Не говоря уже о том, что установить гипотезы и предпосылки нельзя иначе, как полагаясь на субъективное мнение.

Вопрос о том, как обрабатывать нечеткости, перекликается с вопросом о том, каким образом ввести в науку и технику субъективизм человека. И здесь не обойтись без нечетких множеств. Это математический метод, созданный для того, чтобы представлять смысловые нечеткости слов человека, это



уникальный метод с точки зрения предоставления возможностей математически обрабатывать субъективные данные.

Возможность математически представлять и логически обрабатывать смысл слов означает, что появились новые средства, которые позволяют удовлетворить трем необходимым условиям реализации человеко-машинных систем, о которых шла речь выше. А именно: можно ожидать, что благодаря этим средствам искусственный интеллект сможет понимать нечеткости и глубинный смысл естественного языка и в будущем его общение с человеком станет более естественным. Кроме того, можно будет представить в виде нечетких тезисов даже такие крайне нечеткие макрознания, как здравый смысл, если сузить специальную область. Все это существенно повысит практическую ценность искусственного интеллекта. Последнее условие - представление нечетких мыслей - наиболее трудное для реализации. Мысли, возникающие в правом полушарии человека, нельзя назвать совсем нечеткими. Однако если прикладная область ограничена, они могут пригодиться как качественные логические отношения между макрознаниями, поэтому в какой-то степени возможны логические выводы, присущие человеку.

Выходные данные, получаемые нечеткими системами, разумеется, будут нечеткими. По-видимому, найдутся люди, которые окажутся в тупике из-за нечетких ответов системы, помогающей принятию решений; затруднения вызовут ответы о микрознаниях. Что же касается макрознаний, то они, по сути, являются нечеткими, проблемными, поэтому нечеткость ответов о таких знаниях естественна. Нечеткие ответы будут стимулировать работу правого полушария человека, что повысит эффективность человеко-машинной системы.

Приведем примеры человеко-машинных систем, которые предназначены для обработки нечетких знаний (своего рода реализация универсальных роботов в услужении человеку). В технических областях - автоматическое управление высокого уровня, автоматический перевод, интеллектуальные работы, системы поддержания целостности баз данных и системы обеспечения безопасности, распознавание изображений и речи, автоматическое проектирование, поиск информации, базы знаний, интеллектуальные терминалы, автоматизация домашних работ и др. В медицине - диагностика,

китайская медицина, искусственные встроенные органы, роботы для ухода за больными, диспансеризация и медицинское наблюдение после выздоровления, системы здравоохранения, протезы и др. В сфере бизнеса - помощь в принятии экономических решений, маркетинг, советы по вложению капитала, различного рода управление и планирование, управление системами, помощь в подготовке контрактов, автоматизация учреждений и др. Кроме того, оценка состояния окружающей среды, анализ риска, предсказание землетрясений, прогнозы погоды для сельского хозяйства, геологическая съемка, оценка качества сельскохозяйственных продуктов, системы самообучения, дегустация, обработка данных анализа и т.д.

В настоящее время наметилась тенденция применения теории нечетких множеств в гуманитарных науках и в социологии. В ближайшем будущем появятся модели деятельности человека, модели мышления, психологические модели, модели надежности, экономические модели, которые будут активно использоваться в обучении, законодательстве, опросе общественного мнения и других проблемах, анализе и оценке данных.

Теория нечетких множеств, возможно, сыграет большую роль при решении таких проблем, как представление и приобретение макрознаний, методы макромышления (макровыводов), форматы данных для стимулирования правого полушария, отождествление функций принадлежности, прогнозирование технических характеристик систем, систематические методы проектирования и т.п. Появление новой методологии, учитывающей нечеткости, заложит фундамент решения этих проблем [43].

### **2.3 Основы теории нечетких множеств**

Отличительной особенностью теории нечетких множеств является ее способность правильно обрабатывать неопределенность во время логических рассуждений. Вообще говоря, неопределенность может возникнуть из трех разных источников: неоднозначность, неопределенность или неведение.

Обозначение является неоднозначным, если он имеет более чем одно возможное значение. Наиболее очевидным примером неоднозначных обозначений являются слова. Например, слово «сеть» может иметь несколько

значений: группа компьютеров, соединенных вместе (компьютерная сеть), система взаимосвязанных железнодорожных путей (железнодорожная сеть) или группа людей, разделяющих общие интересы (социальная сеть). Неоднозначность обозначений накладывает серьезные ограничения на процесс логических рассуждений. По этой причине формальная логика использует слова истинной логики - недвусмысленные термины, такие как «или» и «не».

С другой стороны, обозначение является неопределенным, если оно не объясняется точно или безошибочно. Понятие неопределенности было ярко обсуждено в первые десятилетия 20-го века в попытке установить философскую основу математики. Философы Бертран Рассел и Макс Блэк были в числе основных участников этой дискуссии. Б. Рассел утверждает, что даже слова чистой логики являются точными только в том случае, если символы, используемые в предложениях, слова и восприятия, являются точными сами по себе. Следовательно, каждое утверждение, которое может быть сформулировано на практике, имеет определенную степень неопределенности. Он считал представление неопределенным, если основное отношение не было индивидуальным, а одно-ко-многим. С другой стороны, вводили теорию рыхлых понятий (неточно определенных сущностей) в отличие от резко ограниченных понятий, чтобы рассматривать неопределенность.

Наконец, незнание также может быть источником неопределенности. Вопреки неопределенности, неведение объясняет неполные, а не неточные знания. Типичными примерами неполных знаний являются случайные эксперименты: посредством долгосрочного наблюдения можно вывести ожидание будущих событий. Однако полная точность прогноза не может быть гарантирована. Частичное знание процесса традиционно рассматривалось теорией вероятности с большим успехом. Теорема Байеса также допускает распространение такого рода неопределенности по цепочке логических рассуждений.

С исторической точки зрения введение и развитие нечеткой логики можно описать в соответствии с четырехфазной эволюционной схемой Куна [44]. На первом этапе (в начале 20-го века) была рассмотрена необходимость альтернативной системы логики. Дискуссия была обусловлена пониманием

того, что многие утверждения не являются ни полностью верными, ни полностью ложными, а скорее расплывчатыми. Таким образом, такое утверждение не может быть обработано должным образом по формальной логике. Хотя были предложены альтернативные системы логики, в которых наилучшим примером является трехзначная логика Шукасевича, прорыв не был достигнут до введения в 1965 г. Заде в теорию нечеткого множества [37].

Вторая фаза характеризовалась широкой и резкой критикой недавно предложенной теории. Например, профессор Калман, изобретатель одноименного фильтра, заявивший в 1972 году: «Без сомнения, энтузиазм профессора Заде для нечеткости был усилен преобладающим климатом в США - одной из беспрецедентных вседозволенностей. Фаззификация - это своего рода научная вседозволенность. Она, как правило, приводит к социально привлекательным лозунгам, несопровожаемым дисциплиной тяжелой научной работы и терпеливыми наблюдениями» [45].

В последующие годы успешное применение нечеткой логики в многочисленных технических проблемах изменило ситуацию в пользу новой теории. В таблице 2.1 приведен обзор ранних применений нечеткой логики. В [46] Мамдани предложил первый контроллер на основе нечеткой логики. Несколько лет спустя первая крупномасштабная практическая реализация нечеткого контроллера последовала за [47]. Одним из самых впечатляющих применений был контроль подземной железной дороги Сендай в Японии [48]. В общем, японские инженеры и исследователи внесли наибольший вклад в запуск нечетких контроллеров для инженерного применения.

Успех демонстрационных проектов и, как следствие, признание значимости и актуальности нечеткой логики вдохновили больше исследователей на участие в этой области. Это приводит к разработке новых захватывающих теорий и концепций. В области теории нечетких множеств предложено несколько расширений стандартных нечетких множеств, наиболее важными из которых являются интервальнозначные нечеткие множества [49–50], нечеткие множества второго типа или более высокие типы, L-нечеткие множества [51], интуиционистские нечеткие множества [52] и грубые нечеткие множества [40]. Еще одним крупным достижением стало упрощение исходных,

основанных на правилах, систем с нечеткими выводами Такаги и Сугено. Полученные в результате Такаги - Сугено нечеткие системы могут быть легко обучены, чтобы соответствовать данным учебного набора данных и, таким образом, подходят для моделирования нелинейных систем.

Таблица 2.1 – Основные этапы исторического развития в направлении нечеткой логики

Год	Основные события
4-й век	Первая документация системного подхода к логике (формальная логика) Аристотель: Органон
19-й век	Создание символической формальной логики: введение соответствующей математики для представления формальной логики Джордж Буль: законы мышления (1854) Август де Морган: формальная логика (1847)
начало 20-ого века	Попытки философской основы математики приводят к обсуждению понятия неопределенности Бертран Рассел: неопределенность (1923)
1920-1929	Введение трехзначной логики Яна Гукаевича
1965	Введение нечетких множеств Лотфи Заде
ранние 1970-ые	Теория нечетких множеств более высокого уровня
1974	Нечеткие алгоритмы управления паровой установкой
1978	Первое техническое применение нечеткого контроллера (цементной печи)
1983	Применение нечеткого контроля на водоочистной станции, Япония
1987	Нечетко контролируемая Сендайская железная дорога, Япония
1988	Лаборатория международной нечеткой инженерии, Япония
1991	Формирование Berkeley Initiative в Soft Computing, США

С конца 1990-х годов нечеткая логика достигла четвертой фазы эволюции: в области она рассматривается как современная технология, особенно важная в вопросах автоматизации и контроля. Среди исследователей и ученых нечеткая логика нашла свое место, и каждый год издавались многочисленные журналы и организовывались конференции. Никакая современная учебная программа по автоматизации не проходит, по крайней мере, без курса по нечеткой логике.

Вообще говоря, опубликованные исследовательские работы по нечеткой логике могут быть сгруппированы в две категории [53]: в узком смысле нечеткая логика - это область исследований, посвященная формальному развитию различных логических систем многозначной логики в унифицированном виде. В этом смысле она также называется математической или формальной нечеткой логикой. С другой стороны, нечеткая логика в широком смысле охватывает обширную область, как теоретическую, так и практическую. Его основная цель - использовать теорию нечетких множеств для разработки концепций и методов представления и обработки знаний. Очевидно, что для технических целей нечеткая логика рассматривается в широком смысле. Поэтому следующие разделы посвящены математическому описанию нечетких множеств.

## **2.4 Математическое представление нечетких множеств**

В своей оригинальной статье, опубликованной в 1965 году, Лофти Заде не использовал термин «нечеткая логика». Он предпочитал формулировки нечетких множеств [37]. При этом он указал на ключевую роль теории множеств в логике, как формальной, так и нечеткой. Множества являются одним из самых фундаментальных и важных понятий в математике. Георг Кантор (1845–1918), основатель теории множеств, определил множество как «совокупность различных объектов нашего восприятия или мысли в целом». Соответственно, множество состоит из объектов (называемых элементами), но само по себе является объектом в своем собственном праве.

В общем случае множество может быть описано двумя способами: либо по расширению, то есть путем перечисления всех его элементов, либо путем



операциями: отрицание, конъюнкция, дизъюнкция, эквивалентность и импликация. По причинам абстракции каждая из этих операций определяется символом.

В таблице 2.2 показан результат логических операций с двумя переменными  $p$  и  $q$  в табличной форме (такое представление обычно называется таблицей истинности).

Безусловно, самая важная логическая операция - это импликация, которая используется для вывода одной логической переменной из другой.

Таблица 2.2 – Таблица истинности логических операций над двумя утверждениями  $p$  и  $q$

$p$	$q$	$\sim p$	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \rightarrow q$	$p \leftrightarrow q$
T	T	F	T	T	T	T
T	F	F	F	T	F	F
F	T	T	F	T	T	F
F	F	T	F	F	T	T

$T$  и  $F$  означают истинные и ложные утверждения, соответственно

Подобно введенному выше категориальному силлогизму, логическая переменная, соответствующая существующему утверждению, называется антецедентом или предпосылкой, а выведенная называется следствием или заключением. Дедуктивное рассуждение предполагает, что - если бы импликация была действительной - вывод не может быть ложным, в то время как антецедент является истинным. В терминах формальной логики операцию импликации  $p \rightarrow q$  можно переписать как  $\sim(p \wedge \sim q)$ . Это альтернативное представление важно для математического описания логических правил.

**Определение 2.1.** *Импликация: логическая импликация  $p \rightarrow q$  является отношением между двумя логическими переменными  $p$  и  $q$ , которые могут быть выражены в виде правила «если  $p$  тогда  $q$ ».*



Эквивалент категориальных силлогизмов в формальной логике обозначается как *modus ponens*. *Modus ponendo ponens* или *modus ponens* - дедуктивный подход к рассуждениям, когда заключение достигается путем утверждения, то есть на основе положительного антецедента. В целом это подразумевает (основное предположение) и положительную предысторию (второстепенное предположение) для оценки достоверности вывода, как показано ниже:

$$\begin{array}{l} \text{Импликация: } p \rightarrow q \\ \text{Антецедент: } p \\ \hline \text{Вывод: } q \end{array}$$

В терминах формальной логики *modus ponens* выражается как  $(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$ .

В этот момент мы еще раз подчеркнем сильную связь между логикой и теорией множеств. Действительно, если мы заменим логические переменные  $p$  и  $q$  выражениями, такими как  $x \in X$  и  $y \in Y$ , мы можем переопределить *modus ponens* в теоретическом наборе. Для этой цели пять основных логических операций (отрицание, конъюнкция, дизъюнкция, эквивалентность и импликация) также должны быть заменены соответствующей теоретико-множественной теорией, как показано в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основное соотношение между логикой и множеством теоретических операций

Логические операции		Операции теории множеств	
~	отрицание	¬	отрицание
∧	конъюнкция	∩	пересечение
∨	дизъюнкция	∪	объединение
→	импликация	R	отношение
↔	эквивалентность	=	равенство

## 2.6 Нечеткие правила

Традиционная логика требует, чтобы каждое утверждение было либо истинным, либо ложным, но не одновременно. Вопреки этому предположению, большинство утверждений, которые могут быть сформулированы на практике, имеют определенную степень неопределенности. Рассмотрим, например, утверждение «Джеймс - высокий студент». Его нельзя утверждать или опровергать с уверенностью, но это скорее вопрос степени: насколько высок Джеймс? Если утверждения нарушают фундаментальное требование быть либо истинным, либо ложным, как мы можем исправить их логически, чтобы иметь возможность вывести соответствующие выводы? Очевидно, что введенные выше понятия категориального силлогизма и *modus ponens* больше не применимы.

Нечеткая логика - это подход, обеспечивающий формальный способ рассуждения, чтобы учесть неопределенность в утверждениях. Нечеткая логика признает тот факт, что, хотя рассуждение основано на точных логических правилах, эти утверждения связаны с восприятием, которое по умолчанию носит неопределенный характер. Таким образом, вышеупомянутый *modus ponens* должен быть расширен таким образом, чтобы фиксировать неопределенность, результатом которого является обобщенный *modus ponens*:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Импликация:} & p \rightarrow q \\
 \text{Антецедент:} & p' \text{ (аналогично } p \text{)} \\
 \hline
 \text{Вывод:} & q' \text{ (аналогично } q \text{)}
 \end{array}$$

В терминах формальной логики обобщенный *modus ponens* выражается как  $(p' \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q'$ . Мы можем переписать это выражение, приняв теоретико-множественный подход. В частности, если заменить логические переменные  $p$  и  $p'$  нечеткими множествами  $A$  и  $A'$ , состоящих из элементов  $x$  универсального множества  $X$ , и логическими переменными  $q$  и  $q'$  с помощью нечетких множеств  $B$  и  $B'$ , состоящих из элементов  $y$  универсального множества  $Y$  получаем

$$(p' \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q' \quad \Rightarrow \quad B' = A' \circ R_{A \rightarrow B} \quad (2.2)$$

Обратите внимание, что операция логической конъюнкции должна быть смоделирована как реляционная композиция, а не как объединение нечетких множеств (таблица 2.3), так как нечеткое множество  $A'$  определено в пространстве  $X$ , тогда как отношение  $R_{A \rightarrow B}$  (представляющее импликацию) определяется в пространстве произведения  $X \times Y$ . Степень принадлежности заключения  $\mu_{B'}(y), y \in Y$  эквивалентна значению истинности логической переменной  $q'$  при заданной переменной  $p'$ . Его можно определить из уравнения 2.2 путем применения нечеткой композиции

$$\mu_{B'}(y) = \perp_{x \in X} [\top\{\mu_{A'}(x), \mu_{A \rightarrow B}(x, y)\}] \quad x \in X, y \in Y \quad (2.3)$$

Вообще говоря, функция принадлежности  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  представляет собой операцию импликации. Она математически описывается оператором импликации  $I$ , который будет определен в ближайшее время. Поэтому, заменяя  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$  на  $I(\mu_A(x), \mu_B(y))$  и используя ассоциативное свойство  $T$ -норм и  $T$ -конорм, получаем

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \perp_{x \in X} [\top\{\mu_{A'}(x), I(\mu_A(x), \mu_b(y))\}] = \\ &= I\left(\perp_{x \in X} [\top\{\mu_{A'}(x), \mu_A(x)\}], \mu_b(y)\right) = I(\alpha, \mu_b(y)) \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $\alpha = \perp_{x \in X} [\top\{\mu_{A'}(x), \mu_A(x)\}]$ .

Переменная  $\alpha$  является, таким образом, мерой сходства между нечеткими множествами  $A$  и  $A'$  для логических переменных  $p$  и  $p'$  соответственно. Очевидно, что для оценки степени принадлежности к заключению  $\mu_{B'}(y)$  необходимо математическое выражение оператора импликации. В разделе 2.5 мы уже постулировали  $p \rightarrow q \leftrightarrow \sim(p \wedge \sim q)$ . Переписанный в теоретико-множественных терминах, он обеспечивает возможную реализацию нечеткой импликации

$$I(\mu_A(x), \mu_b(y)) = \neg\top\{\mu_A(x), \neg\mu_b(y)\} \quad x \in X, y \in Y \quad (2.5)$$

Если мы реализуем стандартные операторы в уравнении выше, получим:

$$I(\mu_A(x), \mu_B(y)) = 1 - \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)) \quad x \in X, y \in Y \quad (2.6)$$

На самом деле выражение в уравнении 2.6 является лишь одним из многих возможных операторов нечеткой импликации. Общее определение операторов импликации приведено ниже.

**Определение 2.2.** *Нечеткая импликация: оператор  $I: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  является нечеткой импликацией тогда и только тогда, когда он обладает следующие свойства  $\forall x, y, z \in [0,1]$ :*

- 1: если  $x \leq z$  тогда  $I(x, y) \geq I(z, y)$  (левая антитоничность)
- 2: если  $y \leq z$  тогда  $I(x, y) \leq I(x, z)$  (правая антитоничность)
- 3:  $I(0,0) = 1$
- 4:  $I(1,1) = 1$
- 5:  $I(1,0) = 0$

Очевидно, что из первых двух свойств следует, что оператор нечеткой импликации не является ассоциативным. Другими словами, истинное значение как антецедента, так и заключения независимо влияет на общую ценность истины самого утверждения. Левая антитоничность функции  $I$  отражает идею о том, что уменьшение истинного значения антецедента увеличивает его эффективность, чтобы больше узнать о значении истины его следствия.

Список общих операторов нечеткой импликации, а также обсуждение их свойств можно найти в [54]. Что касается применения нечетких рассуждений к инженерным проблемам, то определение 2.2 создает две разительные трудности [55]:

- Большая поддержка функции принадлежности вывода: применение оператора импликации в соответствии с определением 2.2 в уравнении 2.4 приводит к значениям функции принадлежности  $\mu_{B'}(x) > 0$ , если и  $\mu_A(x') = 1$  и  $\mu_B(y) = 0$  одновременно. Так как в большинстве случаев  $\mu_A(x') < 1$ , носитель функции принадлежности вывода распространяется на все  $y$  универсального множества  $Y$ . Это, в свою очередь, увеличивает энтропию нечеткого множества  $B'$ , представляя вывод, так что его значимость уменьшается;

- Отсутствие причинности. Второе свойство, постулированное в определении 2.2 (левая антитоничность), подразумевает, что справедливость импликации выше для более низких истинностных значений антецедента. С технической точки зрения это наиболее тревожно, так как причина (системный ввод, то есть антецедент правила) должна приводить к эффекту (вывод системы, то есть заключение), а причина не должна приводить к чему-либо.

По этим причинам системы нечеткого вывода, предназначенные для облегчения причинности, не используют операторы импликации в соответствии с определением 2.2. Вместо этого они применяют Т-нормы к нечеткой импликации, причем наиболее популярным является стандартный минимальный оператор и оператор алгебраического произведения

$$I(x, y) = \min(x, y) \quad x, y \in [0, 1] \quad (2.7)$$

$$I(x, y) = x \cdot y \quad x, y \in [0, 1] \quad (2.8)$$

Разумеется, ни минимальный, ни логический вывод не согласуются с логическим определением логики высказываний (таблица 2.2). Их следует рассматривать скорее как технические последствия [62], так как они сохраняют причины и следствия (правило справедливо только тогда, когда и антецедент, и заключение истинны).

Следующий графический пример иллюстрирует процесс нечеткого рассуждения в случае использования стандартных (максимальных и минимальных) операторов.

**Пример 2.2.** Рассмотрим следующее нечеткое правило, где  $A$  и  $A'$  - подобные нечеткие множества, определенные в  $X$ , а  $B$  и  $B'$  - подобные нечеткие множества, определенные в  $Y$ . Нечеткие множества  $A$ ,  $A'$  и  $B$  описываются треугольными функциями принадлежности  $\mu_A(x)$ ,  $\mu_{A'}(x)$  и  $\mu_B(y)$ , как показано на рисунке 2.1.

Импликация:      если  $(x, \mu_A(x)) \in A$  тогда  $(y, \mu_B(y)) \in B$

Антецедент:       $(x, \mu_{A'}(x)) \in A'$  (аналогично  $A$ )

---

Вывод:  $(y, \mu_{B'}(y)) \in B'$  (аналогично  $B$ )

Функция принадлежности вывода  $\mu_{B'}(y)$  оценивается согласно уравнениям 2.4 и 2.7

$$\mu_{B'}(y) = I(\alpha, \mu_B(y)) = \min\{\alpha, \mu_B(y)\} = \min\left\{\bigwedge_{x \in X} [\uparrow\{\mu_{A'}(x), \mu_A(x)\}], \mu_B(y)\right\}$$

Если мы применим, стандартные операторы к нечеткой композиции, получим следующее выражение

$$\mu_{B'}(y) = \min\left\{\max_{x \in X} [\min\{\mu_{A'}(x), \mu_A(x)\}], \mu_B(y)\right\}$$

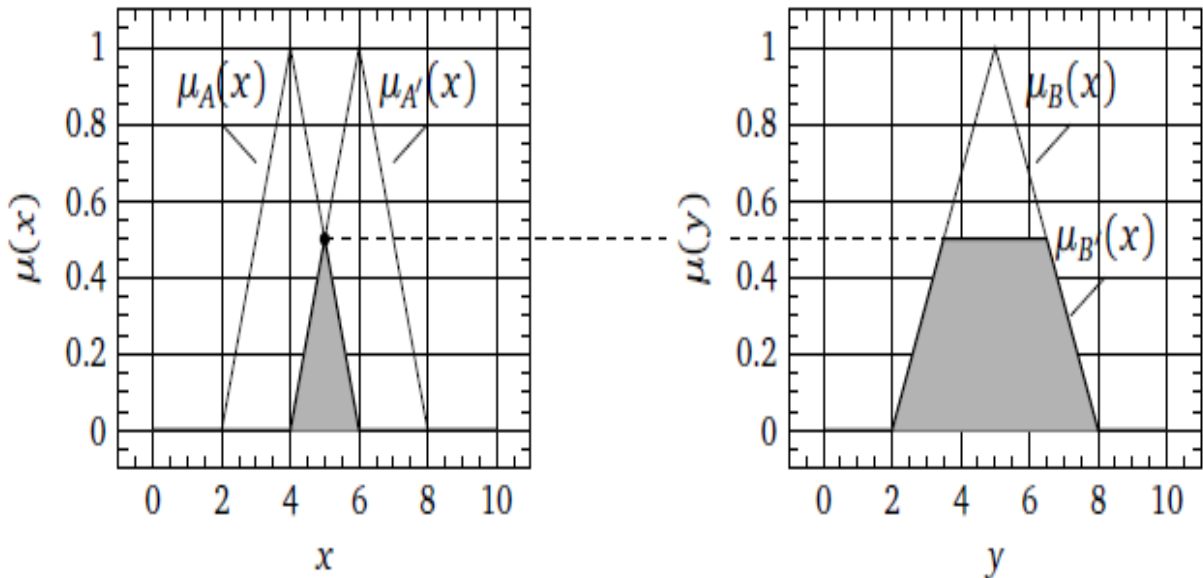


Рисунок 2.1 – Нечеткая импликация минимального типа для примера 2.2

На рисунке 2.1 графически показано приведенное выражение. Заштрихованная поверхность на левом участке является результатом минимума  $\{\mu_{A'}(x), \mu_A(x)\}$ ; его максимум  $\alpha = 0.5$  появляется при  $x = 5$ . Таким образом, функция принадлежности  $\mu_{B'}(y)$  в выводе этого правила ограничена этим значением в соответствии с методом минимальной импликации (заштрихованное пространство на правом графике).

До сих пор мы рассматривали последствия, связанные только с одним утверждением в антецеденте и с одним из утверждений в заключении. Однако можно комбинировать несколько утверждений посредством логического объединения или дизъюнкции (в терминах теории множеств эта комбинация основана на множестве пересечений и объединении соответственно).

## 2.7 Системы нечеткого логического вывода

Система нечеткого вывода (СНВ) - это вычислительная среда, основанная на концепциях теории нечетких множеств и нечетких рассуждений. В общем случае она обеспечивает нелинейное отображение некоторых входных переменных в некоторые выходные переменные. Основным преимуществом включения нечетких рассуждений является то, что правила вывода могут быть определены точным и последовательным образом, в то время как неопределенность, возникающая из входной информации, рассматривается путем определения одного или нескольких нечетких множеств для каждого входа. Основная структура СНВ состоит из трех концептуальных компонентов: набора правил вывода, называемых базой правил, словаря, который определяет нечеткие множества, используемые для моделирования предложений в антецедентах и выводов правил, и механизм рассуждений, который выполняет процедуру вывода по правилам и дает входную информацию для получения разумного результата [56].

Процесс вывода в рамках СНВ можно разделить на следующие этапы.

**Фаззификация.** Каждый вход СНВ моделируется как лингвистическая переменная. Короче говоря, лингвистическая переменная  $u_i$  берет свои значения из собственного набора лингвистических значений

$U_i = \{U_{i,1}, U_{i,2}, \dots, U_{i,n_i}\}$ , каждый из которых описывается нечетким множеством

$U_{i,j} = \{(x_i, \mu_{U_{i,j}}(x_i)) | x_i \in X_i\}$ , определенным в области четкого ввода  $x_i$ .

Поэтому первым шагом в процессе вывода является оценка степени принадлежности каждой четкой входной переменной  $x_i$  ко всем соответствующим нечетким множествам  $U_{i,j}$ . Результатом является указание

на сходство каждой лингвистической переменной с соответствующими лингвистическими значениями.

**Агрегирование.** Обычно СНВ будет иметь несколько входных данных. В этом случае правило нечеткого вывода будет включать в себя несколько лингвистических переменных в его антецеденте. Чтобы оценить сходство данных с антецедентом, необходимо объединить степени принадлежности в нечеткие множества. Для этой цели используются операции нечеткого пересечения, нечеткого объединения и нечеткого отрицания - по аналогии с формальной логикой, где оператор конъюнкции, дизъюнкции и отрицания используется для объединения предложений. Таким образом, результат агрегации можно рассматривать как степень выполнения конкретного правила, поскольку он описывает степень, в которой антецедент выполняется.

**Дефаззификация.** В конце четвертого шага каждая выходная переменная СНВ описывается накопленным нечетким множеством. Однако конечный вывод СНВ должен быть численным значением. По этой причине накопленные нечеткие множества должны быть преобразованы путем применения соответствующих операторов дефаззификации.

Чтобы лучше понять процесс вывода в рамках СНВ, в этот момент должен быть приведен простой пример. Он содержит только две входные переменные, одну выходную переменную и небольшую базу правил, состоящую из трех правил.

**Пример 2.3.** Тренер баскетбольной команды колледжа ищет талантливое нападающего. Он оценивает потенциал студентов в соответствии со следующими правилами:

1. Если студент  $x$  высокий и студент  $x$  быстрый, тогда его потенциал высокий;
2. Если студент  $x$  высокий и студент  $x$  медленный, тогда его потенциал средний;
3. Если студент  $x$  низкий, тогда его потенциал низкий.

Степень принадлежности конкретного студента в нечетких множествах высокий ( $U_{1,1}$ ) и низкий ( $A_{1,2}$ ) определяется его высотой ( $x_1$ ). С другой



стороны, его принадлежность в нечетких множествах быстрый ( $U_{2,1}$ ) и медленный ( $U_{2,2}$ ) оценивается по его производительности в беге на 60 метров ( $x_2$ ). Соответствующие функции принадлежности, а также процесс вывода показаны на рисунке 2.2 для примера конкретного ученика ( $x_1 = 195$  см,  $x_2 = 7,3$  с). Заштрихованные графики справа являются результатом импликации каждого правила, которые затем накапливаются, чтобы получить комбинированное нечеткое множество выходных данных.

Как видно из примера 2.3, общая схема правил может быть совершенно иной: некоторые из правил могут включать в себя все лингвистические переменные, в то время как другие включают только подмножество возможных комбинаций. Кроме того, способ, в котором различные лингвистические переменные агрегируются в антецеденте правила, может быть различным: некоторые правила могут использовать и-связки (представленные объединением нечеткого множества, т.е.  $T$  – нормы), тогда как другие могут быть определены на основе или-связок ( $T$  – конормы).

Тем не менее, большинство СНВ имеют базы правил, состоящие из полных правил, и используют  $T$  – нормы для агрегирования антецедентов (и – связок). В этом случае накопленное нечеткое множество для выходной переменной  $y_k$

$$\mu_{res}(y_k) = \perp_{ac} \left\{ \uparrow_i \left[ \mu_r(y_k), \uparrow_{ag} \left\{ \mu_{U_{1,j}}(x_1), \mu_{U_{2,j}}(x_2), \dots, \mu_{U_{n,j}}(x_n) \right\} \right] \right\} \quad (2.9)$$

где  $\perp_{ac}$  -  $T$  – коннорма для накопления всех  $r = 1, \dots, l$  правил,  $\uparrow_i$  является  $T$  – нормой, используемой для определения результата импликации, и  $\uparrow_{ag}$  является  $T$ -нормой для агрегирования нечетких множеств, участвующих в антецеденте каждого правила.

Важной особенностью СНВ является их интерпретируемость: концепция лингвистических переменных наряду с описанием базы нечетких правил в естественном языке позволяет легко интерпретировать СНВ. Тем не менее, при определении словаря СНВ следует проявлять особую осторожность, если он остается прозрачным. Прозрачность системы - это свойство, которое позволяет нам понять влияние каждого параметра системы на ее выход [57–58]. Чтобы

СНВ была прозрачной, для всех лингвистических переменных  $x_i, i=1, \dots, n$ , должно выполняться следующее требование:

$$\sum_{j=1}^{n_i} \mu_{U_{i,j}}(x_i) \quad \forall x_i \in X_i \quad (2.10)$$

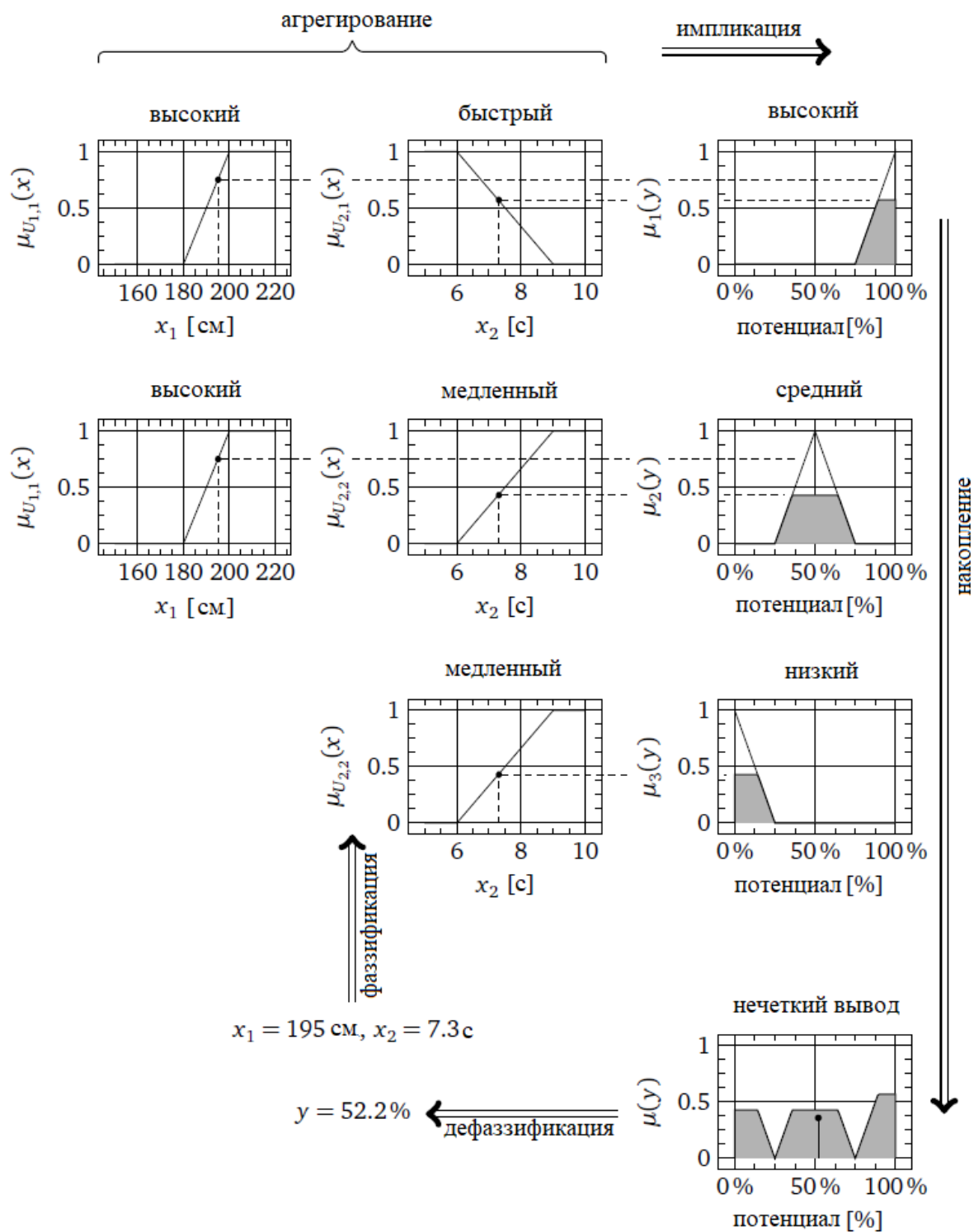


Рисунок 2.2 – Обзор процесса вывода для примера 2.3

## 2.8 Выводы

1. Показано, что теория нечетких множеств представляет собой новое перспективное научное направление, позволяющее с помощью лингвистической переменной и функций принадлежности формализовать знания и модели, выраженные в вербальной (словесной) форме.

2. Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики является важным инструментом для согласования естественного языка лица, принимающего решения, и формализованного языка компьютера в человеко-машинных системах, при этом удастся получить более оптимальное решение, основываясь на нечетком логическом выводе.

3. Теория нечетких множеств и нечеткая логика позволяют решать сложные технические задачи диагностики и управления на основе правил продукции. Так, например, нечеткие отношения позволяют установить некоторые приближенные лингвистические соотношения между входом и выходом или причинами и следствиями на основе экспертных оценок.

### **3 НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

#### **3.1 Постановка задачи**

Современные диагностические системы, необходимые для анализа признаков неисправностей электросетевого оборудования должны опираться на текущую или экспертную информацию о месторасположении и причинах неисправностей при проведении мониторинга текущего технического состояния и контроля пределов отклонения тех или иных технических характеристик. В последнее время разработаны новые различные эффективные подходы, основанные на методах искусственного интеллекта, а именно: экспертных системах, нечеткой логики, распознавания образов с помощью искусственных нейронных сетях и нечетких отношениях. Областью применения диагностических систем являются контроль за работой электроустановок электросетевого комплекса, мониторинг трендов, контроль инструментария в комплексно-автоматизированном производстве и контроль качества электроэнергии.

Контроль качества промышленной продукции, мониторинг состояния машин, контроль функционирования и, в случае обнаружения неисправности, быстрое получение точной информации об ее местонахождении, типе и причине возникновения приобретают все большую важность для экономичного функционирования промышленных предприятия. Эксплуатационный и диспетчерский персонал постоянно сталкивается с этими задачами. За последние годы было разработано множество разнообразных методов и систем диагностики, а эффективность отдельных решений продемонстрирована во многих прикладных задачах. Поскольку системы диагностики отказов основаны как на измеряемых симптомах или признаках, т.е. числовых значениях, описывающих свойства объекта или характеристики определенного сигнала, так и на надежных алгоритмах принятия решений, выбор наиболее действенной стратегии для конкретного приложения – нетривиальная задача.

В основе всех перечисленных алгоритмов принятия решений лежит так называемая «гипотеза компактности» [59]. Исходя из допущения, что сходство технических объектов из некоторого заданного класса передается его симптомам, векторы образов отказов образуют компактные кластеры в многомерном пространстве возможных образов отказов. Таким образом, наиболее важным шагом при любом методе технической диагностики отказов является построение математической модели, представляющей адекватную, актуальную информацию о функционировании системы. Диагностирование неисправностей системы при помощи детерминистических методов распознавания эффективно при наличии математической модели процесса. Математическая модель в этом случае может быть записана как система дифференциальных уравнений высокого порядка, которые иногда достаточно сложно записать и необходимо решать при диагностике и обнаружении неисправностей в реальном времени. Кроме того, следует провести поиск подходящих признаков, адекватно описывающих данную ситуацию. После оптимизации признаков необходимо выбрать наиболее адекватный алгоритм принятия решений о текущем техническом состоянии эксплуатируемого объекта.

Выбор наиболее подходящей стратегии диагностического обследования определяется теми или иными признаками процесса, которые необходимо контролировать, и знаниями о предыстории процесса. Наиболее эффективным решением для диагностики отказов и оценки текущего технического состояния можно считать методы искусственного интеллекта, перечисленные выше. С учетом того, что почти все технологические процессы имеют нелинейный характер изменения поведения и, кроме того, для них возможно возникновение непредвиденных аварийных ситуаций, для принятия решений необходимо также привлекать квалифицированных экспертов. Если детерминистические знания недостаточны или математическое моделирование требует значительных затрат, либо не имеет достаточной точности, то целесообразно использовать методы, основанные на моделировании знаний оператора. Это можно сделать при помощи стратегий логического вывода, например, экспертных систем, нечетких

систем логического вывода или искусственных нейронных сетей. Можно утверждать, что решения, полученные с помощью нечеткой логики, позволяют представлять знания экспертов в виде лингвистических переменных и операций над ними. Это позволяет сделать умозаключение о техническом состоянии объекта на основании нечетких, неточных и неполных знаниях. Справедливо такое утверждение и для экспертных систем, искусственных нейронных сетей и алгоритмов распознавания образов на их основе.

### **3.2 Нечеткая логика: новая концепция для технической диагностики неисправностей электрооборудования**

**Нечеткие диагностирующие системы.** Ниже показано, что на основе нечеткой логики и экспертных оценок можно построить современные нечеткие диагностирующие системы. Нередко приемлемыми усилиями не удается построить математическое описание исследуемой системы, поэтому были разработаны альтернативные методы, основанные на эвристических знаниях. Эти методы заключаются в сборе всей доступной информации об исследуемом процессе путем наблюдения за его ходом. Обычно эту работу выполняет опытный оператор, который выдает качественное описание процесса в нормальных и аварийных условиях его работы. Знания оператора могут быть формализованы средствами языка представлений. Таким путем знания о нормальном и аварийном функционировании процесса и информация о его прошлом могут быть использованы для обнаружения неисправностей. Знания о процессе, существующие в виде наблюдений и словесных описаний в разговорном употреблении, в результате применения методов нечеткой логики могут использоваться при классификации процессов. С этой целью лингвистические переменные взвешиваются с весовыми коэффициентами для значений, лежащих между "ИСТИНА" и "ЛОЖЬ" соответственно. Это достигается путем введения понятия "функция принадлежности", с которым связано несколько определений. Функции принадлежности должны наилучшим образом описывать состояние

диагностируемой системы. Простейшим примером является функция треугольной формы, используемая для настройки клапана (рисунок 3.1).

Качественные соображения оператора находятся в соответствии с его субъективным восприятием. Используя функции принадлежности и экспертные знания, можно определить правила для настройки клапанов. Ниже даются примеры таких правил:

1) ЕСЛИ температура ЕСТЬ низкая И изменение температуры ЕСТЬ положительное среднее, ТОГДА УСТАНОВИТЬ клапан В ПОЛОЖЕНИЕ почти открыт;

2) ЕСЛИ температура ЕСТЬ низкая И изменение температуры ЕСТЬ положительное малое, ТОГДА УСТАНОВИТЬ клапан В ПОЛОЖЕНИЕ полностью открыт;

3) ЕСЛИ температура ЕСТЬ средняя И изменение температуры ЕСТЬ положительное малое, ТОГДА УСТАНОВИТЬ клапан В ПОЛОЖЕНИЕ почти открыт;

4) ЕСЛИ температура ЕСТЬ средняя ИЛИ изменение температуры ЕСТЬ положительное малое, ТОГДА УСТАНОВИТЬ клапан В ПОЛОЖЕНИЕ полностью открыт.

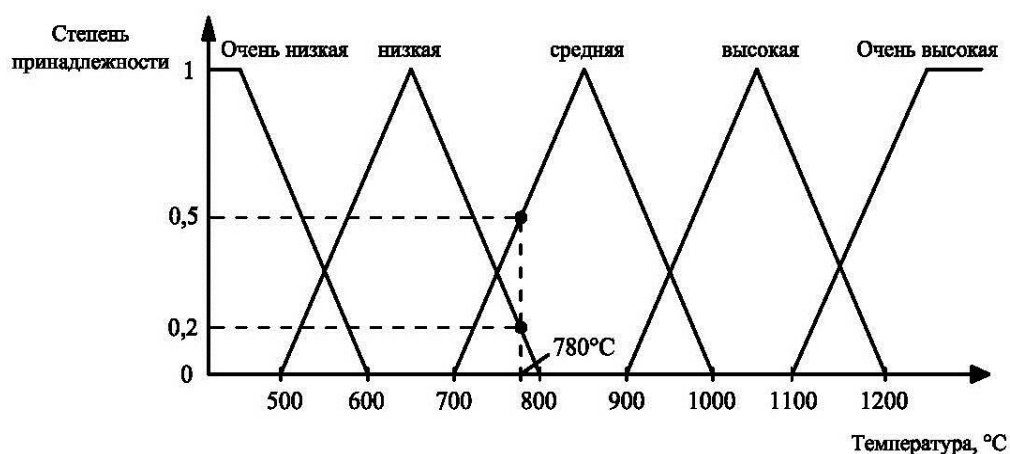


Рисунок 3.1 – Функция принадлежности на примере температурной шкалы

Условия функционирования машин описываются векторами признаков  $m$ , и определенное значение каждой компоненты вектора признаков

представляет собой степень приписывания или принадлежности соответствующей причине неисправности. Таким образом, значения физико-технических признаков, как и словесное (лингвистическое) описание степени неисправности, может способствовать принятию решения на основе функций принадлежности. После определения соответствующих коэффициентов принадлежности вычисляется условная вероятность нечеткого случайного события.

Для того чтобы обрабатывать согласованную информацию, необходимо либо преобразовывать поступающие от сенсоров сигналы в лингвистические описания, допускающие обработку методами нечеткой логики, либо переводить лингвистическое описание процесса на язык цифр. Эти процедуры, называемые соответственно "перевод в нечеткую форму" (fuzzification) и "перевод из нечеткой формы" (defuzzification), обычно выполняются при помощи функций принадлежности и совокупности правил. На рисунке 3.2 приведена схема поступающей от сенсоров числовой информации и сделанных экспертами лингвистических переменных для выявления неисправностей.



Рисунок 3.2 – Схема нечеткой диагностической системы

Нечеткие правила основаны на взаимно-однозначном соответствии между причиной и признаками неисправности. Однако в приложениях,



связанных с диагностикой машин, нередко случаются поломки, при которых связь между признаками и причинами неисправности носит неоднозначный характер. Простые двузначные утверждения типа "исправный" (1) – "неисправный" (0) недостаточны, поскольку современные диагностические системы должны распознавать опасные условия функционирования, причины и тип возникшей неисправности. Помимо этого, ожидается также информация об оценке оставшегося срока службы всей машины или ее составной части. Применение нечеткой логики позволяет решить эти проблемы [60–63]. В нечеткой системе сама классификация проводится на основе концепции статистического Байесовского классификатора или специальных моделей нечеткой диагностики, использующих минимальные и максимальные значения вероятностей [64].

Предложенная Л. А. Заде еще в 1965 г. [37] и в настоящее время широко применяемая для управления в различных бытовых приборах, при управлении четкостью изображения в видеокамерах, плавным стартом поездов метро и сложными химическими процессами теория нечеткости лишь в недавнее время нашла свое потенциальное применение и в сфере диагностики. Были опубликованы работы Дж. Ксу по диагностике машинных систем, М. Сайто и др. [62] по диагностике функционирования доменной печи, С. Боклиша по анализу процессов и М. Коха [63] по сравнению методов Байесовской и нечеткой классификации. Необходимо помнить, что и классическая теория распознавания образов также имеет дело с неточными классификациями векторов образов в многомерном пространстве признаков и моделированием неточно определенных множеств, и статистические классификаторы, как и геометрические, работают в подобных ситуациях при помощи адекватных моделей рассеяния. Тем не менее, встречаются ситуации, в которых решение при помощи теории нечеткости может оказаться более предпочтительным. Это, очевидно, происходит в том случае, когда какое-либо математическое моделирование процесса оказывается невозможным, но имеются эвристические знания опытных экспертов, и операторы включены в процесс принятия решения. Ключевой недостаток нечеткой логики заключается в более быстром, чем пропорциональный,

росте необходимого числа правил в зависимости от усложнения процесса и в необходимости проведения больших объемов вычислений, что увеличивает время логического вывода и затрудняет использование нечетких диагностических систем в реальном времени.

**Нейронные сети как классификаторы диагностических образов.** Проводившиеся в последние годы исследования в области нейрокомпьютеров способствовали возрождению интереса к распознаванию образов. Первоначальным намерением было моделирование процесса обработки информации человеческим мозгом при помощи искусственных нейронных сетей. В этих целях были предложены разнообразные модели нейронов со взвешенными синопсисами в качестве входов, с дендритами и аксонами, связанными с другими нейронами, образующими вычислительную схему. Для моделирования нелинейных характеристик электрохимических процессов, происходящих в биологическом нейроне, была определена нелинейная передаточная функция, часто называемая активностью. Найдена S-образная сигмоидальная функция, дающая наилучшие результаты. Изменяя значения весовых коэффициентов, можно научить сеть идентифицировать множество входных векторов, в определенной степени имитируя биологические процессы обучения. Другое сходство с живыми нейронами заключается в широком распараллеливании процесса обработки информации. Количество входных элементов искусственной нейронной сети соответствует элементам вектора признаков конкретной задачи, тогда как количество выходных элементов задается числом классов или состояний процесса, которые необходимо идентифицировать. Как правило, классы кодируют с использованием кода «один из  $n$ », образуя желаемый целевой вектор [64].

Обучение нейронной сети обычно представляет собой процедуру настройки весовых коэффициентов. С этой целью в качестве весов на первом шаге берутся случайные числа. Затем на вход последовательно подаются образы, и по всем слоям рассчитывается выход сети. Весовые коэффициенты модифицируются на основе расчета квадратичной ошибки между вычисленным значением выхода сети и целевым вектором для заданного

класса образов и всех допустимых векторов образов из обучающего множества. Процедура повторяется до тех пор, пока ошибка не станет меньше заданного уровня. Наиболее подходящей процедурой минимизации градиентного поля в многомерном векторном пространстве является метод градиентного спуска. В силу того, что ошибка сети для данного целевого вектора может быть определена только для вычислительных элементов выходного слоя, необходимо пересчитывать изменения весовых коэффициентов от выходного слоя сети к предыдущим слоям. В большинстве случаев обучение означает, поэтому контролируемую настройку весовых коэффициентов вплоть до достижения сходимости. Одними из первых были предложены многослойные перцептроны с правилом обратного обучения, продемонстрировавшие хорошие возможности моделирования линейных и нелинейных процессов как раз при обучении на заданных примерах.

Достоинство данной вычислительной схемы состоит в том, что после ее реализации либо путем последовательного компьютерного моделирования, либо на специальной вычислительной аппаратуре для параллельных вычислений, она может быть легко обучена для удовлетворения различных требований. Необходимо, однако, помнить, что искусственные нейронные сети представляют собой адаптивный алгоритм, адекватно описывающий ту или иную задачу распознавания образов после этапа обучения только в виде системы уравнений, не обладая при этом ни динамикой, ни интеллектом.

Предложены разнообразные нейронные модели и сетевые структуры, различающиеся как по своему строению, так и по алгоритмам обучения. Принципиальными отличиями являются контролируемое или неконтролируемое (конкурентное) обучение и структурированные или самоорганизующиеся конфигурации сетей. Самоорганизующиеся отображения, предложенные Кохоненом [61], в некотором смысле напоминают топографически организованные области, обнаруженные в визуальной части коры головного мозга животных. Их можно рассматривать как двумерные проекции визуальной информации. Предполагается, что обучение начинается с установления взаимосвязей между группами нейронов

мозга, организуясь под воздействием поступающей информации. В модели Кохонена входные нейроны связаны со всеми нейронами двумерного слоя, организованного в виде шести- или четырехугольной решетки и представленного опорными векторами (рисунок 3.3).

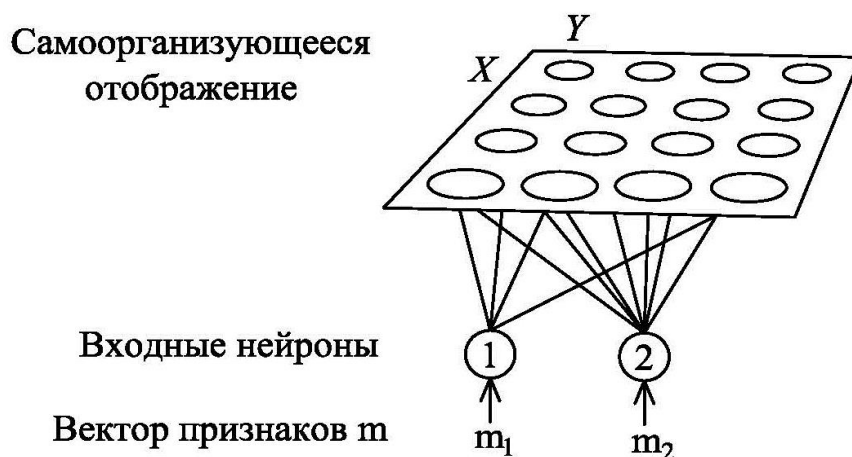


Рисунок 3.3 – Схема модели самоорганизующейся сети Кохонена

В ходе обучения эта однослойная сеть может проводить иерархическое представление кластеризации входных данных. Предполагается, что векторы признаков  $\bar{m}$  на входе сети представляют хорошо определенную функцию плотности вероятности, которую в некотором сложном виде копируют векторы весовых коэффициентов клеток. В процессе обучения векторы выбираются случайным образом и рекурсивно сдвигаются с целью формирования границы решения. Клетки объединяются в группы, каждая из которых представляет дискретный класс образов. Для классификации используется правило ближайшего соседа. Математическая процедура аппроксимации границ класса по опорным векторам называется схемой обучающего векторного квантования (рисунок 3.4).

Самоорганизующиеся отображения, как сообщалось, успешно решают ряд задач распознавания образов, таких как распознавание речи, управление технологическим процессом, а также в сфере телекоммуникации и робототехники. В данном исследовании они используются для распознавания

образа по типовой контрольной выборке и сравниваются с другими методами.



Рисунок 3.4 – Схемы классификаций для самоорганизующегося отображения

В случае сбоев в работе сложных технологических процессов для быстрого и точного определения местонахождения и природы неисправности требуются усложненные методы контроля хода процесса и диагностики отказов. При наличии хорошо разработанных и широко используемых процедур обнаружения неисправностей и контроля текущего состояния адаптивные методы, основанные на искусственных нейронных сетях, могут существенно улучшить интерпретацию признаков возникшей поломки. Хотя первоначальный энтузиазм середины 80-х годов по поводу экспертных систем и начала 90-х — по поводу нейронных сетей сменился более трезвым подходом, нечёткие системы представляют собой и сейчас весьма модное направление, а концепция нечеткости полезна и продуктивна, если описание процесса возможно лишь на базе эвристических знаний опытных операторов, или если в процесс поиска неисправностей вовлечены эксперты.

В практических применениях все усилия сосредоточены на проблеме моделирования процесса и определения эффективных признаков. Следует помнить, однако, что искусственные нейронные сети представляют собой адаптивный алгоритм, адекватно описывающий ту или иную задачу

распознавания образов после обучения только в виде системы уравнений, е обладая при этом ни динамикой, ни интеллектом. То же можно сказать и относительно нечеткой логики, где требуется приобретение знаний экспертов, и определение соответствующего множества правил [65–68].

### **3.3 Нечеткие отношения: основные понятия, определения и операции над ними**

Нечеткие отношения являются одним из фундаментальных понятий всей теории нечетких множеств [38]. Использование нечетких отношений между какими-либо причинами и их следствиями являются основой для создания весьма продуктивных нечетких моделей для любых сложных технических систем. Нечеткое отношение при этом является некоторым обобщением понятия обычного отношения и в вербальных моделях отождествляется с терминами ассоциация, нечеткая связь, взаимосвязь или соотношение.

Иначе говоря, нечеткость отношений возникает тогда, когда отношение между определенными объектами имеет место лишь в некоторой степени, причем мера этой степени может носить как объективный характер, обусловленный реальной действительностью, так и оцениваться в значительной степени субъективно.

В связи с этим нечеткие отношения выступают специфическим математическим и логическим аппаратом. Они существенно расширяют возможности субъекта (человека) при исследовании целого класса задач, которые раньше считались трудно формализуемыми. Кроме того, они облегчают возможность формализации, следовательно, успешного решения подобных задач автоматизированного управления при принятии решений, которые часто могут возникать в условиях информационной неопределенности или вследствие субъективного характера оценки лицом принимающего решения (ЛПР) отношений между объектами.

Примером могут служить распространенные в научно-исследовательской практике и в повседневной жизни нечеткие отношения предпочтения на множестве альтернатив. Каждому человеку хорошо известно, что в отношении сравнительной оценки каких бы то ни было явлений или объектов практически

всегда имеет место расхождение во мнениях. Даже в пределах одной группы специалистов в некоторой области вы не получите единогласно совпадающих оценок, как это показано ниже. И такое положение следует считать вполне естественным. Использование аппарата нечетких отношений позволяет ставить и решать технические задачи на количественном формальном уровне или давать вполне приемлемые оценки для многих сложных и важных прикладных проблем не только в области техники, но и в области социально-гуманитарных наук.

Характер нечетких отношений между элементами определенного множества альтернатив или каких-либо других объектов, которые в общем случае также можно считать альтернативами, в технических задачах обычно осуществляется путем консультаций с ЛПР. Чаше встречается решение подобных задач с участием экспертов, у которых обычно не существует четких суждения о тех или иных отношениях между альтернативами. В таких ситуациях само нечеткое отношение оказывается более удобной и более адекватной реальной действительности формой представления необходимой информации, чем привычные четкие отношения. Тем более, что фактически в представлении людей отношения между многими объектами чаще всего действительно имеют нечеткий характер.

Нечеткие отношения представляют собой не только важное математическое понятие, но и логическое понятие, которое позволяет формировать и анализировать математические модели реальных задач различной природы и находить их решения. Обычно нечеткие отношения строятся на множестве некоторых альтернатив, из которых следует возможный нечеткий логический вывод.

Нечеткие отношения представляют собой некоторую матрицу нечетких коэффициентов между некоторыми векторами возможных альтернатив, для которых они служат оператором преобразования.

$$A \circ R = B, \quad (3.1)$$

где  $\circ$  – нечеткий логический вывод.

Нечеткие отношения весьма удобно использовать как составную часть нечетких моделей для диагностики технического состояния

электрооборудования или других технических объектов. При этом осуществляется связь на множестве возможных альтернатив признаков неисправностей и причин отказов. Такая связь реализуется с помощью правила продукции «Если, ..., то ...» или «if ..., then ...». Первая часть правила продукции «Если» представляет собой причину и называется – антецедент, вторая часть правила продукции «то» характеризует следствие, которая называется – консеквент. Тогда если известны некоторые гипотезы возможных отказов электрооборудования (антецедент), то необходимо определить истинную причину повреждения (консеквент). Иначе говоря, консеквент дает решение задачи в виде некоторых нечетких значений к той или иной причине, которые ранее выступали как предпосылки гипотезы.

Содержательно нечеткое отношение определяется как любое нечеткое подмножество упорядоченных кортежей, построенных из элементов тех или иных базисных множеств, в качестве которых в данном случае используются универсумы [69]. При этом под кортежем, так же как и в случае обычных множеств, понимается произвольный набор или список упорядоченных элементов.

Следует отметить, что существуют и другие способы определения нечетких отношений. Так, например, можно предварительно задать нечеткие базисные множества  $A_1, A_2, \dots, A_k$  и определить нечеткое декартово произведение этих нечетких множеств в форме [70]

$$P = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_k, \quad (3.2)$$

где  $\mu_P (< x_1, x_2, \dots, x_k >) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_k}(x_k)\}$ ,

$$x_1 \in A_1, x_2 \in A_2, \dots, x_k \in A_k,$$

после чего определить нечеткое отношение  $Q$  как некоторое нечеткое подмножество этого нечеткого декартова произведения.

**Обратное нечеткое отношение.** Применительно к бинарным нечетким отношениям определяется так называемое обратное нечеткое отношение. А именно, если задано бинарное нечеткое отношение  $Q$  на декартовом произведении  $X_1 \times X_2$ , то обратным к нему нечетким отношением (обозначается



через  $Q^{-1}$ ) называется такое бинарное нечеткое отношение, которое задано на декартовом произведении  $X_2 \times X_1$ , а функция принадлежности которого определяется по следующей формуле

$$\mu_{Q^{-1}}(x_i, x_j) = \mu_Q(x_j, x_i) \text{ для любых } x_i \in X_2 \text{ и } x_j \in X_1 \quad (3.3)$$

**Нечеткие отношения на одном множестве.** Бинарное нечеткое отношение, заданное на одном базисном множестве (универсуме)  $X$ , определяется как нечеткое отношение  $Q = \{ \langle x_i, x_j \rangle, \mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle) \}$ ,

где  $\mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle)$  – функция принадлежности нечеткого отношения  $X \times X \rightarrow [0, 1]$ .

Возможны разные способы задания нечетких отношений. Наибольшее распространение имеют следующие.

– В форме списка с явным перечислением всех кортежей нечеткого отношения и соответствующих им значений функции принадлежности

$$Q = \{ (w_1, \mu_Q(w_1)), (w_2, \mu_Q(w_2)), \dots, (w_q, \mu_Q(w_q)) \}, \quad (3.4)$$

где  $w_i$  –  $i$ -ый кортеж  $\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle$  элементов этого отношения;  $q$  – число кортежей нечеткого отношения  $Q$ .

При этом для сокращения подобной записи кортежи с нулевыми значениями функции принадлежности не указываются в данном списке. Как нетрудно заметить, этот способ подходит только для задания нечетких отношений с конечным и небольшим числом кортежей  $q$ .

– Аналитически в форме некоторого математического выражения для соответствующей функции принадлежности этого нечеткого отношения. Этот способ может быть использован для задания произвольных нечетких отношений как с конечным, так и с бесконечным числом кортежей. В этом случае нечеткое отношение записывается в виде:

$$Q = \{ \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle, \mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle) \} \text{ или сокращенно: } Q = \{ (w, \mu_Q(w)) \},$$

понимая под  $w$  общее обозначение кортежа длины  $k$ . Если в качестве универсумов используются числовые множества, то в этом случае удобно

представить функцию принадлежности  $Q$  аналитически, в форме некоторой функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  от  $k$  переменных, которая конкретизирует отображение  $f(x): X_1 \times X_2 \times \dots \times X_k \rightarrow [0, 1]$ .

В дополнение к этим способам нечеткие отношения могут быть заданы следующим образом:

– Графически в форме некоторой поверхности или совокупности отдельных точек в трехмерном пространстве. При этом две координаты (независимые переменные) будут соответствовать значениям универсумов  $X_1$  и  $X_2$ , а третья координата — интервалу  $[0, 1]$ . Например, график математической функции:  $z = x^2 + y^2$  для,  $y \in [-0,5, 0,5]$  может служить примером графического способа формального задания некоторого нечеткого отношения. Здесь функция  $z$  является представлением функции принадлежности соответствующего нечеткого отношения. Этот способ зачастую используется в дополнение к аналитическому способу для визуализации бинарных нечетких отношений с бесконечным числом кортежей.

– В форме матрицы нечеткого отношения. Этот способ основан на представлении нечеткого бинарного отношения с конечным числом кортежей в форме матрицы  $M_Q$ , строки которой соответствуют первым элементам кортежей, а столбцы – вторым элементам кортежей рассматриваемого нечеткого отношения. При этом элементами матрицы являются соответствующие значения функции принадлежности  $\mu_Q$  данного отношения. Если бинарное нечеткое отношение задается на одном универсуме, то матрица такого отношения  $M_Q$  является квадратной. Определенную таким образом матрицу называют матрицей бинарного нечеткого отношения и обозначают  $M_Q$ . В этом контексте табличный способ может рассматриваться как разновидность матричного, поскольку конечная матрица всегда может быть представлена в форме таблицы.

Каждое нечеткое отношение представляет собой нечеткое множество применительно к нечетким отношениям. В то же время, при использовании

нечетких отношений имеет место целый ряд дополнительных особенностей, которые следует учитывать при оперировании соответствующими понятиями.

Пусть на некотором универсальном множестве  $X$  заданы два нечетких отношения  $A$  и  $B$ , каждое из которых представляет собой нечеткое множество на декартовом произведении  $X \times X$ , и пусть их элементами являются пары  $(x, y)$ , а функциями принадлежности, соответственно, выступают  $\mu_A(x, y)$  и  $\mu_B(x, y)$ .

Рассмотрим основные операции, которые определяются над этими отношениями [71]. Поскольку, как уже отмечалось выше, нечеткие отношения представляют собой особый вид нечетких множеств, представляется вполне естественным, что операции над ними определяются по аналогии с соответствующими операциями над нечеткими множествами, рассмотренными в предыдущем разделе.

**Определение 1.** *Объединением* нечетких отношений  $A$  и  $B$  на множестве  $X$  называется нечеткое отношение  $C = A \cup B$ , функция принадлежности которого имеет вид

$$\mu_C(x, y) = \max\{\mu_A(x, y), \mu_B(x, y)\}$$

для любой пары  $(x, y) \in X$ .

**Определение 2.** *Пересечением* нечетких отношений  $A$  и  $B$  на множестве  $X$  называется нечеткое отношение  $D = A \cap B$ , функция принадлежности которого имеет вид

$$\mu_D(x, y) = \min\{\mu_A(x, y), \mu_B(x, y)\}$$

для любой пары  $(x, y) \in X$ .

**Определение 3.** Говорят, что нечеткое отношение  $B$  включает в себя нечеткое отношение  $A$  (или, что то же, что нечеткое отношение  $A$  содержится в нечетком отношении  $B$ ), если для соответствующих нечетких множеств  $A$  и  $B$  выполняется условие  $A \subseteq B$  и при этом для функций принадлежности этих множеств неравенство

$$\mu_A(x, y) \leq \mu_B(x, y)$$

является справедливым для любых  $x, y \in X$ .

Наглядную геометрическую иллюстрацию этого условия дает рисунок 3.5, на котором приведены графики функций принадлежности обоих нечетких отношений. Из этих графиков, действительно, можно сделать вывод о том, что  $\mu_A(x, y) \leq \mu_B(x, y)$  для всего множества пар  $(x, y)$ .

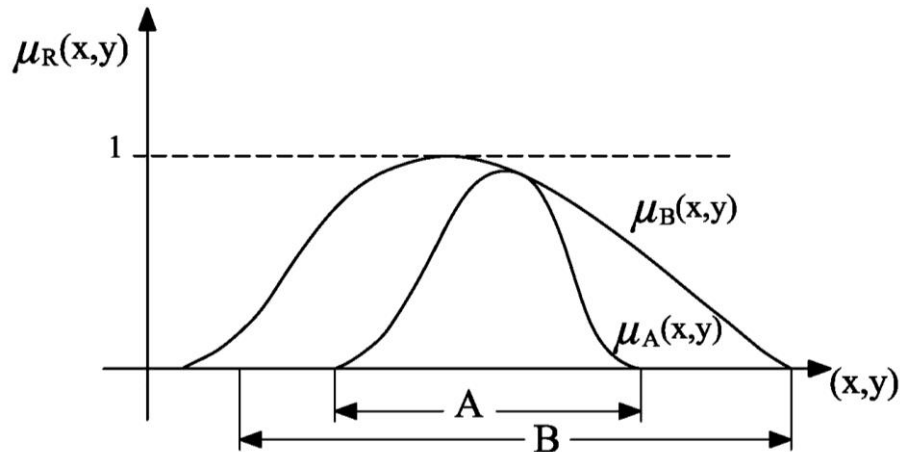


Рисунок 3.5 – Геометрическая иллюстрация операции включения нечеткого отношения  $A$  в нечеткое отношение  $B$

Считаем необходимым особо подчеркнуть, что в отличие от обычных отношений, даже при условии  $A \subseteq B$  нечеткое отношение  $B$  может не включать (не содержать в себе) нечеткого отношения  $A$ , если нарушается условие  $\mu_A(x, y) \leq \mu_B(x, y)$ , как это, например, приведено на рисунке 3.6.

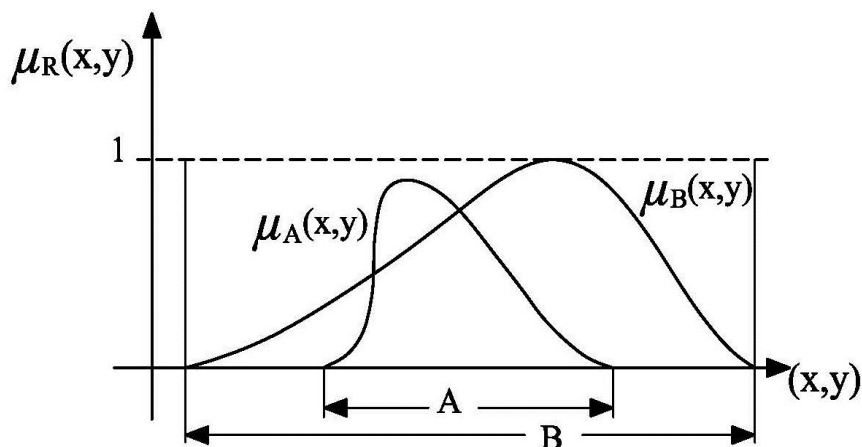


Рисунок 3.6 – Невыполнение факта включения нечеткого отношения  $A$  в нечеткое отношение  $B$  вследствие нарушения условия  $\mu_A(x, y) \leq \mu_B(x, y)$

Для иллюстрации рассмотрим следующий пример. Пусть есть нечеткое отношение  $R_1 = (\gg)$  "намного больше" и обычное отношение  $R_2 = (\geq)$  "не меньше". В этом случае действительно можно утверждать, что  $R_1 \subseteq R_2$ , поскольку

$$\mu_{R_1}(x, y) \leq \mu_{R_2}(x, y)$$

для любой пары  $(x, y) \in X$ .

**Определение 4.** Дополнением нечеткого отношения  $R$  на множестве  $X$  называется нечеткое отношение  $R'$ , функция принадлежности которого определяется из выражения

$$\mu_{R'}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y)$$

для любых пар  $(x, y) \in X$ .

**Определение 5.** Обратным относительно нечеткого отношения  $R$  называется нечеткое отношение  $R^{-1}$  на множестве  $X$ , которое определяется следующим образом

$$xR^{-1}y \Leftrightarrow yRx : (x, y) \in X ;$$

$$\mu_{R^{-1}}(x, y) = \mu_R(x, y) : (x, y) \in X .$$

Сущность обратного относительно  $R$  нечеткого отношения  $R^{-1}$  состоит в том, что оно выражает такую взаимосвязь между элементом  $x$  множества  $X$  и его элементом  $y$ , которая определяется отношением  $R$  между элементом  $y$  и элементом  $x$ . Если, например, рассматривать нечеткое отношение  $yRx = ("y \text{ не хуже } x")$ , то обратным будет отношение  $R^{-1} = ("x \text{ не хуже } y")$ . Для нечеткого отношения  $yRx = ("y \gg x")$ , то есть "у намного больше, чем x", обратным будет нечеткое отношение  $R^{-1} = "у намного меньше, чем x"$ .

Одновременно, с целью продемонстрировать принципиальное различие между дополнением  $R'$  до нечеткого отношения  $R$  и обратным к нему отношением  $R^{-1}$ , приведем пример дополнения  $R'$  к данному нечеткому отношению  $R = (y \gg x)$ , которое в нашем случае будет иметь вид  $R' = "у не является намного больше, чем x"$ .

Для нечетких отношений вводятся также операции *произведения* или *композиции*. Рассмотрим три получивших наибольшее распространение варианта подобных композиций. При этом исходим из того, что на множестве  $X$  заданы нечеткие отношения  $A$  и  $B$  с их функциями принадлежности соответственно  $\mu_A(x, y)$  и  $\mu_B(x, y)$ .

**Определение 6.** *Максиминным* произведением (максиминной композицией) нечетких отношений  $A$  и  $B$  на множестве  $X$  является нечеткое отношение  $A \circ B$  с функцией принадлежности, которая имеет следующий вид

$$\mu_{A \circ B}(x, y) = \sup_{z \in X} \min \{ \mu_A(x, z), \mu_B(z, y) \}.$$

**Определение 7.** *Минимаксным* произведением (минимаксной композицией) нечетких отношений  $A$  и  $B$  на множестве  $X$  является нечеткое отношение  $A \bullet B$  с функцией принадлежности, которая имеет следующий вид

$$\mu_{A \bullet B}(x, y) = \inf_{z \in X} \max \{ \mu_A(x, z), \mu_B(z, y) \}.$$

**Определение 8.** *Максимультимпликативным* произведением (максимультимпликативной композицией) нечетких отношений  $A$  и  $B$  на множестве  $X$  является нечеткое отношение  $A * B$  с функцией принадлежности, которая имеет следующий вид

$$\mu_{A * B}(x, y) = \sup_{z \in X} \{ \mu_A(x, z) \cdot \mu_B(z, y) \}.$$

Рассмотрим конечное множество  $X$ , то есть такое, которое состоит из конечного числа  $N$  элементов. Будем считать, что на этом множестве заданы два нечетких отношения  $A$  и  $B$ . Тогда их функции принадлежности  $\mu_A(x, y)$  и  $\mu_B(x, y)$  будут представлять собой квадратные матрицы, элементы которых соответственно  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  отображают степень выполнения соответствующих нечетких отношений  $x_{ij}A y_{ij}$  и  $x_{ij}B y_{ij}$  между элементами  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$ . В таком случае функции принадлежности определенных выше композиций данных нечетких отношений должны вычисляться по следующим формулам:

- для максиминной композиции

$$\mu_{A \circ B}(x, y) = \max_{k \in N} \min \{ \mu_A(a_{ik}, k), \mu_B(k, b_{kj}) \}, \quad i, j, k \in N;$$

- для минимаксной композиции

$$\mu_{A \bullet B}(x, y) = \min_{k \in N} \max \{ \mu_A(a_{ik}, k), \mu_B(k, b_{kj}) \}, i, j, k \in N;$$

- для максумультипликативной композиции:

$$\mu_{A * B}(x, y) = \max_{k \in N} \{ a_{ik} \times b_{kj} \}, i, j, k \in N.$$

### 3.4 Признаки неисправности и дефекты силовых трансформаторов при эксплуатации

Надежность функционирования трансформаторного оборудования электросетевого комплекса в значительной степени определяется режимами их работы и уровнем эксплуатации. В таблице 3.1 приведены основные статистические данные повреждений силовых масляных трансформаторов за время их эксплуатации за период с 1997 - 2001 гг.

Таблица 3.1 – Повреждения маслонаполненных трансформаторов по различным классам напряжения с 1997 - 2001 годов

Дефектный узел	Напряжение электрической сети, кВ					
	35	110	220	330	500	Итого
	Количество, шт., (%)	Количество, шт., (%)	Количество, шт., (%)	Количество, шт., (%)	Количество, шт., (%)	Количество, шт., (%)
Обмотки трансформатора	61(30)	43 (13)	10 (7)	1 (8)	0 (0)	115 (16)
Магнитопровод	0 (0)	0 (0)	2 (1,5)	1 (8)	0 (0)	3 (0,5)
Система охлаждения	7 (3)	16 (5)	8 (6)	2 (15)	3 (14)	36 (5)
Система регулирования напряжения	4 (2)	61 (18)	26 (19)	1 (8)	5 (24)	97 (13,5)
Высоковольтные вводы	31 (15)	77 (23)	44 (32)	3 (23)	7 (34)	158 (22)
Снижение уровня масла	74 (37)	110 (32)	45 (33,5)	5 (38)	6 (28)	240 (34)
Внешние повреждения	27 (13)	31 (9)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	63 (9)
Общее количество	204 (100)	338 (100)	136 (100)	13 (100)	21 (100)	712 (100)

За период от начала включения за 12 лет эксплуатации в трансформаторах возникали следующие повреждения:

- повреждение обмоток трансформаторов из-за длительного неотключения при сквозных токах КЗ на стороне 10 кВ;
- повреждение обмоток высокого напряжения из-за витковых замыканий или выгорание витковой изоляции;
- перекрытия масляного канала герметичных высоковольтных вводов по внутренней изоляционной поверхности;
- повреждения контактной системы регулирования напряжения.

За период эксплуатации трансформаторов в течение 25 лет были выявлены следующие повреждения:

- повреждения из-за увлажнения и загрязнения изоляции обмоток;
- внутренние повреждения обмоток при длительном неотключении сквозного тока КЗ;
- дефекты пуско-наладочных работ при монтаже, текущем ремонте и эксплуатации;
- повреждения системы регулирования напряжения и обмоток трансформаторов при переключениях;
- повреждения негерметичных высоковольтных вводов из-за увлажнения и загрязнения внутренней изоляции;
- износ изоляции обмоток.

В реальности все трансформаторы имеют те или иные неисправности или дефекты отдельных узлов, не предусмотренные нормативными документами, при наличии которых трансформатор сохраняет работоспособное состояние в течение определенного, иногда очень длительного, периода.

В таблице 3.2 приведены статистические данные о неисправностях и дефектах трансформаторов с большим сроком эксплуатации, которые сохраняли работоспособное состояние, несмотря на то, что имели некоторые дефекты или неисправности.



Таблица 3.2 – Статистика неисправностей и дефектов трансформаторов с большим сроком эксплуатации

Дефектный узел или характер дефекта	Количество дефектов	Процент от общего числа дефектов	Число трансформаторов с дефектами
Распрессовка обмоток	42	6,6	42 (39,6%)
Деформация обмоток	10	1,6	9 (8,5%)
Увлажнение твердой изоляции	60	9,4	60 (56,6%)
Распрессовка магнитопровода	26	4,1	26 (24,5%)
Снижение качества масла	76	12	76 (71,7%)
Снижение уровня масла	44	6,9	44 (41,5%)
Гзовыделение	58	9,1	58 (54,7%)
Нарушение системы охлаждения	154	24,2	103 (97,1%)
Система регулирования напряжения	52	8,1	43 (40,5%)
Высоковольтные вводы	92	14,5	74 (69,8%)
Другие дефекты	22	3,5	22 (20,8%)
Итого	643	100	106

В таблице 3.3 приведены статистические данные о ремонтах высоковольтного электрооборудования энергосистемы Республики Таджикистан за последние 10 лет.

Таблица 3.3 – Ремонты основного электрооборудования подстанций 110 – 500кВ за 2004-2013 годы

Наименование электрооборудования	Единица измерения	2004 год				2005 год			
		Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего	Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего
		план	выполнение	выполнение		план	выполнение	выполнение	
Силовые трансформаторы 110-500кВ	шт.	52	1	46	47	45	2	32	34
Выключатели 110-500кВ	шт.	123	24	82	106	104	13	70	83
ЛЭП -500кВ	км	33	141	–	141	40	140	–	140
ЛЭП -220кВ	км	62	172,2	–	172,2	187	282,2	–	282,2
ЛЭП -110кВ	км	401,5	392,1	–	392,1	316,9	563,8	–	563,8
Наименование электрооборудования	Единица измерения	2006 год				2007 год			
		Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего	Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего
		план	Выполнение	выполнение		план	выполнение	выполнение	
Силовые трансформаторы 110-500кВ	шт.	15	9	134	143	23	8	60	68

Продолжение таблицы 3.3

Выключатели 110-500кВ	шт.	35	48	150	198	56	18	35	53
ЛЭП -500кВ	км	20	20	–	20	20	50	–	50
ЛЭП -220кВ	км	112,6	142,8	17	159,8	52,9	77,2	–	77,2
ЛЭП -110кВ	км	294,6	480,9	57,3	538,2	311,1	358,3	–	358,3
Наименование электрооборудования	Единица измерения	2008 год				2009 год			
		Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего	Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего
		план	выполнение	выполнение		план	выполнение	выполнение	
Силовые трансформаторы 110-500кВ	шт.	18	7	94	101	18	6	66	72
Выключатели 110-500кВ	шт.	37	26	77	103	26	22	61	83
ЛЭП -500кВ	км	20	30	–	30	20	20	40	60
ЛЭП -220кВ	км	56	27,5	147,5	175	69,7	65,8	19,6	85,4
ЛЭП -110кВ	км	186	187,8	214,3	402,1	135,1	232,5	244	476,5
Наименование электрооборудования	Единица измерения	2010 год				2011 год			
		Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего	Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего
		план	выполнение	выполнение		план	выполнение	выполнение	
Силовые трансформаторы 110-500кВ	шт.	21	10	89	99	16	12	136	148
Выключатели 110-500кВ	шт.	48	16	99	115	49	29	144	173
ЛЭП -500кВ	км	20	20	–	20	20	20	–	20
ЛЭП -220кВ	км	52,4	50,4	13,8	64,2	94,1	17	151,7	168,7
ЛЭП -110кВ	км	206,8	143,5	146,6	290,1	249,1	227,2	485,3	712,5
Наименование электрооборудования	Единица измерения	2012 год				2013 год			
		Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего	Капитальный ремонт		Текущий ремонт	Всего
		план	выполнение	выполнение		план	выполнение	выполнение	
Силовые трансформаторы 110-500кВ	шт.	16	14	126	140	10	10	179	189
Выключатели 110-500кВ	шт.	74	55	190	245	49	23	272	295
ЛЭП -500кВ	км	20	20	–	20	20	20	3,5	23,5
ЛЭП -220кВ	км	83,8	89	119,37	208,3	130,0	110,7	42,6	153,4
ЛЭП -110кВ	км	256,7	240,4	223,1	463,5	344,6	161,3	185,6	346,9

Из таблицы 3.3 видно, что число планово-предупредительных ремонтов снижается, а число текущих ремонтов возрастает. Это свидетельствует о том, что диагностики по текущему техническому состоянию электрооборудования уделяется большее внимание в связи с меньшими материальными затратами для ее проведения.

Количество трансформаторов работающих в системе приведено в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 – Количество трансформаторов (автотрансформаторов) 35, 110, 220, 500 кВ, на подстанциях ОАХК «Барки Точик»

Мощность, кВА	Высокое напряжение, кВ	Количество трансформаторов и автотрансформаторов, шт.			Суммарная мощность трансформаторов и автотрансформаторов, МВА		
		Всего	В рабочем состоянии	В нерабочем состоянии	Всего	В рабочем состоянии	В нерабочем состоянии
до 2500	35	35	32	3	46,635	42,035	4,6
2500-7500	35	302	290	12	1325,65	1284,8	40,85
	110	71	67	4	399,9	378,5	21,4
10000-80000	35	46	45	1	531	521	10
	110	220	211	9	3930	3801	129
	220	24	23	1	1089	1069	20
от 80000 и выше	220	28	27	1	3840	3715	125
	500	18	15	3	3906	3105	801

Таблица 3.5 – Длительности эксплуатации трансформаторов (автотрансформаторов) 110 – 500 кВ

Высокое напряжение (авто) трансформаторов	Всего, штук	Количество (авто)трансформаторов в эксплуатации, штук						
		от 5 лет	от 5 до 15 лет	от 15 до 25 лет	от 25 до 35 лет	от 35 до 45 лет	от 45 до 55 лет	от 55 до 65 лет
500кВ	15	-	9	-	3	3	-	-
220кВ	50	3	8	4	25	8	2	-
110кВ	271	7	12	22	137	62	27	4

Из таблицы 3.5 видно, что на подстанциях электрических сетей трансформаторы 110кВ – 85%, трансформаторы (автотрансформаторов) 220 кВ – 70% которые находятся в эксплуатации более 25 лет.

В таблице 3.6 ниже даны некоторые причины, с которыми могут быть связаны отказы силовых трансформаторов и автотрансформаторов с большим сроком эксплуатации, приводящих к длительному ремонтному периоду.

Таблица 3.6 – Некоторые причины отказов силовых трансформаторов мощностью более 100 МВА

Дефектный узел	Вид возможного повреждения	Доля отказов, %
Обмотки трансформатора	Электрический пробой	14,1
	Механический пробой	10,7
	Термический пробой	1,6
Итого		26,4
Главная изоляционная среда	Электрический пробой, частичные и ползущие разряды	14,0
Магнитопровод и магнитные шунты	Перегрев, искрение в масле	8,3
Система регулирования напряжения	Перегрев, частичные разряды, механизм привода	18,3
Высоковольтные вводы	Пробой изоляции, перегрев	33,0
Итого		73,6
Всего		100

Таким образом, система диагностики текущего технического состояния трансформаторного оборудования должна обеспечить своевременное обнаружение всех возможных дефектов и неисправностей. Очевидно, что в первую очередь необходимо идентифицировать те дефекты и неисправности, которые могут привести к внезапным отказам или существенному сокращению срока службы электрооборудования.

Известная ABB Power Technology сформировала полное пространство предпосылок дефектов «симптомов» и возможных причин в следующей форме (таблица 3.7) [72–74]. Данная таблица одновременно адаптирована к математической модели нечетких отношений, где  $X_i$  - это признаки,  $Y_i$  - контролируемые параметры.

$X_1$  – дефект в обмотке;  $X_2$  – дефект в изоляции;  $X_3$  – дефект сердечника;  $X_4$  – горячие точки;  $X_5$  – дугообразование;  $X_6$  – пузырьки газа;  $X_7$  – грязь в масле;  $X_8$  – утечки в системе.

$Y_1$  – влажность масла;  $Y_2$  – газообразование в масле;  $Y_3$  – частичные разряды;  $Y_4$  – повышение температуры и перегрев;  $Y_5$  – пробой изоляционной среды;

$Y_6$  – вибрация.

Таблица 3.7 – Полное пространство предпосылок дефектов ABB Power technology

Контролируемые параметры	Вид дефекта							
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$Y_1$				+				+
$Y_2$	+	+	+	+	+	+	+	
$Y_3$	+	+			+	+	+	
$Y_4$	+		+	+				
$Y_5$				+		+	+	
$Y_6$	+		+					

Текущая диагностика наиболее эффективна при определении вида дефекта его серьезности и вида необходимых корректирующих воздействий. Важность экспертных оценок в системах оценки текущего технического состояния и периодической плановой диагностике электрооборудования в значительной степени определяется выбором тестирующих программ и алгоритмов обработки статистической информации. Результаты этого информационного анализа могут фиксировать как превышения параметров некоторых предельных значений, так и обоснования решений о проведении учащённого контроля, выполнение текущих ремонтных работ или вывод из эксплуатации из-за предельного состояния. В связи с этим вполне оправдано комплексное системное решение, состоящее в совмещении систем планово-предупредительных ремонтов и оценки текущего технического состояния оборудования, так как их конвергенция позволит использовать сильные стороны каждого из видов для поддержания работоспособного состояния электросетевого оборудования [75–76].

### **3.5 Диагностическая модель текущего технического состояния электрооборудования на основе нечетких отношений**

В настоящее время при эксплуатации электрических сетей и электрических подстанций электроэнергетических систем все большую роль

играет мониторинг текущего технического состояния электрооборудования, который позволяет выводить в ремонт высоковольтное электрооборудование и трансформаторы по результатам текущего технического состояния. Такой подход требует индивидуальных решений, включая экспертные мнения о работоспособности оборудования, исходя из некоторых признаков его состояния. С помощью методов неразрушающего контроля можно выявить ранние симптомы возможных отказов. В настоящей работе предпринята попытка на примере реальных дефектов трансформатора установить причинно-следственную связь между симптомами отказов и их реальными причинами при неполной истинности экспертных оценок в виде нечетких отношений и нечеткой логики [37]. Диагностика – комплекс средств и методов, призванных определить техническое состояние электрооборудования. Введем термин «оперативная диагностика», под которым будем понимать получение информации от находящегося в работе трансформаторного оборудования на относительно коротких интервалах времени. Полученные данные о контролируемых параметрах после обработки и анализа позволяют предварительно сделать заключение о состоянии электрооборудования.

Это направление требует индивидуальной оценки технического состояния каждого объекта, трансформатора или коммутационного аппарата, с помощью методов неразрушающего контроля и экспертных оценок. Так, например, обмоток, как самой уязвимой части трансформатора, повреждение изоляции которых создает опасность короткого замыкания (КЗ) и вывода оборудования из строя. В ряде случаев появление одних неисправностей приводит к возникновению других повреждений. Во всех подобных случаях предлагается использовать один и тот же подход, основанный на математической модели нечетких отношений. Наиболее сложным видом оборудования электрических сетей и подстанций предприятий и городов являются силовые трансформаторы. Обмотки являются наиболее уязвимой частью трансформатора, повреждение их изоляции создает опасность короткого замыкания (КЗ). Весьма значительно снижают электрическую прочность изоляции химические процессы, происходящие в трансформаторе из-за наличия в ней посторонних примесей, например, влаги (недостаточная

сушка обмоток после ремонта, увлажнение охлаждающего масла). Возможны и другие причины отказов, приведенные ниже.

В литературе [77] предлагается классификация моделей диагностики на аналитические и физические модели, при этом отмечается, что в техническом диагностировании высоковольтного электрооборудования в процессе его эксплуатации целесообразно применять аналитические модели. Аналитические модели в свою очередь можно подразделить на детерминированные и вероятностные. В настоящей работе разработана диагностическая модель, в которой вероятностные признаки рассматриваются как нечеткие субъективные вероятности. Наряду с этим, как указывает автор [77], на основе разработанных моделей может быть построена иерархическая модель в виде некоторой иерархической структуры. Такая модель рассмотрена в четвертой главе настоящей работы на основе анализа метода иерархии.

Рассмотрим математическую модель технической диагностики электрооборудования энергетических объектов, основанную на нечетких отношениях между возможными причинами отказов и повреждениями.

Примем следующую модель технической диагностики трансформаторов с использованием матрицы нечетких отношений, которая в свою очередь требует некоторых экспертных оценок [78–80]. Эти лингвистические оценки представляются как некоторые точки функции принадлежности, отражающей субъективное восприятия повреждения экспертом на основе его опыта и знаний [38].

Описание полного пространства возможных повреждений (предпосылок)  $X$  состоит из  $m$  факторов, а полное пространство причин (заключений) появления этих повреждений  $Y$  из  $n$  симптомов.

Между  $X_i$  и  $Y_j$  существуют некоторые нечеткие причинно-следственные отношения  $R_{ij} = X_i \rightarrow Y_j$ , которые можно представить в виде некоторой матрицы  $R$ , с элементами  $R_{ij} \in [0,1]$ . Конкретные входы (предпосылки) и выходы (заключения) можно рассматривать как нечеткие множества  $A$  и  $B$  на пространстве  $X$  и  $Y$  [81].

Отношение этих нечетких множеств можно обозначить как

$$B = A \bullet R,$$

где знак «•» обозначает правило композиции нечетких выводов.

В данном случае направление решения в отношении выводов является обратным к направлению выводов правил, т.е. в случае диагностики имеется матрица  $R$  (знания экспертов) и определяются входы (или факторы).

Исходя из изложенного выше, используя теорию нечетких отношений и экспертные оценки возможных причин повреждаемости, можно составить структурную схему матриц нечетких отношений между причинами (повреждениями) и их следствиями (таблица 3.8).

Рассмотрим набор следующих возможных повреждений, обнаруживаемых у силовых трансформаторов [82–86]:

$Y_1$  – выгорание витковой изоляции и витков обмотки трансформатора;

$Y_2$  – деформации в обмотках;

$Y_3$  – увлажнение и загрязнение изоляции обмоток;

$Y_4$  – износ изоляции обмоток.

Возможные причины появления того или иного повреждения могут быть следующие:

$X_1$  – длительное неотключение сквозного тока КЗ на обмотках низшего напряжения трансформатора;

$X_2$  – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ;

$X_3$  – нарушение герметичности трансформатора;

$X_4$  – снижение механической прочности изоляции.

Таблица 3.8 – Принадлежности причин и повреждений обмотки трансформатора

Повреждения	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0,9	0,6	0,6	0,9
$Y_2$	0,5	0,8	0,6	0,6
$Y_3$	0,5	0,3	0,4	0,6
$Y_4$	0,4	0,8	0,4	0,7



Детерминистические отношения между причиной и следствием рассматриваются как 1, отсутствие связи как 0, другие нечеткие отношения как промежуточные значения между 0 и 1. Допустим, знания эксперта по эксплуатации, и диагностике силовых трансформаторов в форме нечетких отношений причин и следствий имеют следующий вид

$$R = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,9 & 0,5 & 0,5 & 0,4 \\ 0,6 & 0,8 & 0,3 & 0,8 \\ 0,6 & 0,6 & 0,4 & 0,4 \\ 0,9 & 0,6 & 0,6 & 0,7 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Метод решения.** Допустим, в результате осмотра трансформатора эксперт оценивает его техническое состояние через следующие отношения возможных причин и следствий

$$B = 0,4 / Y_1 + 0,8 / Y_2 + 0,3 / Y_3 + 0,9 / Y_4,$$

Требуется определить возможную причину такого состояния на основе уравнения

$$A = a_1 / X_1 + a_2 / X_2 + a_3 / X_3 + a_4 / X_4,$$

Уравнение нечетких отношений введенных нечетких множеств можно представить в виде

$$[0,4 \quad 0,8 \quad 0,3 \quad 0,9] = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \cdot \begin{bmatrix} 0,9 & 0,5 & 0,5 & 0,4 \\ 0,6 & 0,8 & 0,3 & 0,8 \\ 0,6 & 0,6 & 0,4 & 0,4 \\ 0,9 & 0,6 & 0,6 & 0,7 \end{bmatrix}$$

либо, транспонируя, в виде нечетких векторов – столбцов

$$\begin{bmatrix} 0,4 \\ 0,8 \\ 0,3 \\ 0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,6 & 0,6 & 0,9 \\ 0,5 & 0,8 & 0,6 & 0,6 \\ 0,5 & 0,3 & 0,4 & 0,6 \\ 0,4 & 0,8 & 0,4 & 0,7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

При использовании макси-минной (max-min) композиции последнее соотношение преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} 0,4 &= (0,9 \wedge a_1) \vee (0,6 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,9 \wedge a_4) \\ 0,8 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \\ 0,3 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,3 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \\ 0,9 &= (0,4 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,7 \wedge a_4) \end{aligned} \right\}$$

Из первого уравнения получим

$$\begin{aligned} 0,4 &\geq 0,9 \wedge a_1, a_1 \leq 0,4, \\ 0,4 &\geq 0,9 \wedge a_4, a_4 \leq 0,4. \end{aligned}$$

Из второго уравнения

$$0,8 = 0,8 \wedge a_2, a_2 = 0,8.$$

Из третьего уравнения

$$0,3 \geq 0,6 \wedge a_4, a_4 \leq 0,3.$$

Из четвертого уравнения

$$0,9 = 0,9 \wedge a_2, a_2 = 0,9.$$

Решение системы уравнений дает следующий вектор столбец приоритетности (ВПС) возможных причин возникновения дефектов

Возможная причина	ВПС
недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ с принадлежностью	0,9
снижение механической прочности изоляции с принадлежностью	0,4
длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения с принадлежностью	0,3

Далее рассмотрим некоторые нечеткие причинно-следственные отношения возможных повреждений на примере выключателя.

Методы проверок регулировочных характеристик выключателей и приводов описаны в разделах "Наладки" или "Монтаж" "Технических описаний" на выключатели и приводы.

Для облегчения поиска причин неисправностей и их устранения ниже приведены наиболее характерные отказы в работе масляных баковых выключателей и методы проверок характеристик.

К вопросу устранения неисправностей и отказов необходимо подходить с учетом следующего:

- во многих случаях обнаруженная неисправность может оказаться причиной или следствием неисправности другого узла. Так, например, несоответствие параметра привода может оказаться результатом несоответствия параметров выключателя;

- качество выполненных работ по устранению отказов и неисправностей, как правило, должно подтверждаться результатами проведенных проверок параметров. Для подвижных элементов (приводов) результаты работ должны подтверждаться проверкой скоростных и временных параметров;

- при резких изменениях параметров в пределах допустимого необходимо провести анализ изменений.

Примем аналогичную приведенной выше модель, которая применялась для диагностики трансформаторов. Для высоковольтных выключателей пространство возможных повреждений и причин их возникновения будет, конечно, другим. Оценка экспертов также изменится (таблица 3.9).

Неисправности, обнаруженные у высоковольтного выключателя, будут следующими [87]:

$Y_1$  – выключатель не поддается включению;

$Y_2$  – утечка газа;

$Y_3$  – утечка воздуха.

Перечень причин возникновения той или иной неисправности приводится ниже в соответствии с вышеуказанным примером:

$X_1$  – обрыв в цепи катушки управления;

$X_2$  – отсутствие контакта механизма свободного расцепления;

$X_3$  – дефекты сварки или материала корпуса;

$X_4$  – неисправность датчика давления газа;

$X_5$  – повреждена прокладка клапана из-за попадания сторонних частиц.

Исходя из изложенного выше, можно составить структурную схему матриц нечетких отношений между причинами (повреждениями) и их

следствиями, используя теорию нечетких отношений и экспертные оценки возможных причин повреждения.

Таблица 3.9 – Принадлежности причин и повреждений выключателя

Повреждения	Причины				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$Y_1$	0,9	0,8	0,2	0,4	0,2
$Y_2$	0,2	0,2	0,9	0,8	0,6
$Y_3$	0,3	0,2	0,8	0,3	0,9

Рассмотрим пример, когда знания эксперта по диагностике после осмотра высоковольтного выключателя имеют вид нечетких отношений причин и следствий

$$R = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,9 & 0,2 & 0,3 \\ 0,8 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,9 & 0,8 \\ 0,4 & 0,8 & 0,3 \\ 0,2 & 0,6 & 0,9 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

В результате осмотра выключателя его состояние можно оценить как функцию принадлежности

$$B = 0,7 / Y_1 + 0,4 / Y_2 + 0,1 / Y_3$$

Требуется определить возможную причину такого состояния

$$A = a_1 / X_1 + a_2 / X_2 + a_3 / X_3 + a_4 / X_4 + a_5 / X_5$$

Отношение введенных нечетких множеств можно представить в виде

$$[0,7 \quad 0,4 \quad 0,1] = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5] \cdot \begin{bmatrix} 0,9 & 0,2 & 0,3 \\ 0,8 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,9 & 0,8 \\ 0,4 & 0,8 & 0,3 \\ 0,2 & 0,6 & 0,9 \end{bmatrix}$$

либо, транспонируя, в виде нечетких векторов – столбцов

$$\begin{bmatrix} 0,7 \\ 0,4 \\ 0,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9 & 0,8 & 0,2 & 0,4 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,9 & 0,8 & 0,6 \\ 0,3 & 0,2 & 0,8 & 0,3 & 0,9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}$$

При использовании (max - min) - композиции (взятие максимума из минимума) последнее соотношение преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} 0,7 &= (0,9 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,2 \wedge a_3) \vee (0,4 \wedge a_4) \vee (0,2 \wedge a_5) \\ 0,4 &= (0,2 \wedge a_1) \vee (0,2 \wedge a_2) \vee (0,9 \wedge a_3) \vee (0,8 \wedge a_4) \vee (0,6 \wedge a_5) \\ 0,1 &= (0,3 \wedge a_1) \vee (0,2 \wedge a_2) \vee (0,8 \wedge a_3) \vee (0,3 \wedge a_4) \vee (0,9 \wedge a_5) \end{aligned} \right\}$$

Из первого уравнения получим

$$0,7 \geq 0,9 \wedge a_1, a_1 \leq 0,7$$

Из второго уравнения

$$0,4 \geq 0,9 \wedge a_3, a_3 \leq 0,4$$

Из третьего уравнения

$$0,1 \geq 0,9 \wedge a_5, a_5 \leq 0,1$$

Решение нечетких уравнений позволяет установить следующую приоритетность причин дефектов для выключателей

Возможная причина	ВСП
обрыв в цепи катушки управления с принадлежностью	0,7
дефекты сварки или материала корпуса с принадлежностью	0,4
повреждена прокладка клапана из-за попадания сторонних частиц с принадлежностью	0,1

### 3.6 Углубленная нечеткая модель технической диагностики трансформатора

В соответствии с ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [24] различают следующие основные понятия:

– работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

– неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором хотя бы одно значение параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

– предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

При этом под неработоспособным состоянием в настоящей работе понимается как неисправное, но работоспособное состояние, с некоторой степенью принадлежности. Оно не означает вывод электрооборудования из эксплуатации немедленно, а только указывает, с некоторой степенью истинности, на предаварийное состояние объекта.

Принята такая же математическая модель технической диагностики электрооборудования с использованием матрицы нечетких отношений, которая также требует экспертных оценок, изложенный в параграфе 3.5. Углубление модели состоит в том, что количество возможных дефектов и причин их появления увеличена с четырех до семи [88–89], матрица нечетких отношений имеет размерность  $7 \times 7$ .

**Метод решения.** На основе теории нечетких множеств и нечетких отношений, а также лингвистических экспертных оценок возможных причин повреждаемости, можно представить следующую структурную схему решения задачи. Составим матрицу нечетких отношений между возможными дефектами-повреждениями обмоток трансформаторов и их следствиями.

Оперативная диагностика может производиться после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности. Признаков может быть множество, но приведем ниже лишь некоторые из них, которые наиболее часто встречаются на практике (таблица 3.10).

Дефекты, обнаруживаемые при повреждении обмоток у силовых трансформаторов, как следствие некоторых предпосылок-симптомов [90–91]:

$Y_1$  – выгорание витковой изоляции и витков обмотки трансформатора;

$Y_2$  – деформации в обмотках;

$Y_3$  – увлажнение и загрязнение изоляции обмоток;

$Y_4$  – износ изоляции обмоток;

$Y_5$  – пробой в обмотках;

$Y_6$  – обрыв в обмотках;

$Y_7$  – срабатывание газовой защиты.

Причины появления того или иного дефекта могут быть следующие:

$X_1$  – длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора;

$X_2$  – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ;

$X_3$  – нарушение герметичности трансформатора;

$X_4$  – снижение механической прочности изоляции;

$X_5$  – перенапряжения;

$X_6$  – механические повреждения;

$X_7$  – низкий уровень масла.

Таблица 3.10 – Принадлежности причин и повреждений обмотки трансформатора

		Причины						
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
Следствия	$Y_1$	0,7	0,5	0,5	0,9	0,6	0,5	0,5
	$Y_2$	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,5
	$Y_3$	0,5	0,3	0,6	0,4	0,2	0,3	0,3
	$Y_4$	0,4	0,8	0,4	0,7	0,6	0,3	0,4
	$Y_5$	0,5	0,6	0,4	0,8	0,8	0,2	0,3
	$Y_6$	0,6	0,9	0,4	0,3	0,4	0,8	0,4
	$Y_7$	0,2	0,1	0,8	0,1	0,1	0,3	1,0

Тогда знания экспертов по диагностике силовых трансформаторов можно представить в виде следующей матрицы нечетких отношений:

$$R = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 & Y_5 & Y_6 & Y_7 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,2 \\ 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,8 & 0,6 & 0,9 & 0,1 \\ 0,5 & 0,6 & 0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,8 \\ 0,9 & 0,6 & 0,4 & 0,7 & 0,8 & 0,3 & 0,1 \\ 0,6 & 0,7 & 0,2 & 0,6 & 0,8 & 0,4 & 0,1 \\ 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,2 & 0,8 & 0,3 \\ 0,5 & 0,5 & 0,3 & 0,4 & 0,3 & 0,4 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Пусть также по результатам осмотра трансформатора некоторый эксперт утверждает, что состояние оборудования можно описать уравнением нечетких принадлежностей причин и следствий:

$$B = 0,4 / Y_1 + 0,6 / Y_2 + 0,5 / Y_3 + 0,7 / Y_4 + 0,6 / Y_5 + 0,4 / Y_6 + 0,8 / Y_7$$

Для решения этой задачи требуется определить причины такого состояния и степень их приоритетности:

$$A = a_1 / X_1 + a_2 / X_2 + a_3 / X_3 + a_4 / X_4 + a_5 / X_5 + a_6 / X_6 + a_7 / X_7$$

Исходя из приведенных уравнений, отношения введенных нечетких множеств можно представить таким образом:

$$\begin{aligned} & [0,4 \quad 0,6 \quad 0,5 \quad 0,7 \quad 0,6 \quad 0,4 \quad 0,8] = \\ & = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7] \cdot \begin{bmatrix} 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,2 \\ 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,8 & 0,6 & 0,9 & 0,1 \\ 0,5 & 0,6 & 0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,4 & 0,8 \\ 0,9 & 0,6 & 0,4 & 0,7 & 0,8 & 0,3 & 0,1 \\ 0,6 & 0,7 & 0,2 & 0,6 & 0,8 & 0,4 & 0,1 \\ 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,2 & 0,8 & 0,3 \\ 0,5 & 0,5 & 0,3 & 0,4 & 0,3 & 0,4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Транспонируем нечеткий вектор в столбец и, используя (max – min) композицию, последнее матричное отношение примет вид:



$$\left. \begin{aligned}
 0,4 &= (0,7 \wedge a_1) \vee (0,5 \wedge a_2) \vee (0,5 \wedge a_3) \vee (0,9 \wedge a_4) \vee (0,6 \wedge a_5) \vee (0,5 \wedge a_6) \vee (0,5 \wedge a_7) \\
 0,6 &= (0,6 \wedge a_1) \vee (0,7 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \vee (0,7 \wedge a_5) \vee (0,7 \wedge a_6) \vee (0,5 \wedge a_7) \\
 0,5 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,3 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,4 \wedge a_4) \vee (0,2 \wedge a_5) \vee (0,3 \wedge a_6) \vee (0,3 \wedge a_7) \\
 0,7 &= (0,4 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,7 \wedge a_4) \vee (0,6 \wedge a_5) \vee (0,3 \wedge a_6) \vee (0,4 \wedge a_7) \\
 0,6 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,6 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,8 \wedge a_4) \vee (0,8 \wedge a_5) \vee (0,2 \wedge a_6) \vee (0,3 \wedge a_7) \\
 0,4 &= (0,6 \wedge a_1) \vee (0,9 \wedge a_2) \vee (0,4 \wedge a_3) \vee (0,3 \wedge a_4) \vee (0,4 \wedge a_5) \vee (0,8 \wedge a_6) \vee (0,4 \wedge a_7) \\
 0,8 &= (0,2 \wedge a_1) \vee (0,1 \wedge a_2) \vee (0,8 \wedge a_3) \vee (0,1 \wedge a_4) \vee (0,1 \wedge a_5) \vee (0,3 \wedge a_6) \vee (1 \wedge a_7)
 \end{aligned} \right\}$$

В этой системе нечетких уравнений  $\vee$  – операция логического максимума, а  $\wedge$  – операция логического минимума.

Решая полученную систему уравнений, получим следующие заключения.

Из первого уравнения имеем

$$0,4 \geq 0,9 \wedge a_4, a_4 \leq 0,4$$

Из второго уравнения

$$0,6 \geq 0,7 \wedge a_2, a_2 \leq 0,6$$

$$0,6 \geq 0,7 \wedge a_5, a_5 \leq 0,6$$

$$0,6 \geq 0,7 \wedge a_6, a_6 \leq 0,6$$

Из третьего уравнения

$$0,5 \geq 0,6 \wedge a_3, a_3 \leq 0,5$$

Из четвертого уравнения

$$0,7 \geq 0,8 \wedge a_2, a_2 \leq 0,7$$

Из пятого уравнения

$$0,6 \geq 0,8 \wedge a_4, a_4 \leq 0,6$$

$$0,6 \geq 0,8 \wedge a_5, a_5 \leq 0,6$$

Из шестого уравнения

$$0,4 \geq 0,9 \wedge a_2, a_2 \leq 0,7$$

Из седьмого уравнения

$$0,8 \geq 1 \wedge a_7, a_7 \leq 0,8$$

После решения системы уравнений получим

Возможная причина	ВСП
низкий уровень масла с принадлежностью	0,8
недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ с принадлежностью	0,7
перенапряжения и механические повреждения с принадлежностью	0,6
нарушение герметичности трансформатора с принадлежностью	0,5
снижение механической прочности изоляции с принадлежностью	0,4

Сравнение признаков удобно рассматривать как переменные не числами, а словами, с учетом истинности тех или иных отношений. При использовании матрицы отношений видно, что, если признак А имеет некоторое предпочтение над признаком В, то последний имеет обратную степень предпочтения над А. Решение системы уравнений на основе собственных чисел матрицы позволяет выбрать более достоверную, реальную причину возможного повреждения, как это показано в [92–93].

Решение матричных уравнений позволяет получить некоторое нечеткое множество, где каждая из возможных причин получает свое значение степени принадлежности нечеткого решения. Наибольшее из этих значений указывает первопричину неисправности оборудования, которые представлены на основе экспертных оценок.

### **3.7 Согласование экспертных оценок в задаче технической диагностики**

На первоначальном этапе диагностики текущего технического состояния электросетевого оборудования экспертные оценки представляют собой ключевой элемент перехода и совмещения от системы ППР к мониторингу состояния. При этом устанавливаются нечеткие отношения между признаками неисправностей (дефектов) и их возможными причинами. Специфика задачи определяется, главным образом, видом полученных оценок, а именно: причинно-следственных связей между контролируруемыми параметрами объекта и дефектами, способными повлечь за собой возможность дальнейшего функционирования электрооборудования. Большое внимание уделено степени согласованности экспертных оценок (мнений), которые определяют качество

экспертного заключения о текущем техническом состоянии исследуемого объекта. В связи с вышесказанным в настоящей работе проведено исследование конкретных реальных рекомендаций по применению статистических методов для анализа экспертных оценок в зависимости от текущего технического состояния электрооборудования.

Другой важной особенностью использования заключений экспертных оценок является проблема их согласованности. Она возникает особенно остро в тех случаях, когда ярко выражены противоречивость мнений и дуализм специалистов-теоретиков и специалистов, работающих в эксплуатации. Для проверки согласованности, вообще говоря, можно пойти разными путями, основные из которых изложены в [94–95].

**Оценка согласованности экспертных мнений на основе среднего квадратического отклонения.** Если число экспертов в группе равно ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), а число оцениваемых факторов - ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), то можно рассчитать оценку их согласованности по следующему алгоритму:

Расчет математического ожидания оценки  $j$ -го - фактора

$$M(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n},$$

где  $x_{ij}$  – оценка  $i$ -ого эксперта по  $j$ -ому фактору;  $n$  – количество экспертов.

Дисперсия оценки  $j$ -го - фактора

$$D(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - M(x_j))^2}{n - 1}.$$

Среднеквадратическое отклонение оценки  $j$ -го - фактора

$$\sigma(x_j) = \sqrt{D(x_j)}.$$

Коэффициент согласованности

$$\mu_j = 1 - \frac{\sigma(x_j)}{M(x_j)}.$$

Если среднее квадратическое отклонение  $\sigma(x_j)$  равно или превышает значение математического ожидания (среднего арифметического), то  $\mu_j \leq 0$ . Так как отрицательное значение коэффициента согласованности не имеет

никакого здравого смысла, то при анализе считается, что он равен 0, то есть отсутствует согласованность экспертов в группе по данному фактору. Значение  $\mu_j = 0,7 \div 0,9$ , говорит о высокой согласованности экспертов и отсутствии сговора между ними [96–97].

В качестве исходной информации приняты экспертные оценки, выраженные в виде нечётких причинно-следственных отношений (таблица 3.11), выражающие субъективную вероятность возникновения дефекта в электрооборудовании при отклонении от нормы контролируемых параметров.

Ниже приведены признаки и параметры дефектов, где  $X_i$  - это признаки,  $Y_i$  - контролируемые параметры.

$Y_1$  – выгорание витковой изоляции и витков обмотки трансформатора;

$Y_2$  – деформации в обмотках;

$Y_3$  – увлажнение и загрязнение изоляции обмоток;

$Y_4$  – износ изоляции обмоток.

$X_1$  – длительное неотключение сквозного тока КЗ на обмотках низшего напряжения трансформатора;

$X_2$  – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ;

$X_3$  – нарушение герметичности трансформатора;

$X_4$  – снижение механической прочности изоляции.

Таблица 3.11 – Принадлежности причин и повреждений обмотки трансформатора

Повреждения	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0,9	0,6	0,6	0,9
$Y_2$	0,5	0,8	0,6	0,6
$Y_3$	0,5	0,3	0,4	0,6
$Y_4$	0,4	0,8	0,4	0,7

Всего таких таблиц, а значит, и совокупностей мнений взято 7. Можно заметить, что одна целая таблица содержит в себе большое количество

информации, неудобной для анализа. Для упрощения анализа будем изолированно рассматривать возможности возникновения различных дефектов

В таблицах 3.12 – 3.19 приведены экспертные оценки семи экспертов для четырех параметров и их согласованность.

Таблица 3.12 – Оценки экспертов по первому параметру

$Y_1$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	1	0,9	0,8	0,5
2	0,7	0,5	0,4	0,7
3	0,5	0,5	0,3	0,6
4	1	0,4	0,4	0,6
5	0,6	0,5	0,4	0,6
6	0,5	0,3	0,3	0,6
7	0,7	0,4	0,3	1

Результаты расчетов приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Согласованность мнений экспертов по первому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\rho_j$
1	0,71	0,045	0,21	0,70
2	0,50	0,037	0,19	0,62
3	0,41	0,031	0,18	0,57
4	0,66	0,026	0,16	0,75

Таблица 3.14 – Оценки экспертов по второму параметру

$Y_2$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,7	1	0,4	0,9
2	0,4	0,9	0,7	0,7
3	0,5	0,7	0,5	0,5
4	0,4	0,6	0,4	0,4
5	0,9	0,9	0,7	0,5
6	0,5	0,8	0,6	0,4
7	1	0,9	0,5	0,9

Результаты расчетов приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Согласованность мнений экспертов по второму параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,63	0,059	0,24	0,61
2	0,83	0,019	0,14	0,83
3	0,54	0,016	0,13	0,77
4	0,61	0,048	0,22	0,64

Таблица 3.16 – Оценки экспертов по третьему параметру

$Y_3$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,6	0,2	0,2	0,3
2	0,6	0,4	0,3	0,7
3	0,4	0,5	0,4	0,6
4	0,4	0,2	0,4	0,5
5	0,4	0,2	0,5	0,3
6	0,5	0,2	0,4	0,3
7	0,5	0,3	0,3	0,4

Результаты расчетов приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Согласованность мнений экспертов по третьему параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,49	0,008	0,09	0,81
2	0,29	0,015	0,12	0,57
3	0,36	0,010	0,10	0,73
4	0,44	0,026	0,16	0,63

Таблица 3.18 – Оценки экспертов по четвертому параметру

$Y_4$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,4	0,9	0,9	0,5
2	0,5	0,8	0,4	0,6
3	0,5	0,5	0,4	0,4
4	1	0,7	0,5	0,7
5	0,5	0,6	0,4	0,5
6	0,5	0,7	0,5	1
7	0,9	0,5	0,9	0,8

Результаты расчетов приведены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Согласованность мнений экспертов по четвертому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,61	0,055	0,23	0,62
2	0,67	0,022	0,15	0,78
3	0,57	0,052	0,23	0,60
4	0,64	0,043	0,21	0,68

Анализируя значения коэффициентов согласованности, приведенных в таблицах 3.11 – 3.19, можно сделать вывод, что коэффициенты согласованности по параметрам 1, 2, 3, 4 не соответствуют рекомендуемому уровню согласованности. Это означает, что необходимо провести процедуру сближения оценок – метод Дельфи [96].

Далее выполнены процедуры сближения экспертных оценок; для некоторых параметров после двух, а для некоторых - после 3 процедур, получены новые коэффициенты согласованности мнений экспертов, которые приведены ниже в таблицах 3.20- 3.27.

Таблица 3.20 – Оценки экспертов по первому параметру

$Y_1$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,8	0,5	0,6	0,9
2	0,8	0,7	0,5	0,8
3	0,9	0,5	0,6	1
4	1	0,6	0,7	0,7
5	1	0,6	0,5	0,7
6	0,8	0,7	0,6	0,9
7	0,9	0,6	0,6	1

Результаты расчетов приведены в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Согласованность мнений экспертов по первому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,88	0,008	0,09	0,89
2	0,6	0,006	0,08	0,86
3	0,58	0,004	0,06	0,88
4	0,85	0,016	0,12	0,85

Таблица 3.22 – Оценки экспертов по второму параметру

$Y_2$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,5	0,8	0,6	0,6
2	0,4	0,7	0,7	0,5
3	0,6	0,8	0,6	0,7
4	0,6	0,9	0,5	0,9
5	0,6	0,9	0,7	0,6
6	0,5	0,8	0,6	0,6
7	0,6	0,7	0,5	0,6

Результаты расчетов приведены в таблице 3.23.

Таблица 3.23 – Согласованность мнений экспертов по второму параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,54	0,006	0,07	0,85
2	0,80	0,006	0,08	0,89
3	0,60	0,006	0,08	0,86
4	0,64	0,016	0,12	0,80

Таблица 3.24 – Оценки экспертов по третьему параметру

$Y_3$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,6	0,3	0,2	0,6
2	0,6	0,3	0,3	0,6
3	0,4	0,4	0,4	0,5
4	0,4	0,2	0,4	0,5
5	0,4	0,3	0,5	0,7
6	0,5	0,2	0,4	0,5
7	0,5	0,3	0,3	0,5



Результаты расчетов приведены в таблице 3.25.

Таблица 3.25 – Согласованность мнений экспертов по третьему параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,48	0,008	0,08	0,81
2	0,28	0,004	0,06	0,75
3	0,35	0,009	0,09	0,72
4	0,55	0,006	0,07	0,85

Таблица 3.26 – Оценки экспертов по четвертому параметру

$Y_4$	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Эксперты	1	2	3	4
1	0,4	0,9	0,5	0,7
2	0,3	0,8	0,4	0,6
3	0,5	0,7	0,4	0,5
4	0,4	0,8	0,5	0,7
5	0,5	0,7	0,4	0,6
6	0,4	0,7	0,5	0,7
7	0,5	0,8	0,4	0,8

Результаты расчетов приведены в таблице 3.27.

Таблица 3.27 – Согласованность мнений экспертов по четвертому параметру

Причины	$M(x_j)$	$D(x_j)$	$\sigma(x_j)$	$\mu_j$
1	0,88	0,008	0,09	0,89
2	0,60	0,006	0,08	0,86
3	0,58	0,004	0,06	0,88
4	0,85	0,016	0,12	0,85

Анализируя результаты обработки новых экспертных оценок, можно заключить, что они в хорошей степени согласованы, т.к. находятся в интервале 0,7 – 0,9 [96–97].

**Согласование экспертных оценок по Медиане Кемени.** Применение медианы Кемени базируется на вводе метрики в пространство мнений экспертов и аксиоматическом введении расстояния между элементами

множества мнений экспертов, причём важно, каким именно множеством представлены мнения, так как от этого зависит трудоёмкость задачи.

Каждая матрица парных сравнений представляется элементом множества  $P$  – множества экспертных мнений [98]. Либо, если вводить метрику и поместить элементы множества  $P$  в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично (на примере 5 экспертов) можно видеть на рисунке 3.7.

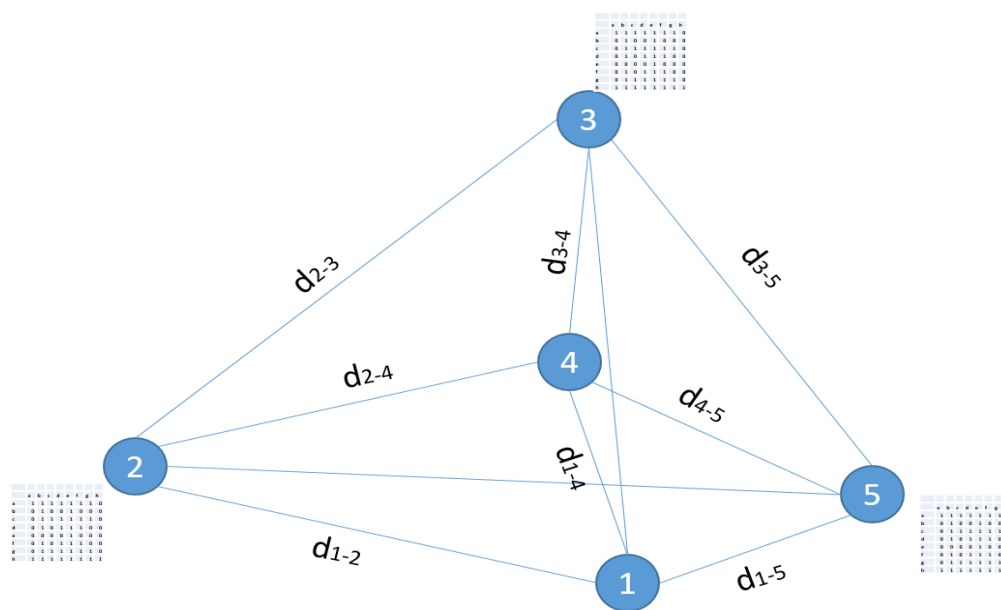


Рисунок 3.7 — Пространство экспертных мнений

Другими словами, каждая матрица парных сравнений – есть точка в пространстве экспертных мнений [98]. Далее аксиоматически вводится расстояние между двумя точками этого пространства, как сумма модулей разности всех элементов матриц, стоящих на эквивалентных позициях (3.5)

$$d(P_i, P_j) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n |p_{i,k,l} - p_{j,k,l}|, \quad (3.5)$$

где  $p_{k,l}$  – элемент матрицы парных сравнений,  $d$  – расстояние Кемени.

Тогда можно определить медиану Кемени как некоторый элемент множества  $P$ , наименее удалённый от всех остальных элементов, что математически можно трактовать как минимальную сумму расстояний от

фиксированного элемента множества  $P$  до всех остальных элементов данного множества

$$M^*(P_1, \dots, P_m) = \arg \min_P \sum_{i=1}^m d(P, P_i). \quad (3.6)$$

И, представив полученные расстояния в виде таблицы, по выражению (3.6) отыщем медиану Кемени.

Результаты расчетов медианы Кемени для каждого контролируемого параметра приведены в таблицах 3.28 – 3.35.

Таблица 3.28 – Медиана Кемени между мнением отдельного эксперта по отношению к другим, по первому параметру

№ эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Сумма расстояний	2,3	2,7	2,5	3,1	2,9	2,3	<b>2,2</b>

По первому признаку медианой оказалось мнение эксперта под № 7. Добавим совокупность оценок данного эксперта в таблицу 3.29.

Таблица 3.29 – Средние и медианные экспертные оценки по первого параметру

$Y_1$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Среднее арифметическое, $M(x_j)$	0,89	0,6	0,59	0,86
Медиана	0,9	0,6	0,6	0,8
Медиана Кемени: мнение эксперта №7	0,9	0,6	0,6	1

Таблица 3.30 – Медиана Кемени между мнением отдельного эксперта по отношению к другим, по второму параметру

№ эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Сумма расстояний	<b>1,8</b>	3,4	2	3,6	2,3	<b>1,8</b>	2,3

По второму признаку медианой оказались мнения экспертов под № 1 и №6. Включим оценки данных экспертов в таблицу 3.31.

Таблица 3.31 – Средние и медианные экспертные оценки по второму параметру

$Y_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Среднее арифметическое, $M(x_j)$	0,54	0,8	0,6	0,64
Медиана	0,6	0,8	0,6	0,6
Медиана Кемени: мнение эксперта №1	0,5	0,8	0,6	0,6
Медиана Кемени: мнение эксперта №6	0,5	0,8	0,6	0,6

Таблица 3.32 – Медиана Кемени между мнением отдельного эксперта по отношению к другим, по третьему параметру

№ эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Сумма расстояний	2,7	2,2	2,3	2,1	2,9	2,0	<b>1,8</b>

По третьему признаку медианой оказалось мнение эксперта под № 7. Добавим оценки эксперта №7 в таблицу 3.33.

Таблица 3.33 – Средние и медианные экспертные оценки по третьему параметру

$Y_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Среднее арифметическое, $M(x_j)$	0,48	0,28	0,35	0,55
Медиана	0,5	0,3	0,4	0,5
Медиана Кемени: мнение эксперта №7	0,5	0,3	0,3	0,5

Таблица 3.34 – Медиана Кемени между мнением отдельного эксперта по отношению к другим, по четвертому параметру

№ эксперта	1	2	3	4	5	6	7
Сумма расстояний	2,2	2,2	2,4	<b>1,7</b>	1,9	1,8	2,2

По четвертому признаку медианой оказалось мнение эксперта под № 4. Добавим совокупность оценок данного эксперта в таблицу 3.35.

Таблица 3.35 – Средние и медианные экспертные оценки по четвертому параметру

$Y_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Среднее арифметическое, $M(x_j)$	0,42	0,77	0,44	0,65
Медиана	0,4	0,8	0,4	0,7
Медиана Кемени: мнение эксперта №4	0,4	0,8	0,5	0,7

Анализируя полученные результаты (таблицы 3.28 – 3.35), вполне ожидаемо, что оценки эксперта, мнение которого является медианой Кемени иногда значительно отличается от средних арифметических и медианных оценок. Это позволяет сделать вывод о том, что высокая степень согласованности [99–100] является необходимым условием для целесообразности применения медианы Кемени и других непараметрических алгебраических методов [101–104].

Оценка согласованности экспертных мнений осуществляется по следующей формуле

$$(\text{ИН}) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{\sum_{k=1}^m |C_{ik} - C_{kk}|}{m} \right),$$

$$(\text{ОС}) = 1 - (\text{ИН}),$$

где (ИН) – индекс несогласованности; (ОС) – отношение согласованности;  $n$  – количество экспертов;  $m$  – количество признаков;  $i$  – текущий номер эксперта;  $k$  – текущий номер признака

Согласованными считаются оценки в диапазоне  $0,9 \leq \text{ОС} < 1$ . Не согласованными считаются оценки в пределах  $0,5 \leq \text{ОС} < 0,9$ .

При этом по Кемени определяется согласованность всей экспертизе.

Аналогичным образом выполнена процедура согласования экспертных оценок причинно-следственных отношений при текущей диагностике для других видов электрооборудования: выключателей и трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой (ВТСП).

### 3.8 Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что при наличии некоторых признаков неисправностей трансформаторного или коммутационного оборудования, а также лингвистической нечеткой оценки этих признаков экспертами, можно сделать некоторые выводы о причинах тех или иных неисправностей. Рассмотренные примеры доказывают приоритетность возможных причин предаварийного состояния, которое выражается значениями функции принадлежности в диапазоне от 0 до 1. Более объективный результат получен путем согласования отдельных экспертных оценок.

2. Оценка текущего технического состояния электросетевого оборудования и, в частности, трансформаторов, требует не только использования методов неразрушающего контроля, но также применения экспертных оценок. Эти оценки могут рассматриваться как некоторый предварительный диагноз отражающий опыт и знания технического эксперта. Оценки экспертов являются дополнительными логическими и аналитическими оценками с интуитивной и эвристической стороны. Основой экспертных оценок является их субъективность, которая позволяет приписывать различную субъективную вероятность причинно-следственных отношений. Это обусловлено тем, что отказы являются редким явлением, и для строгих математических оценок статистической выборки недостаточно. В связи с этим, необходимо было построить новую математическую модель на основе причинно-следственных отношений между симптомами и причинами дефектов. В принципе, предложенный метод позволяет осуществлять техническую диагностику любого электросетевого оборудования.

3. Доказано, что приоритет возможных причин предаварийного состояния может быть выражен значениями функции принадлежности лингвистических отношений в интервале от 0 до 1. Более объективный результат может быть

достигнут путем большей степени согласованности мнений в группе экспертов. В реальной действительности положение дел таково, что группы экспертов включают в себя «практиков и теоретиков». Обычно это приводит к существенному разбросу мнений или отдельным отклонениям.

4. Доказано, что высокая степень согласованности мнений в группе экспертов позволяет вполне обосновано полагаться на оценки экспертов в текущей технической диагностике электросетевого оборудования. При этом медиана Кемени позволяет определить мнение эксперта, интегрировано отражающее мнение всей экспертной группы. В этом случае мнения экспертов «диссидентов» будут отброшены, как ошибочные или некомпетентные. В работе предложено выполнять согласование оценок группы экспертов на основе медианы Кемени.

5. Предложенный в данной главе метод технической диагностики на основе нечеткой экспертной информации позволяет сделать наиболее правдоподобное предсказание и выбрать наиболее достоверную причину возникновения дефекта или неисправности (повреждения), при условии нескольких возможных альтернатив и критериев. Развитие данного метода свидетельствует о возможности обоснованного итогового принятия решений для трех важных случаев:

- исправное работоспособное состояние;
- неисправное работоспособное состояние (возможна дальнейшая эксплуатация оборудования с учащенным контролем параметров);
- предельное состояние (немедленный вывод оборудования из эксплуатации в капитальный ремонт или его замена).

## 4 РЕЖИМЫ И ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С КРИОГЕННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

### 4.1 Постановка задачи

В разделе представлены модели для анализа переходных процессов в электрических сетях, содержащих трансформаторы с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой. Важным преимуществом таких трансформаторов является способность ограничивать токи короткого замыкания при аварийных режимах в электрической сети [105–106]. Одной из главных идей и целей настоящей работы является исследование процесса ограничения токов короткого замыкания при помощи трансформатора с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой, что позволяет совместить в одном устройстве два последовательно включенных элемента: трансформатор и токоограничивающее устройство. Эффективность такого способа ограничения токов короткого замыкания обусловлена тем, что при токах короткого замыкания превышает критическое значение температуры сверхпроводниковой обмотки, и она переходит в обычное состояние с высоким сопротивлением обмотки, которое ограничивает ток короткого замыкания. Важно знать, когда сверхпроводник переходит в нормальное состояние при утрате сверхпроводимости. Для этой цели была разработана программа по определению количества тепла, выделяемого при протекании тока короткого замыкания до его отключения. Для трансформатора с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой мощностью 40 МВА короткое замыкание должно быть устранено через 10 миллисекунд без отключения трансформатора. Для ограничения тока короткого замыкания предлагается использовать гибридную обмотку дополнительно к основной обмотке. Выполненные исследования показали, что возвращение обмотки в сверхпроводящее состояние, прежде всего, зависит от соотношения токов короткого замыкания и рабочего тока. Это является критерием возврата/невозврата в сверхпроводящее состояние обмоток трансформатора. Наряду с этим обобщены преимущества трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводниковой обмоткой и



выражен оптимизм, что в краткосрочной перспективе они получат широкое применение как инновация в электроэнергетических системах.

Одним из преимуществ применения высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) трансформаторов наряду с высокими значениями допустимой плотности тока на единицу сечения проводника обмотки, является возможность ограничения величины тока короткого замыкания (КЗ) в аварийном режиме. Дополнительным преимуществом этих трансформаторов также является пожаро- и взрывобезопасность, что обусловлено заменой трансформаторного масла, как главной изоляции обмоток, на жидкий азот, который сам по себе является диэлектриком и имеет напряженность пробоя при температуре  $77^{\circ}\text{K}$ , равную  $20 \text{ кВ/мм}^2$ , что близко к характеристикам трансформаторного масла при нормальном режиме.

Ниже будут рассмотрены физическое и математическое обоснования возможности ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях, содержащих ВТСП трансформаторы. Это объясняется свойством сверхпроводящих обмоток, когда при превышении током определенного критического значения и создании при этом критического значения магнитного поля в сверхпроводнике, он теряет свои сверхпроводящие свойства, переходя в резистивное состояние. Такой переход сопряжен с различными режимами, которые необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации ВТСП трансформаторов [107-108].

При превышении протекающего по обмотке ВТСП трансформатора, критического тока  $I_k(T)$ , который определяется типом провода, величиной радиальной составляющей электромагнитного поля, величиной протекающего тока и температурой, ВТСП провод может перейти из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние, соответствующее нормальной температуре. При этом сопротивление сверхпроводящего слоя в проводе значительно увеличивается, и весь протекающий ток вытесняется в другие слои ВТСП провода. Так как сечения этих слоев недостаточно для пропускания тока, то сопротивление этого сечения значительно увеличивается, что приводит к ограничению тока КЗ. Основными параметрами токоограничивающей обмотки являются величина ограничиваемого тока, длительность тока КЗ, в течение

которого не происходит разрушения обмотки и допустимое увеличение температуры.

Рассмотрим ограничение токов КЗ с помощью трансформаторов с ВТСП обмотками при следующих допущениях [108]: ВТСП провод переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние равномерно по всей длине, все элементы сети, кроме ограничивающего сопротивления, являются линейными.

#### 4.2 Математическая модель исследования режимов трансформатора со сверхпроводящими обмотками

Высокотемпературные сверхпроводники являются неидеальными сверхпроводниками второго рода, т.е. переход из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние происходит не сразу, а имеется промежуточное смешанное состояние, при котором магнитное поле еще не полностью проникает в тело сверхпроводника (сверхпроводник является диамагнетиком, не пропускает внутрь магнитное поле). Смешанное состояние существует в пределах от первого критического тока  $I_{K1}$  до второго критического тока  $I_{K2}$ . В этом состоянии ток одновременно протекает как по сверхпроводящему слою проводника, так и по несверхпроводящим слоям проводника [109–111]. Тогда активное сопротивление ВТСП провода определяется эквивалентным сопротивлением сверхпроводящего слоя и несверхпроводящих слоев как параллельных линий.

$$R_{\Sigma}(I, T) = \frac{R_{НС}(T) * R_{СП}(I, T)}{R_{НС}(T) + R_{СП}(I, T)} \quad (4.1)$$

где  $R_{НС}$  – сопротивление несверхпроводящих слоев проводника обмотки;  $R_{СП}$  – сопротивление сверхпроводящего слоя проводника обмотки;  $I$  – рабочий ток, протекающий по проводнику;  $T$  – температура провода.

Сопротивление сверхпроводящего слоя проводника может быть определено из вольт-амперной характеристики ВТСП материала (рисунок 4.1).

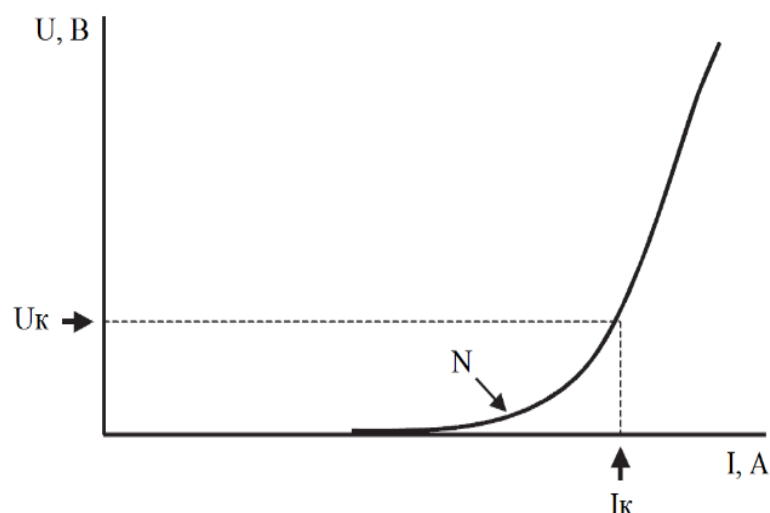


Рисунок 4.1 – Вольт-амперная характеристика ВТСП

$$R_{СП}(I, T) = 10^{-6} \left( \frac{I}{I_K(T)} \right)^n * \frac{1}{I} \quad (4.2)$$

$$I_K(T) = -\frac{I_{K0}}{0,1848} \ln \left( \frac{T}{77} \right) \quad (4.3)$$

где  $n$  – показатель степени вольт-амперной характеристики ВТСП провода, определяющий качество сверхпроводника;  $I_K(T)$  – критический ток ВТСП провода при температуре  $T$  (при температурах свыше 90 К  $I_K(T)$  равно нулю);  $I_{K0}$  – критический ток в собственном поле при 77 К.

Активное сопротивление несверхпроводящих слоев определяется как эквивалентное сопротивление всех слоев, имеющих параллельное соединение в ВТСП ленте обмотки трансформатора.

$$R_{нс} = \frac{1}{1/R_{бс}(T) + 1/R_{Ag}(T) + 1/R_M(T) + 1/R_{хаст}(T)} \quad (4.4)$$

где  $R_{БС}(T)$  – сопротивление буферных слоев;  $R_{Ag}(T)$  – сопротивление слоя серебра;  $R_M(T)$  – сопротивление медного слоя;  $R_{Хаст}(T)$  – сопротивление хастеллоя.

На рисунке 4.2 приведены зависимости удельных сопротивлений серебра, меди, стали и хастеллоя от температуры по Кельвину. При этом в расчете

удельных сопротивлений несверхпроводящего слоя можно допустить линейную зависимость на участке температур, которая ниже 100 К. В этом случае удельное сопротивление слоя можно рассчитать по следующей формуле

$$R(T) = \frac{\rho(T)}{ab} \quad (4.5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление слоя с учетом температурного коэффициента электрического сопротивления;  $a$  и  $b$  – ширина, и толщина соответствующего слоя проводника.

Для проведения расчетов с ВТСП трансформаторами очень важно знать, когда сверхпроводник, на основе которого выполнена сверхпроводниковая обмотка, переходит в обычное состояние. Это возможно при длительно не отключенных токах КЗ, что ведет к избыточному нагреву проводников обмотки ВТСП трансформатора и потере им сверхпроводящего состояния и утрате достоинств и преимуществ сверхпроводимости (рисунок 4.2). Принято считать, что ВТСП проводник переходит в нормальное состояние в случае, когда на проводе длиной один сантиметр возникает напряжение один микровольт.

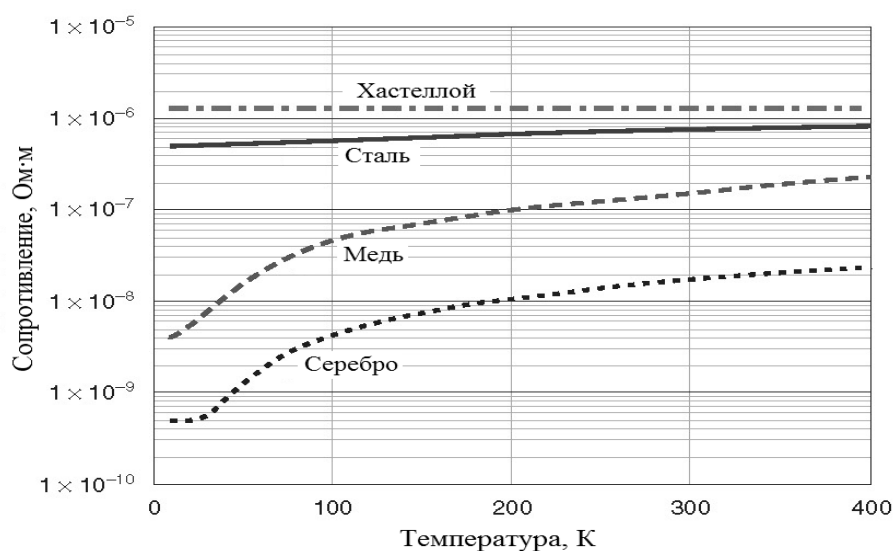


Рисунок 4.2 – Зависимость сопротивлений металлов от температуры

Для улучшения условий возвращения проводника в сверхпроводящее состояние во время бестоковой паузы или под нагрузкой необходимо

определить количество тепла, выделившегося во время тока КЗ до его отключения. С этой целью была разработана модель в программе Matlab в предположении, что КЗ происходит на отходящем присоединении ВТСП трансформатора мощностью 40 МВА, которое устраняется через 0,1 секунды, не отключая трансформаторы.

В работе для ограничения тока КЗ предлагается использовать гибридную обмотку, в которой в ограничении участвует только часть витков обмотки. Этого можно достичь использованием различных проводов с различными параметрами, при которых нетокоограничивающая часть в нормальном состоянии обладает незначительным сопротивлением, а токоограничивающая часть в нормальном состоянии обладает существенным сопротивлением для ограничения тока КЗ.

Такое конструктивное исполнение обмотки ВТСП трансформатора позволяет объединить два элемента электрической сети, обычно включенных последовательно в одно устройство, с функцией трансформации и ограничения токов КЗ (рисунок 4.3).

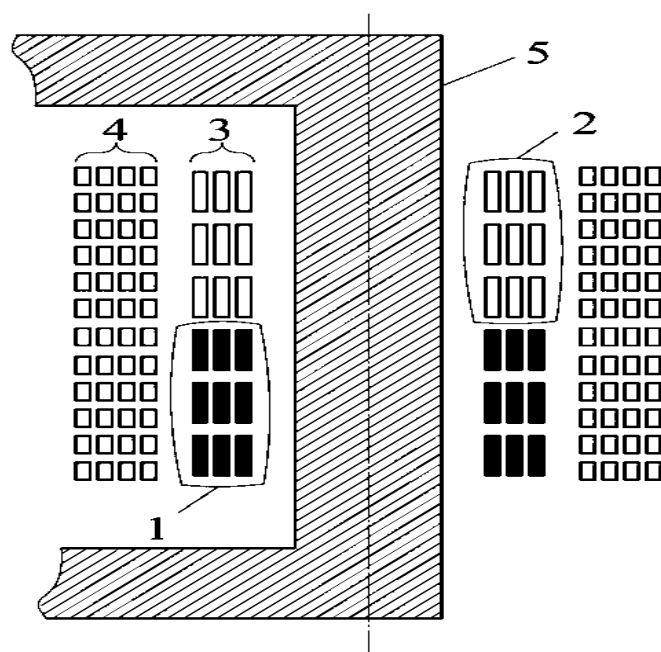


Рисунок 4.3 – Схематичный вид СП трансформатора: 1 – токоограничивающая часть обмотки, 2 – трансформаторная часть обмотки, 3 – обмотка низкого напряжения, 4 – обмотка высокого напряжения, 5 – магнитопровод.

При известном  $R_{\varnothing}(I, T)$  может быть найдена длина кабеля в ограничивающем слое обмотки.

$$L_{ПП} = \frac{R_{Ozp} n_B n_{III}}{R_{\varnothing}(I, T)} \quad (4.6)$$

где  $R_{Ozp}$  – требуемое сопротивление для ограничения тока КЗ;  $n_B$  и  $n_{III}$  – число слоев в обмотке по высоте и ширине соответственно.

Число витков обмотки, задействованных в ограничении тока КЗ

$$w = \frac{L_{ПП}}{2\pi r_B} \quad (4.7)$$

где  $r_B$  – средний радиус витка.

Для расчета переходного процесса при КЗ с участием ВТСП трансформатора выбрана следующая схема замещения (рисунок 4.4).

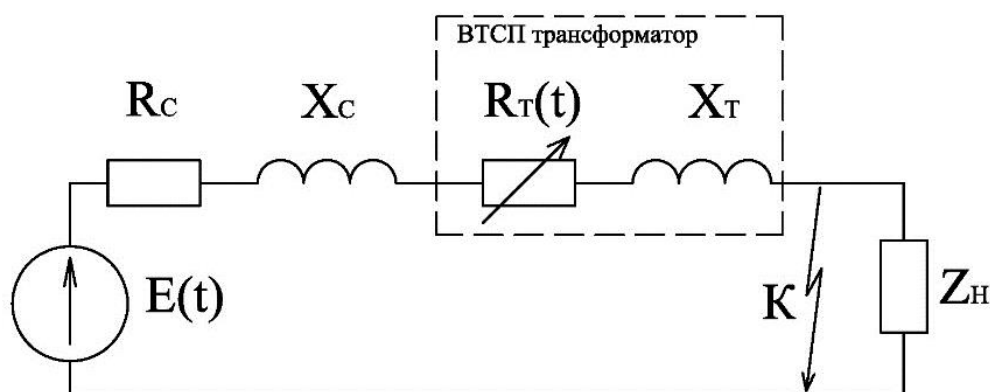


Рисунок 4.4 – Схема замещения для расчета переходного процесса

Переходный процесс для данной схемы при возникновении КЗ описывается следующим дифференциальным уравнением [112]

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_C + L_T) \frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_C + R_T(T)) \quad (4.8)$$

где  $R_C$  и  $L_C$  – активное сопротивление и индуктивность системы;  $R_T$  и  $L_T$  – активное сопротивление и индуктивность трансформатора.

Короткое замыкание моделируется замыканием ключа, шунтирующим нагрузку. Решение уравнения (4.8) имеет следующий вид

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \phi_K) + \left[ \frac{U_m}{Z_K} \sin(\alpha - \phi_H) - \frac{U_m}{Z_K} \sin(\alpha - \phi_K) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$$

где  $Z_K$  – полное сопротивление короткозамкнутого участка.

Кривые изменения тока КЗ без его ограничения и с ограничением приведены на рисунке 4.5.

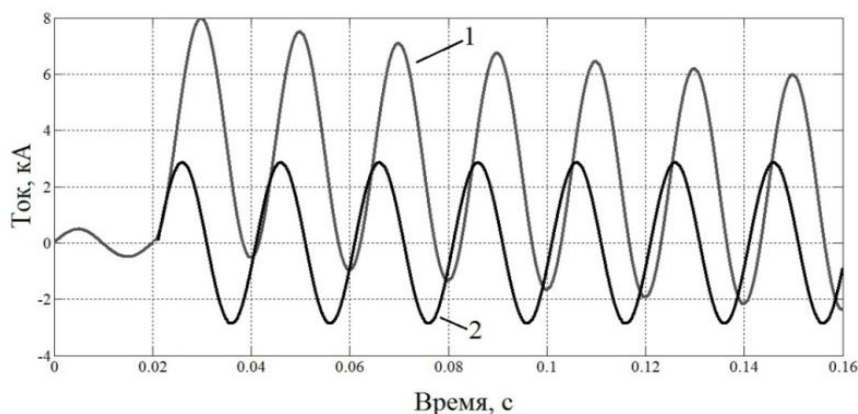


Рисунок 4.5 – Кривые изменения тока КЗ без ограничения (1) и с ограничением (2)

### 4.3 Электромагнитные переходные процессы в сверхпроводниковом трансформаторе как ограничителя тока короткого замыкания

В настоящее время на основе значительных достижений в области высокотемпературной сверхпроводимости появляется всё больше применений данного явления в электроэнергетике, в частности, в виде сверхпроводниковых токоограничителей. Для исследования процесса продольного токоограничения в электрических сетях, содержащих сверхпроводниковый токоограничитель или токоограничитель, интегрированный в ВТСП трансформатор, крайне важным является оценка электродинамического и теплового воздействия тока короткого замыкания в произвольный момент времени. Существующие в настоящее время математические модели сверхпроводниковых ограничителей не отражают инерционности перехода устройства из сверхпроводящего состояния в проводящее. Для поставленной задачи необходимо создать математическую модель для расчёта электромагнитного переходного процесса,

способную адекватно моделировать устройство в произвольный момент времени, учитывая его параметры в нормальном и аварийном режимах, а также описывать динамику изменений этих параметров в ходе процесса токоограничения. Предложенная математическая модель позволяет моделировать инерционность изменения сопротивления устройства сверхпроводникового токоограничителя, аналитически описывать электромагнитный переходный процесс, а также оценить электродинамическое и тепловое воздействия тока короткого замыкания при наличии сверхпроводникового токоограничителя [113–116]. Отличительной особенностью математической модели является учет скорости нарастания (инерционности) индуктивного сопротивления по отношению к внешней сети при переходе из сверхпроводящего состояния токоограничителя в естественное проводящее. Также модель позволяет учесть начальную и конечную величины индуктивности сверхпроводникового токоограничителя до начала и после окончания электромагнитного переходного процесса соответственно. Рассмотрим схему, содержащую СОТ (рисунок 4.6).

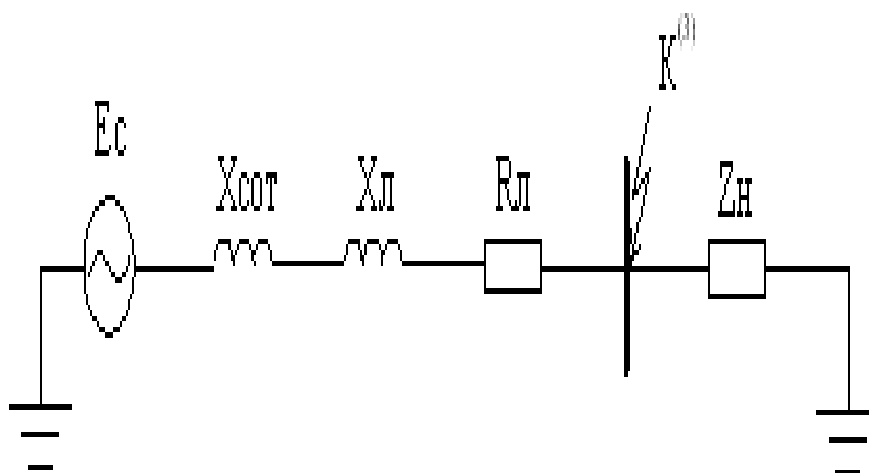


Рисунок 4.6 – Однолинейная схема для построения математической модели

$E_C$  – электродвижущая сила (ЭДС) источника напряжения;  $X_{СОТ}$  – индуктивное сопротивление СОТ;  $X_{Л}$  – индуктивное сопротивление КЛ;  $R_{Л}$  – активное сопротивление КЛ;  $Z_{Н}$  – комплексное сопротивление нагрузки потребителя.



По второму закону Кирхгофа имеем

$$E(t) = \frac{d\psi_{COГ}(t)}{dt} + \frac{d\psi_K(t)}{dt} + i(t) \cdot R_K, \quad (4.9)$$

где  $\psi_{COГ}$  и  $\psi_K$  – потокосцепления COГ и КЛ соответственно;  $R_K$  – активное сопротивление КЛ.

Потокосцепление кабеля с учётом того, что его индуктивность не зависит от протекающего тока, будет зависеть только от тока

$$\psi_K(t) = L_K(t) \cdot i(t) = L_K \cdot i(t). \quad (4.10)$$

Потокосцепление же COГ будет зависеть как от изменяющейся индуктивности, так и от тока

$$\psi_{COГ}(t) = L_{COГ}(t) \cdot i(t). \quad (4.11)$$

С учётом вышеприведённых уравнений получаем дифференциальное уравнение переходного процесса

$$E(t) = \frac{d[L_{COГ}(t) \cdot i(t)]}{dt} + \frac{d[L_K(t) \cdot i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K. \quad (4.12)$$

С учётом свойства производной произведения двух функций преобразуем дифференциальное уравнение

$$E(t) = \frac{d[L_{COГ}(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_{COГ}(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{d[L_K(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_K(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K.$$

Исходя из физической природы индуктивности, а также в виду того, что индуктивность кабеля не зависит от времени, выражение (4.12) несколько упрощается

$$E(t) = \frac{d[L_{COГ}(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_{COГ}(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + L_K(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K.$$

Как известно, для того, чтобы нарушить сверхпроводящее состояние необходимо увеличить либо температуру, либо величину воздействующего магнитного поля (рисунок 4.7). В быстродействующих COГ используется как раз увеличение магнитного поля в момент КЗ в сети.

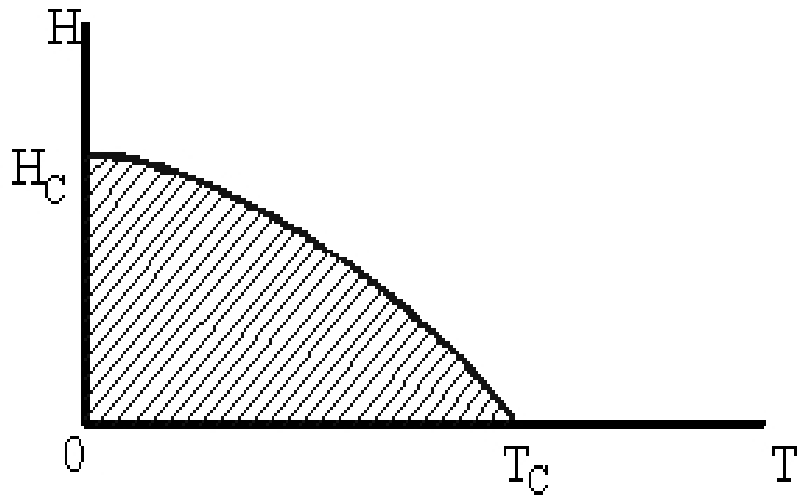


Рисунок 4.7 – Область существования сверхпроводимости:

$H_c$  – критическая сила магнитного поля;  $T_c$  – критическая температура.

При приближённых расчётах ранее было принято полагать, что индуктивность СОР изменяется мгновенно (без инерции), как это показано на рисунке 4.8. с помощью применения функции Хевисайда, однако это не позволяло учитывать влияние СОР на переходный процесс при токоограничении.

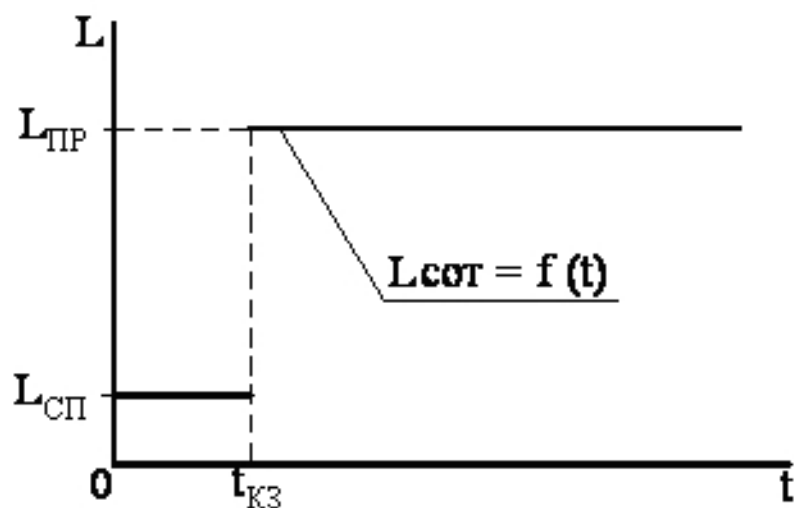


Рисунок 4.8 – Упрощённое (безынерционное) изменение индуктивности СОР в момент короткого замыкания

Что более важно, подобный подход не допускает математического описания электромагнитного переходного процесса в форме одного аналитического выражения (из-за невозможности дифференцировать скачкообразную функцию), а значит, не позволяет рассчитывать мгновенные значения тока и напряжения, результирующие величины электродинамического и теплового воздействий тока КЗ на электрооборудование, время отключения с помощью выключателя ограниченного СОР аварийного тока.

В работах исследователей в области применения сверхпроводниковых токоограничителях того или иного типа приводятся различные модели электрических параметров данных устройств. Во всех работах температура сверхпроводящего элемента в момент короткого замыкания начинает плавно и монотонно возрастать по зависимости, близкой к экспоненциальной, с температурой возрастает и внешнее сопротивление СОР. Анализ зависимостей внешнего сопротивления СОР позволяет сделать вывод о целесообразности введения адекватной физическому процессу, монотонной, легко интегрируемой и дифференцируемой функции. В качестве такой функции может быть применена экспонента, как это изображено на рисунке 4.9. Экспоненциальная функция выбрана как соответствующая физике процесса, а также позволяющая ввести понятие «постоянной времени реагирования» СОР.

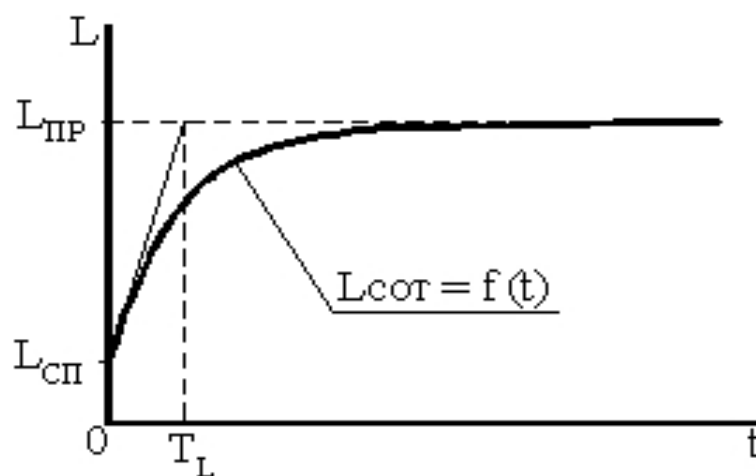


Рисунок 4.9 – Математическая модель изменения индуктивности СОР при КЗ в сети

Тогда изменение индуктивности СОТ как функции времени

$$L_{СОТ}(t) = L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}, \quad (4.13)$$

где  $L_{СП}$  – индуктивность СОТ в сверхпроводящем состоянии;  $L_{ПП}$  – индуктивность СОТ в проводящем состоянии;  $T_L$  – постоянная времени реагирования сверхпроводника.

Как следствие, возможное с математической точки зрения применение метода припасовывания для решения задачи отыскания параметров электромагнитного переходного процесса при учёте индуктивности СОТ изображённой на рисунке 4.8 функцией приведёт к погрешности в определении величин параметров переходного процесса из-за недоучёта физических особенностей изменения индуктивности СОТ [117]. В это же время решение поставленной задачи, даже с учётом изображённой на рис. 4.9 модели изменения индуктивности СОТ, численными методами не является достаточно наглядным с точки зрения влияния динамики изменения индуктивности СОТ на электромагнитный переходный процесс. Как следствие, в качестве окончательной модели, описывающей изменение индуктивности СОТ, принимается экспоненциальная модель, а отыскание составляющих переходного процесса будет производиться решением дифференциального уравнения.

С учётом выражения (4.13) для индуктивности СОТ дифференциальное уравнение переходного процесса приобретает в

$$E(t) = \frac{d \left[ L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]}{dt} \cdot i(t) + \left[ L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + L_K \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (4.14)$$

Учитывая подобные слагаемые относительно тока и его производной, получим

$$E(t) = \left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} - \left[ \frac{(L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} - R_K \right] \cdot i(t)$$

Уравнение (4.14) является неоднородным линейным дифференциальным уравнением.

В общем случае неоднородное линейное дифференциальное уравнение может быть записано в виде

$$\frac{dy}{dx} + P(x) \cdot y = Q(x) \quad (4.15)$$

Решение такого уравнения находится в виде

$$y = e^{-\int P(x)dx} \cdot \left[ \int Q(x) \cdot e^{\int P(x)dx} dx + C \right] \quad (4.16)$$

Преобразуем уравнение (4.14) к виду уравнения (4.16)

$$\begin{aligned} \frac{d[i(t)]}{dt} + \frac{\left[ R_K - \frac{(L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \cdot i(t) &= \\ &= \frac{E(t)}{\left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Таким образом, в виде общего случая неоднородного дифференциального уравнения (4.16) с заменой  $y$  на  $i$  и  $x$  на  $t$

$$P(t) = \frac{\left[ R_K - \frac{(L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}}{T_L} \right]}{\left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (4.18)$$

$$Q(t) = \frac{E(t)}{\left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right]} \quad (4.19)$$

Определим  $\int P(t)$ . Интеграл такого вида равен

$$\int \frac{dt}{a + b \cdot e^{pt}} = \frac{t}{a} - \frac{1}{a \cdot p} \cdot \ln |a + b \cdot e^{pt}| \quad (4.20)$$

Если  $a = L_K + L_{\Pi P}$ ,  $b = (L_{C\Pi} - L_{\Pi P})$ ,  $p = \frac{-1}{T_L}$ , то

$$\begin{aligned} & \int \left( \frac{1}{L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}} \right) \cdot dt = \\ & = \frac{t}{L_K + L_{\Pi P}} - \frac{t}{(L_K + L_{\Pi P}) \frac{(-1)}{T_L}} \cdot \ln \left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + \quad (4.21) \\ & + C = \frac{t}{L_K + L_{\Pi P}} + \frac{T_L}{(L_K + L_{\Pi P})} \cdot \ln \left[ L_K + L_{\Pi P} + (L_{C\Pi} - L_{\Pi P}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}} \right] + C \end{aligned}$$

Сгруппировав все константы в одну, получаем выражение для свободной составляющей тока замыкания

$$\int P(t)dt = \left[ \begin{aligned} & \frac{t}{T_L} - \ln \left[ T_L + \frac{T_L \cdot (L_K + L_{ПП})}{(L_{СП} - L_{ПП})} \cdot e^{\frac{t}{T_L}} \right] - \\ & - \frac{R_K \cdot t}{L_K + L_{ПП}} - \\ & - \frac{R_K \cdot T_L}{(L_K + L_{ПП})} \cdot \ln \left[ L_K + L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{\frac{t}{T_L}} \right] + C \end{aligned} \right] \quad (4.22)$$

В итоге решение уравнения электромагнитного переходного процесса будет выглядеть в виде

$$i(t) = e^{-\int P(t)dt} \cdot \left[ \int Q(t) \cdot e^{-\int P(t)dt} dt + C \right], \quad (4.23)$$

где  $Q(t) = \frac{E(t)}{\left[ L_K + L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{\frac{t}{T_L}} \right]}$ ,

$C$  – константа после взятия интеграла (определяется путём задания начальных условий решения задачи).

Если в выражении (4.23) заменить неопределённое интегрирование интегрированием в пределах от 0 до  $t$ , то получится решение, принимающее значение  $C$  при  $t = 0$ .

Решение уравнения легче всего получить с применением численных методов.

#### 4.4 Нечеткие диагностические модели трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой

Принцип построения нечетких моделей для диагностики трансформаторов подробно изложен в третьей главе. В настоящей главе этот принцип построения адаптирован к ВТСП трансформаторам, в связи с тем, что кардинальным образом изменяется изолирующая среда, так как вместо масла используется жидкий азот ( $77^\circ \text{ К}$ ). Диэлектрические свойства этих двух

изолирующих сред примерно одинаковы, но становится невозможным использование в качестве диагностического средства технологию диагностики, основанную на анализе растворенных газов в масла (ХАРГ). В связи с этим, математическая модель, основанная на экспертных оценках, приобретает большую актуальность для оценки текущего технического состояния электросетевого оборудования.

Рассмотрим набор следующих возможных повреждений, обнаруживаемых у ВТСП трансформаторов (таблица 4.1):

$Y_1$  – выгорание витковой изоляции и витков обмотки трансформатора;

$Y_2$  – закипание азота;

$Y_3$  – износ изоляции обмоток;

$Y_4$  – пробой в обмотках.

Возможные причины появления того или иного повреждения могут быть следующие:

$X_1$  – низкий уровень азота;

$X_2$  – длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора;

$X_3$  – перенапряжения;

$X_4$  – нарушение работы охлаждающей установки;

$X_5$  – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ.

Таблица 4.1 – Принадлежности причин и повреждений обмотки трансформатора

Повреждения	Причины				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$Y_1$	0,8	0,9	0,6	0,7	0,7
$Y_2$	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6
$Y_3$	0,5	0,6	0,8	0,6	0,5
$Y_4$	0,5	0,8	0,7	0,6	0,8



Детерминистические отношения между причиной и следствием рассматриваются как 1, отсутствие связи как 0, другие нечеткие отношения как промежуточные значения между 0 и 1. Допустим, знания эксперта по эксплуатации и диагностике силовых трансформаторов в форме нечетких отношений причин и следствий имеют следующий вид

$$R = \begin{matrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,8 & 0,6 & 0,5 & 0,5 \\ 0,9 & 0,7 & 0,6 & 0,8 \\ 0,6 & 0,5 & 0,8 & 0,7 \\ 0,7 & 0,8 & 0,6 & 0,6 \\ 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,8 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

**Метод решения.** Допустим, в результате осмотра трансформатора эксперт оценивает его техническое состояние через следующие отношения возможных причин и следствий

$$B = 0,4 / Y_1 + 0,8 / Y_2 + 0,3 / Y_3 + 0,9 / Y_4,$$

Требуется определить возможную причину такого состояния на основе уравнения

$$A = a_1 / X_1 + a_2 / X_2 + a_3 / X_3 + a_4 / X_4 + a_5 / X_5,$$

Уравнение нечетких отношений введенных нечетких множеств можно представить в виде

$$[0,4 \quad 0,8 \quad 0,3 \quad 0,9] = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5] \cdot \begin{bmatrix} 0,8 & 0,6 & 0,5 & 0,5 \\ 0,9 & 0,7 & 0,6 & 0,8 \\ 0,6 & 0,5 & 0,8 & 0,7 \\ 0,7 & 0,8 & 0,6 & 0,6 \\ 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,8 \end{bmatrix}$$

либо, транспонируя, в виде нечетких векторов – столбцов

$$\begin{bmatrix} 0,4 \\ 0,8 \\ 0,3 \\ 0,9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,9 & 0,6 & 0,7 & 0,7 \\ 0,6 & 0,7 & 0,5 & 0,8 & 0,6 \\ 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,6 & 0,5 \\ 0,5 & 0,8 & 0,7 & 0,6 & 0,8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}$$

При использовании макси-минной (max-min) - композиции последнее соотношение преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} 0,4 &= (0,8 \wedge a_1) \vee (0,9 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,7 \wedge a_4) \vee (0,7 \wedge a_5) \\ 0,8 &= (0,6 \wedge a_1) \vee (0,7 \wedge a_2) \vee (0,5 \wedge a_3) \vee (0,8 \wedge a_4) \vee (0,6 \wedge a_5) \\ 0,3 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,6 \wedge a_2) \vee (0,8 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \vee (0,5 \wedge a_5) \\ 0,9 &= (0,5 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,7 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \vee (0,8 \wedge a_5) \end{aligned} \right\}$$

Из первого уравнения получим

$$0,4 \geq 0,9 \wedge a_2, a_2 \leq 0,4.$$

Из второго уравнения

$$0,8 = 0,8 \wedge a_4, a_4 = 0,8.$$

Из третьего уравнения

$$0,3 \geq 0,8 \wedge a_3, a_3 \leq 0,3,$$

Из четвертого уравнения

$$0,9 = 0,8 \wedge a_2, a_2 = 0,9.$$

$$0,9 = 0,8 \wedge a_5, a_5 = 0,9.$$

Решение системы уравнений дает следующий вектор - столбец приоритетности (ВПС) возможных причин возникновения дефектов

Возможная причина	ВСП
длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора и недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ с принадлежностью	0,9
нарушение работы охлаждающей установки с принадлежностью	0,8
Перенапряжения с принадлежностью	0,3

Можно также построить дополнительную ступень иерархии других причинно-следственных отношений, основанную на том, что некоторые причины на первой ступени иерархии сами являются следствием некоторых более глубоких причин. Такой подход является совершенно новым развитием соотношения признаков дефектов и причинами, которыми они обусловлены.

Неисправности, обнаруженные у ВТСП трансформатора, будут следующими (таблица 4.2):

$Y_1$  – низкий уровень азота;  $Y_2$  – длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора;  $Y_3$  – перенапряжения;  $Y_4$  – нарушение работы охлаждающей установки;  $Y_5$  – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ.

Перечень причин возникновения той или иной неисправности приводится ниже в соответствии с вышеуказанными следствиями:

$X_1$  – низкая чувствительность релейной защиты и ее несрабатывание;  $X_2$  – нарушение герметичности корпуса;  $X_3$  – отсутствие или несрабатывание ОПН;  $X_4$  – нарушение регламента эксплуатации охлаждающей установки.

Исходя из выше изложенного, можно составить структурную схему матриц нечетких отношений между причинами (повреждениями) и их следствиями, используя теорию нечетких отношений и экспертные оценки возможных причин повреждения.

Таблица 4.2 – Принадлежности причин и повреждений трансформатора

Повреждения	Причины			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0,1	0,9	0,1	0,4
$Y_2$	0,9	0,3	0,3	0,2
$Y_3$	0,7	0,7	1,0	0,6
$Y_4$	0,2	0,6	0,5	0,9
$Y_5$	0,7	0,2	0,6	0,3

Рассмотрим пример, когда знания эксперта по диагностике после осмотра высоковольтного выключателя имеют вид нечетких отношений причин и следствий

$$R = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{ccccc} Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 & Y_5 \\ \begin{bmatrix} 0,1 & 0,9 & 0,7 & 0,2 & 0,7 \\ 0,9 & 0,3 & 0,7 & 0,6 & 0,2 \\ 0,1 & 0,3 & 1,0 & 0,5 & 0,6 \\ 0,4 & 0,2 & 0,6 & 0,9 & 0,3 \end{bmatrix} \end{array}$$

В результате осмотра выключателя его состояние можно оценить, как функцию принадлежности

$$B = 0,9 / Y_1 + 0,7 / Y_2 + 0,3 / Y_3 + 0,5 / Y_4 + 0,8 / Y_5$$

Требуется определить возможную причину такого состояния

$$A = a_1 / X_1 + a_2 / X_2 + a_3 / X_3 + a_4 / X_4$$

Отношение введенных нечетких множеств можно представить в виде

$$[0,9 \quad 0,7 \quad 0,3 \quad 0,5 \quad 0,8] = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \cdot \begin{bmatrix} 0,1 & 0,9 & 0,7 & 0,2 & 0,7 \\ 0,9 & 0,3 & 0,7 & 0,6 & 0,2 \\ 0,1 & 0,3 & 1,0 & 0,5 & 0,6 \\ 0,4 & 0,2 & 0,6 & 0,9 & 0,3 \end{bmatrix}$$

либо, транспонируя, в виде нечетких векторов – столбцов

$$\begin{bmatrix} 0,9 \\ 0,7 \\ 0,3 \\ 0,5 \\ 0,8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,9 & 0,1 & 0,4 \\ 0,9 & 0,3 & 0,3 & 0,2 \\ 0,7 & 0,7 & 1,0 & 0,6 \\ 0,2 & 0,6 & 0,5 & 0,9 \\ 0,7 & 0,2 & 0,6 & 0,3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

При использовании (max - min) - композиции (взятие максимума из минимума) последнее соотношение преобразуется к виду

$$\left. \begin{array}{l} 0,9 = (0,1 \wedge a_1) \vee (0,9 \wedge a_2) \vee (0,1 \wedge a_3) \vee (0,4 \wedge a_4) \\ 0,7 = (0,9 \wedge a_1) \vee (0,3 \wedge a_2) \vee (0,3 \wedge a_3) \vee (0,2 \wedge a_4) \\ 0,3 = (0,7 \wedge a_1) \vee (0,7 \wedge a_2) \vee (1,0 \wedge a_3) \vee (0,6 \wedge a_4) \\ 0,5 = (0,2 \wedge a_1) \vee (0,6 \wedge a_2) \vee (0,5 \wedge a_3) \vee (0,9 \wedge a_4) \\ 0,8 = (0,7 \wedge a_1) \vee (0,2 \wedge a_2) \vee (0,6 \wedge a_3) \vee (0,3 \wedge a_4) \end{array} \right\}$$

Из первого уравнения получим

$$0,9 = 0,9 \wedge a_2, a_2 = 0,9$$

Из второго уравнения

$$0,7 \geq 0,9 \wedge a_1, a_1 \leq 0,7$$

Из третьего уравнения

$$0,3 \geq 1 \wedge a_3, a_3 \leq 0,3$$

Из четвертого уравнения

$$0,5 \geq 0,9 \wedge a_4, a_4 \leq 0,5$$

Из пятого уравнения

$$0,8 \geq 0,7 \wedge a_1, a_1 \leq 0,8$$

Решение нечетких уравнений позволяет установить следующую приоритетность причин дефектов для выключателей

Возможная причина	ВСП
нарушение герметичности корпуса с принадлежностью	0,9
низкая чувствительность релейной защиты и ее несрабатывание с принадлежностью	0,8
нарушение регламента эксплуатации охлаждающей установки с принадлежностью	0,5
отсутствие или несрабатывание ОПН	0,3

#### **4.5 Диагностическая модель трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой на основе метода иерархии**

Принятие решения – вид деятельности, включающий в себя процесс сбора, анализа информации об объекте, и выбор наиболее оптимального варианта из имеющихся и возможных. Принятие решений на основе экспертных оценок может быть произведено после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности [118–120].

Метод анализа иерархий предполагает некоторую иерархию причин и следствий, в данном случае дефектов и причин их возникновения. Иерархия определяется тем, что причины возникновения дефектов, в свою очередь, являются следствием каких-то более глубоких причин. Анализируя новые

причины, мы поднимаемся на новый уровень иерархии. Число ступеней иерархии определяется лицом, принимающим решение.

Введем термин «оценка текущего технического состояния», включающий в себя сбор данных с трансформаторного оборудования, находящегося в работе, и анализ их для получения определенного вывода о техническом состоянии оборудования. Такая диагностика осуществляется после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности [121].

На первоначальном этапе производится попарное сравнение признаков между собой для каждой из возможных причин. Сравнение этих признаков по фундаментальной шкале Саати проводится в соответствии с девятью степенями предпочтения, где 1 – примерное равенство (эквивалентность), 9 – абсолютное превосходство. При сравнении элемента с самим собой имеем равную значимость (эквивалентность), в этом случае на пересечении строки  $A$  со столбцом  $A$  в позиции  $(A, A)$  ставим 1. В связи с этим, главная диагональ матрицы должна состоять из единиц. Под главной диагональю помещаются величины, обратные соответствующим элементам попарных сравнений, которые расположены выше главной диагонали. Вносим соответствующие обратные величины: 1,  $1/3$ , ..., или  $1/9$  [122].

Затем на основе матрицы попарных сравнений необходимо определить вектор - столбец приоритетов (ВСП) признаков неисправностей для каждой из возможных причин. С математической точки зрения, это вычисление главного собственного вектора, после нормализации становится вектором приоритетов.

После умножения матрицы попарных сравнений на вектор - столбец приоритетов, получим новый вектор собственных значений, разделив первую компоненту этого вектора на первую компоненту оценки вектора решения, вторую компоненту нового вектора на вторую компоненту оценки вектора решения. Таким образом определяем вектор - столбец собственных значений матрицы [123]. Разделив сумму компонент этого вектора на число компонент, найдем приближение к числу  $\lambda_{\max}$  (называемому максимальным или главным собственным значением), используемому для оценки согласованности, отражающей пропорциональность предпочтений. Чем ближе  $\lambda_{\max}$  к  $n$  (числу

объектов или видов действия в матрице), тем более согласованным будет результат [124]. Отклонение от согласованности может быть вычислено следующим образом

$$(\lambda_{\max} - n) / (n - 1).$$

Эта величина называется индексом согласованности (ИС). Далее по методу анализа иерархий Саати необходимо перейти к отношению согласованности (ОС). Это ОС определяется путем деления ИС на константу, зависящую от размерности матрицы (для матрицы размерностью 4x4 const=0,900, при размерности 5x5=1,12, 6x6 const=1,240, 7x7=1,32). Значение ОС, меньшее или равное 0.100, принято считать приемлемым [124–125]. В общем случае под согласованностью подразумевается то, что при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них.

Примем следующую модель технической диагностики трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками (ВТСП-трансформаторов) с использованием матрицы нечетких отношений, которая, в свою очередь, требует некоторых экспертных оценок. Эти лингвистические оценки представляются как некоторые точки функции принадлежности, отражающей субъективное восприятия повреждения экспертом на основе его опыта и знаний. Пусть описание полного пространства возможных причин (предпосылок) G состоит из m факторов, а полное пространство признаков (заключений) P предпосылок из n симптомов [119, 126].

В качестве параметров, которые можно выделить как факторы для обобщенного анализа состояния ВТСП-трансформаторов, выделим наиболее распространенные и построим иерархию [119–120]:

Главная цель, которая является верхним (первым) уровнем иерархии, представляет собой определение кратчайшего времени, в течение которого трансформатор может перейти в неработоспособное состояние.

Второй уровень иерархии: X1 – несрабатывание релейной защиты; X2 – нарушение герметичности корпуса; X3 – отсутствие или несрабатывание нелинейного ограничителя перенапряжения (ОПН); X4 – нарушение регламента эксплуатации.

Третий уровень иерархии включает в себя следующие параметры: Y1 – низкий уровень азота; Y2 – длительное неотключение сквозного тока КЗ; Y3 – перенапряжение; Y4 – нарушение работы охлаждающей установки; Y5 – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток трансформатора.

Следующий (четвертый) уровень иерархии представляют основные повреждения трансформаторов: G1 – выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора; G2 – закипание азота; G3 – износ изоляции обмоток; G4 – пробой изоляции в обмотках.

Последний уровень иерархии представляет собой ключевые признаки повреждений ВТСП-трансформаторов: P1 – потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота; P2 – изменение технических характеристик электрооборудования; P3 – снижение эксплуатационной надежности.

Предложенная модель иерархии этапов технической диагностики текущего технического состояния ВТСП-трансформатора представлена ниже (рисунок 4.10).

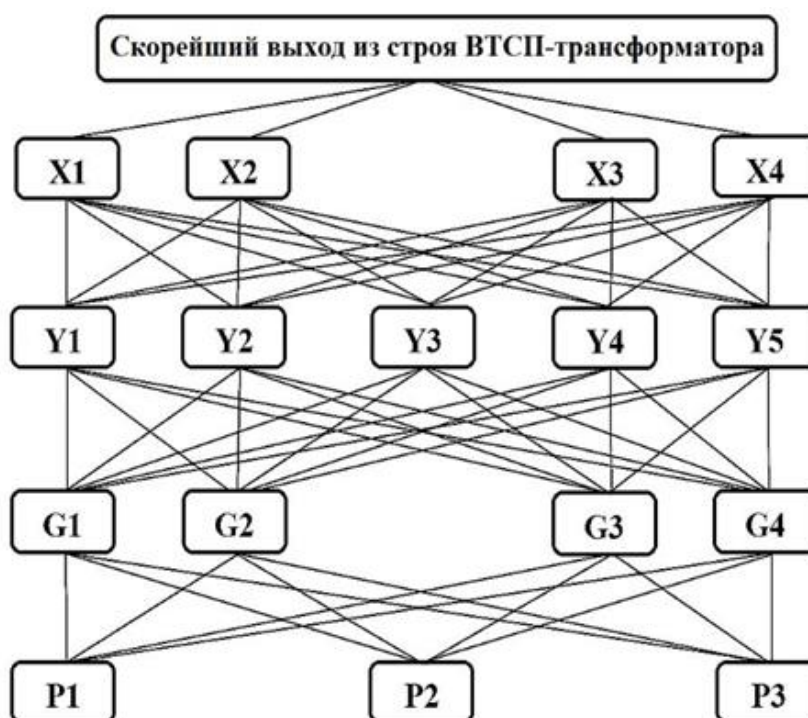


Рис. 4.10 – Иерархическая модель причин и признаков неисправностей ВТСП трансформатора



Используя метод анализа иерархий [124], составлены таблицы попарных сравнений возможных признаков по числу возможных причин для каждого уровня иерархии. Для каждой таблицы рассчитаны вектор - столбцы приоритетов (ВСП) и собственных значений матриц  $\lambda$ . Также, для всех матриц рассчитаны главные собственные значения  $\lambda_{\max}$ , индексы согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС).

Расчеты выполнены поэтапно, для каждого уровня иерархии в обратном порядке, начиная от нижнего уровня к верхнему. Результаты расчетов для всех уровней в матричной форме представлены ниже.

#### **Нижний (пятый) уровень иерархии**

Пятый уровень иерархии состоит из признаков неисправностей ВТСП-трансформаторов для каждой из возможных причин четвертого уровня (таблица 4.3-4.6).

Таблица 4.3 – Сравнение признаков при выгорании витковой изоляции

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	1/7	1/5	0,075
P2	7	1	2	0,560
P3	5	1/2	1	0,364

Видно, что наиболее вероятным признаком является изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетностью 0,560. На втором месте – снижение надежности с приоритетом 0,364. На третьем – потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,075. ОС=0,021, что меньше установленного 0,1 и удовлетворяет условию согласованности метода анализа иерархий Саати. ИС=0,012. Главное собственное значение  $\lambda_{\max} = 3,025$ .

Таблица 4.4 – Сравнение признаков при закипании азота

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	5	7	0,696
P2	1/5	1	3	0,225
P3	1/7	1/3	1	0,079

Наиболее вероятным признаком является потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетностью 0,696. На втором месте – изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетом 0,225. На третьем – снижение эксплуатационной надежности с приоритетом 0,079. Отношение согласованности  $OS=0,083$ .  $IS=0,048$ .  $\lambda_{\max} = 3,097$ .

Таблица 4.5 – Сравнение признаков при износе изоляции обмоток

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	1/5	1/3	0,103
P2	5	1	3	0,605
P3	3	1/3	1	0,291

Здесь наиболее вероятным признаком является изменение технических характеристик электрооборудования приоритетностью 0,605. На втором месте – снижение надежности с приоритетом 0,291. На третьем – потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,103. Отношение согласованности  $OS=0,048$ .  $IS=0,028$ ,  $\lambda_{\max} = 3,055$ .

Таблица 4.6 – Сравнение признаков при пробое изоляции в обмотках

	P1	P2	P3	ВСП
P1	1	3	5	0,641
P2	1/3	1	2	0,238
P3	1/5	1/2	1	0,121

Наиболее вероятным признаком является потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетностью 0,641. На втором месте – изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетом 0,238. На третьем – снижение эксплуатационной надежности с приоритетом 0,121. Отношение согласованности  $OS=0,004$ .  $IS=0,002$ .  $\lambda_{\max} = 3,005$ .

#### **Четвертый уровень иерархии**

Для четвертого уровня признаки приведены в таблицах 4.7-4.11.

Таблица 4.7 – Сравнение повреждений при низком уровне азота

	G1	G2	G3	G4	ВСП
G1	1	3	5	7	0,555
G2	1/3	1	2	3	0,220
G3	1/5	1/2	1	3	0,163
G4	1/7	1/3	1/3	1	0,063

В данном случае наиболее вероятным повреждением является выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора с приоритетностью 0,555. На втором месте – закипание азота с приоритетом 0,220. На третьем – износ изоляции обмоток с приоритетом 0,163. ОС=0,040. ИС=0,036,  $\lambda_{\max} = 4,109$ .

Таблица 4.8 – Сравнение повреждений при длительном неотключении сквозного тока КЗ

	G1	G2	G3	G4	ВСП
G1	1	2	3	5	0,481
G2	1/2	1	1	3	0,241
G3	1/3	1	1	2	0,190
G4	1/5	1/3	1/2	1	0,089

Наиболее вероятным повреждением является выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора с приоритетностью 0,481. На втором месте – закипание азота с приоритетом 0,241. На третьем – износ изоляции обмоток с приоритетом 0,190. Отношение согласованности ОС=0,010. ИС=0,009,  $\lambda_{\max} = 4,027$ .

Таблица 4.9 – Сравнение повреждений при перенапряжении

	G1	G2	G3	G4	ВСП
G1	1	3	1/5	1/3	0,131
G2	1/3	1	1/9	1/7	0,046
G3	5	9	1	2	0,491
G4	3	7	1/2	1	0,332

Здесь наиболее вероятным повреждением является износ изоляции обмоток с приоритетностью 0,491. На втором месте – пробой изоляции в обмотках с приоритетом 0,332. На третьем – выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора с приоритетом 0,131. Отношение согласованности  $OC=0,022$ .  $ИС=0,020$ ,  $\lambda_{\max} = 4,059$ .

Таблица 4.10 – Сравнение повреждений при нарушении работы охлаждающей установки

	G1	G2	G3	G4	ВСП
G1	1	1/5	3	5	0,256
G2	5	1	7	9	0,611
G3	1/3	1/7	1	1	0,069
G4	1/5	1/9	1	1	0,064

Наиболее вероятным повреждением в этом случае является закипание жидкого азота с приоритетностью 0,611. На втором месте – выгорание витковой изоляции обмоток трансформатора с приоритетом 0,256. На третьем – износ изоляции обмоток с приоритетом 0,069. Отношение согласованности  $OC=0,068$ , что меньше 0,1 и удовлетворяет условию согласованности метода анализа иерархий Томаса Саати.  $ИС=0,061$ ,  $\lambda_{\max} = 4,183$ .

Таблица 4.11 – Сравнение повреждений при недостаточной электродинамической стойкости

	G1	G2	G3	G4	ВСП
G1	1	5	5	1/5	0,281
G2	1/5	1	1	1/9	0,058
G3	1/5	1	1	1/9	0,058
G4	5	9	9	1	0,603

Наиболее вероятным повреждением является пробой изоляции в обмотках с приоритетностью 0,603. На втором месте – выгорание витковой изоляции обмотки трансформатора с приоритетом 0,281. На третьем – износ

изоляции обмоток и закипание азота с одинаковым приоритетом 0,058. Отношение согласованности  $OC=0,075$ , что меньше 0,1 и удовлетворяет условию согласованности.  $ИС=0,067$ ,  $\lambda_{\max} = 4,201$ .

### Третий уровень иерархии

Третья ступень иерархии представляет собой причинно-следственные связи, когда элементы третьего уровня являются причинами четвертого, и, наряду с этим, могут рассматриваться как следствия компонентов второго уровня предложенной иерархии (таблицы 4.12-4.15).

Таблица 4.12 – Сравнение причин повреждений при несрабатывании релейной защиты

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	ВСП
Y1	1	1/9	1/5	1/3	1/7	0,039
Y2	9	1	2	3	1	0,348
Y3	5	1/2	1	2	1/3	0,192
Y4	3	1/3	1/2	1	1/2	0,116
Y5	7	1	3	2	1	0,305

Видно, что наиболее вероятной причиной является длительное неотключение сквозного тока КЗ с приоритетностью 0,348. На втором месте – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ с приоритетом 0,305. На третьем – перенапряжение с приоритетом 0,192. Отношение согласованности  $OC=0,026$ .  $ИС=0,029$ ,  $\lambda_{\max} = 5,114$ .

Таблица 4.13 – Сравнение причин повреждений при нарушении герметичности корпуса

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	ВСП
Y1	1	7	5	3	9	0,544
Y2	1/7	1	1	1/2	2	0,101
Y3	1/5	1	1	1/2	3	0,124
Y4	1/3	2	2	1	3	0,181
Y5	1/9	1/2	1/3	1/3	1	0,050

Здесь наиболее вероятной причиной является низкий уровень азота с приоритетностью 0,544. На втором месте – нарушение работы охлаждающей установки с приоритетом 0,181. На третьем – перенапряжение с приоритетом 0,124. Отношение согласованности  $OC=0,016$ , что меньше 0,1, и удовлетворяет условию согласованности.  $ИС=0,018$ ,  $\lambda_{\max} = 5,070$ .

Таблица 4.14 – Сравнение причин повреждений при отсутствии или несрабатывании ОПН

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	ВСП
Y1	1	1/3	1/9	1/5	1/7	0,038
Y2	3	1	1/3	1/2	1/2	0,115
Y3	9	3	1	3	2	0,387
Y4	5	2	1/3	1	1/2	0,190
Y5	7	2	1/2	2	1	0,269

В данном случае наиболее вероятной причиной является перенапряжение с приоритетностью 0,387. На втором месте – недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ с приоритетом 0,269. На третьем – нарушение работы охлаждающей установки с приоритетом 0,190. Отношение согласованности  $OC=0,021$ .  $ИС=0,023$ ,  $\lambda_{\max} = 5,094$ .

Таблица 4.15 – Сравнение причин повреждений при нарушении регламента эксплуатации

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	ВСП
Y1	1	5	1/3	1/5	3	0,171
Y2	1/5	1	1/7	1/9	1/2	0,035
Y3	3	7	1	1/2	5	0,296
Y4	5	9	2	1	7	0,431
Y5	1/3	2	1/5	1/7	1	0,066

Наиболее вероятной причиной является нарушение работы охлаждающей установки с приоритетностью 0,431. На втором месте – перенапряжение с приоритетом 0,296. На третьем – низкий уровень азота с приоритетом 0,171.

Отношение согласованности  $OC=0,048$ , что меньше 0,1 и удовлетворяет условию согласованности.  $IC=0,054$ ,  $\lambda_{\max} = 5,215$ .

### Второй уровень иерархии

Для второго уровня признаки приведены в таблицах 4.16-4.20.

Таблица 4.16 – Сравнение дефектов, влияющих на скорейший выход из строя ВТСП-трансформатора

	X1	X2	X3	X4	ВСП
X1	1	1/7	1/3	1/5	0,060
X2	7	1	3	2	0,464
X3	3	1/3	1	1/2	0,172
X4	5	1/2	2	1	0,303

Дефектом, который с наибольшей вероятностью в кратчайшее время приведет трансформатор с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками в неработоспособное состояние, является нарушение герметичности корпуса с приоритетностью 0,464. На втором месте – нарушение регламента эксплуатации с приоритетом 0,303. На третьем месте – отсутствие или несрабатывание нелинейного ограничителя перенапряжения с приоритетом 0,172. Отношение согласованности  $OC=0,010$ , что меньше 0,1 и удовлетворяет условию согласованности метода анализа иерархий Саати. Индекс согласованности  $IC=0,009$ . Главное собственное значение  $\lambda_{\max} = 4,028$ .

Первый уровень иерархии представляет собой конечную (главную) цель, состоящую в возможности определения кратчайшего времени, в течение которого трансформатор может перейти в неработоспособное состояние.

Для достижения поставленной цели необходимо дать итоговую интегральную оценку взаимосвязи причин первичного уровня с заключительными приоритетными оценками о возможности перехода трансформатора или любого другого электрооборудования в неработоспособное состояние. Это обусловлено тем, что трансформатор, как и другое оборудование, может иметь дефекты, но оставаться в работоспособном состоянии [119–120].

Для решения поставленной задачи в настоящей работе предлагается перемножение вектор - столбцов приоритетов для всех уровней иерархий. Ниже представлены вектор - столбцы приоритетов для каждого из уровней иерархии.

Таблица 4.17 – ВСП пятого уровня иерархии

	G1	G2	G3	G4
P1	0,075	0,696	0,103	0,641
P2	0,560	0,225	0,605	0,238
P3	0,364	0,079	0,291	0,121

Таблица 4.18 – ВСП четвертого уровня иерархии

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
G1	0,555	0,481	0,131	0,256	0,281
G2	0,220	0,241	0,046	0,611	0,058
G3	0,163	0,190	0,491	0,069	0,058
G4	0,063	0,089	0,332	0,064	0,603

Таблица 4.19 – ВСП третьего уровня иерархии

	X1	X2	X3	X4
Y1	0,039	0,544	0,038	0,171
Y2	0,348	0,101	0,115	0,035
Y3	0,192	0,124	0,387	0,296
Y4	0,116	0,181	0,190	0,431
Y5	0,305	0,050	0,269	0,066

Таблица 4.20 – ВСП второго уровня иерархии

	A
X1	0,060
X2	0,464
X3	0,172
X4	0,303

Путем перемножения матриц вектор - столбцов приоритетов от низшего уровня к верхнему найдем результирующий вектор - столбец влияния каждого



из признаков на скорейший выход из строя ВТСП-трансформатора. Получим заключительный интегральный вектор - столбец влияния каждого из признаков на конечную цель.

P1	0,349
P2	0,421
P3	0,229

Таким образом, признаком неисправности, которая с наибольшей вероятностью в кратчайшее время приведет ВТСП-трансформатор в неработоспособное состояние, является изменение технических характеристик электрооборудования с приоритетностью 0,421. Второе место занимает потеря свойства сверхпроводимости в диэлектрической среде жидкого азота с приоритетом 0,349. На третьем – снижение эксплуатационной надежности, имеющее приоритет 0,229.

В целом взаимосвязь между дефектами и состояниями электрооборудования может быть представлена в виде нечетких функций рисунок 4.11 и в виде таблицы соответствия рисунок 4.12.

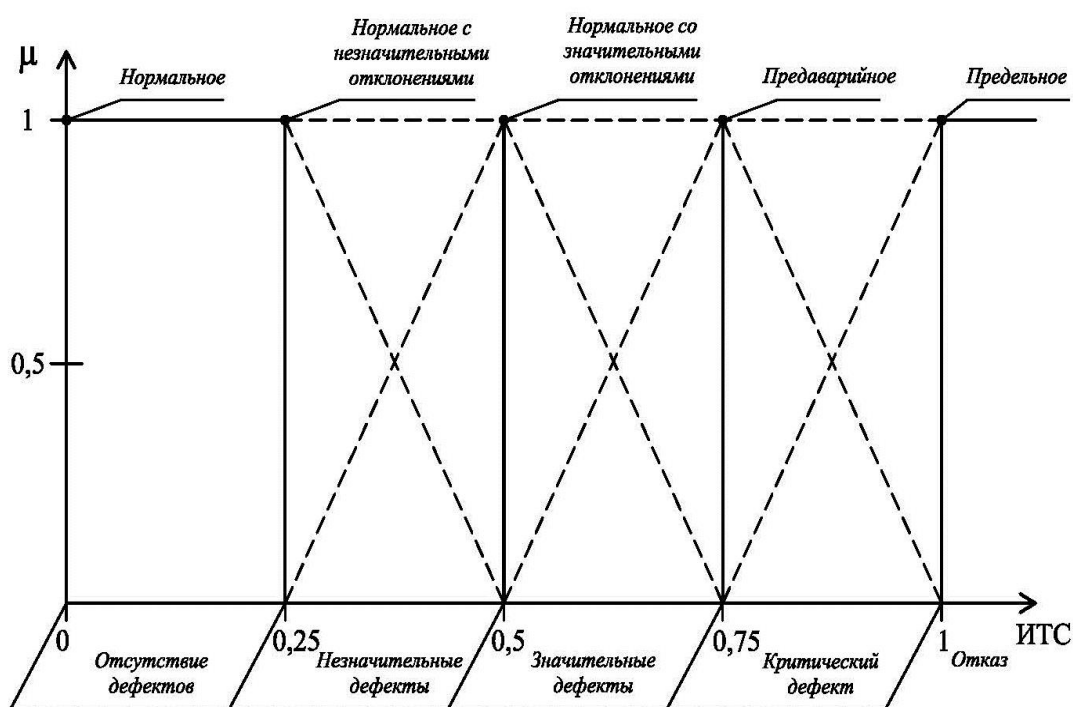


Рисунок 4.11 – Функции принадлежности состояний электрооборудования

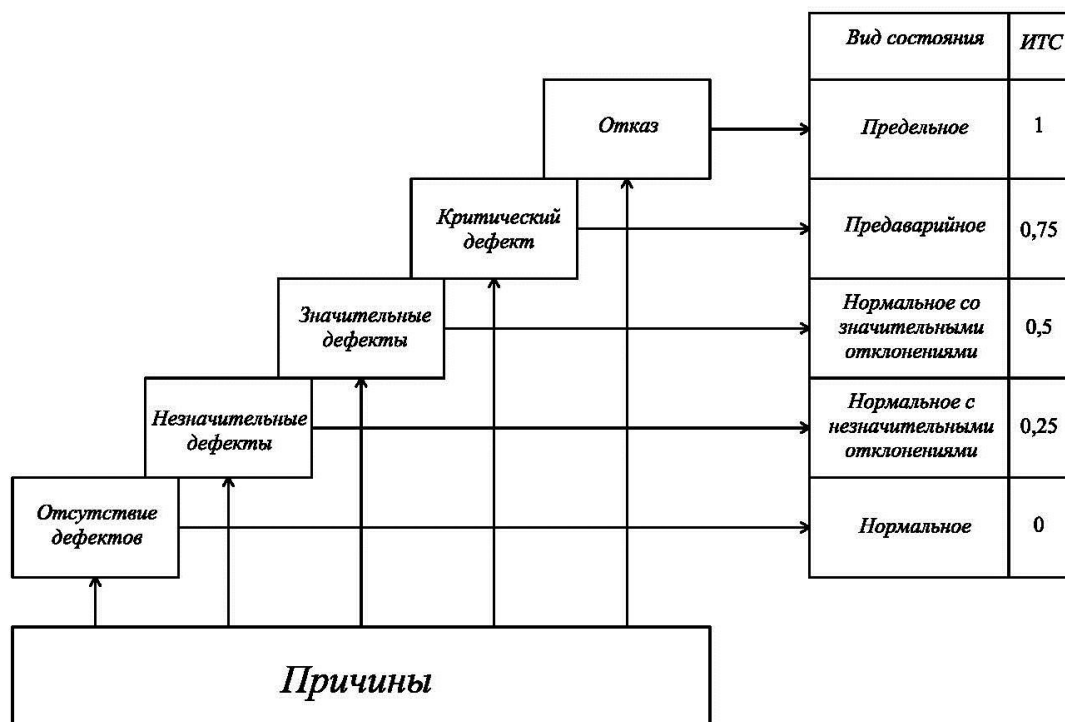


Рисунок 4.12 – Соотношение дефектов и состояний электрооборудования

#### 4.6 Выводы

1. Показано, что существует возможность ограничения тока короткого замыкания в электрической сети с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, в том числе с возможной дополнительной обмоткой для этой цели. При этом в первый полупериод ограничение тока короткого замыкания не так существенно, как в последующие полупериоды. Это обусловлено более быстрым затуханием апериодической составляющей тока короткого замыкания, чем в традиционных трансформаторах с обмоткой из медного провода, а также увеличением температуры сверхпроводящей обмотки ВТСП трансформатора.

2. Возвращение в сверхпроводящее состояние обмотки ВТСП трансформатора в значительной степени зависит от соотношения величин тока короткого замыкания и рабочего тока, а также от толщины слоя стабилизатора в сверхпроводниковом проводе.

3. Ограничение различных видов токов короткого замыкания с помощью ВТСП трансформатора за счет существенного увеличения сопротивления обмоток при потере сверхпроводящего состояния позволяет отказаться от

продольно включенных реакторов с высоким индуктивным и активным сопротивлением. При этом снижаются потери активной мощности в электрической сети, повышается надежность, и улучшаются технико-экономические показатели систем электроснабжения по сравнению с отдельно установленными обычными реакторами для ограничения токов короткого замыкания.

4. В настоящее время существует большой оптимизм в том, что в краткосрочной перспективе могут быть получены многообещающие результаты по инновационному развитию электроэнергетики при смене парадигмы использования «сверхнапряжений» к идее «сверхтоков», для решения которой сверхпроводящие трансформаторы являются ключевым звеном.

## **5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАТОРА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ**

### **5.1 Постановка задачи**

Основные теоретические положения и математические модели трансформаторов со сверхпроводящей обмоткой требуют некоторого экспериментального подтверждения, особенно его функции токов короткого замыкания (КЗ). С этой целью была разработана и собрана физическая модель однофазного трансформатора с высокотемпературными сверхпроводящими (ВТСП) обмотками, катушки которого были помещены в криогенную диэлектрическую среду – жидкий азот. В качестве проводника обмотки использовалась сверхпроводящая лента типа – SuperOxTM.

В настоящем ставится задача экспериментально исследовать тепловые режимы в нелинейной области вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводящего провода. Необходимо провести натурные эксперименты по ограничению токов короткого замыкания, с учетом выделенного количества теплоты в режимах резкого увеличения токов в обмотке, как следствие КЗ.

Для выполнения экспериментов и в качестве расчетных параметров схемы замещения электрической цепи выбраны такие величины сопротивлений, чтобы иметь возможность изменять величину протекающих токов и определять максимальные температуры перегрева ВТСП катушек в зависимости от длительности протекающего в обмотке тока КЗ и нелинейности вольтамперной характеристики.

### **5.2 Уравнения тепловых процессов трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой**

Отправной точкой настоящего исследования является изучение теплового процесса токоограничения с помощью катушки, выполненной из сверхпроводящей ВТСП ленты (SuperOxTM) длиной 3 м, шириной 4 мм с критическим током 80А.

Полная схема подключений изображена на рисунке 5.1. На схеме присутствует нагрузка, набранная из прутков нихромовой проволоки и короткозамыкатель, в качестве которого взят обыкновенный автоматический выключатель. В цепи при помощи токовых клещей снималась осциллограмма тока в момент возникновения короткого замыкания (рисунке 5.2).

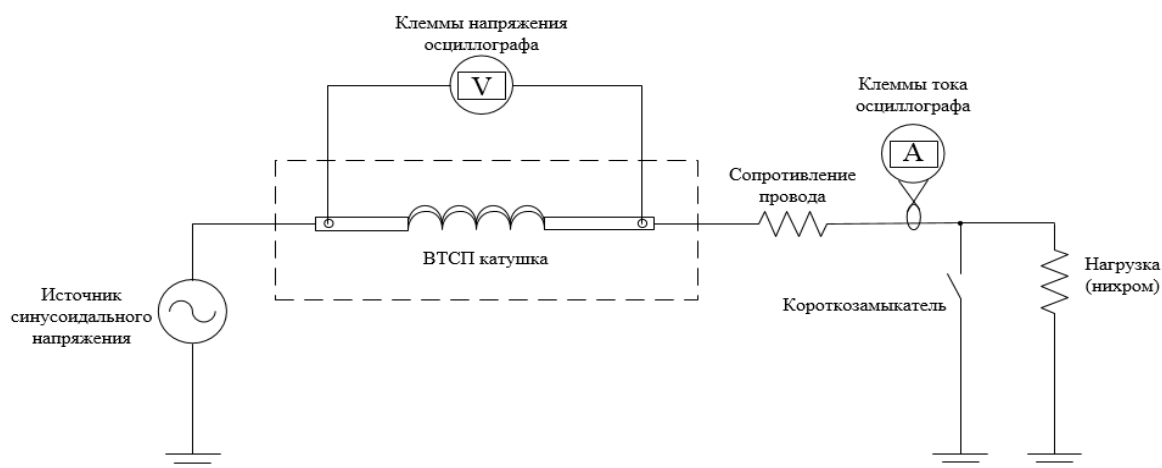


Рисунок 5.1 – Схема эксперимента

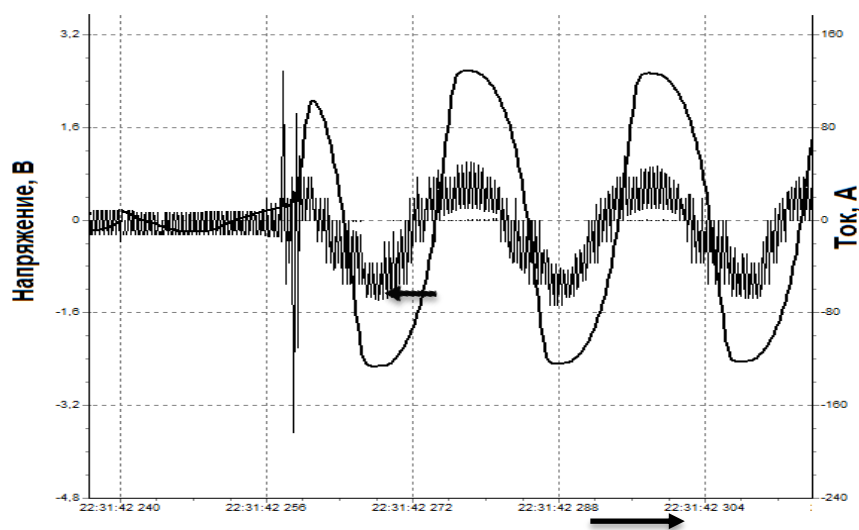


Рисунок 5.2 – Осциллограмма переходного процесса при коротком замыкании на нагрузке

На осциллограмме чёрной сплошной линией показана кривая изменения тока от времени. Размытой линией показана кривая падения напряжения на

катушке; размытость обусловлена недостаточной разрешающей способностью измерительного прибора (FLUKE 435-II) по напряжению. Видно, что кривая тока испытывает некоторое искажение, обусловленное нелинейностью вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводящей катушки. При этом максимальное значение тока в цепи с токоограничением достигает 132 А против 175 А без токоограничения. Проведённый натурный эксперимент и полученные данные будут являться опорой при построении математической модели переходного процесса в результате КЗ на нагрузке.

У ВТСП токоограничителей различных типов осциллограмма ограниченного тока, изображённая на рисунке 5.3 [127], выглядит несколько иным образом, чем полученная нами в эксперименте (рисунок 5.2). А именно, в сигнале тока после первого полупериода отсутствуют искажения и сигнал получается синусоидальным. Это происходит потому, что токоограничители проектируются таким образом, чтобы огромные значения тока короткого замыкания вызвали «проскакивание» нелинейной области ВАХ сверхпроводящего провода, и последующий установившийся режим короткого замыкания полностью определялся сопротивлением резистивных материалов токоограничителя. Однако настоящая работа посвящена исследованию тепловых режимов работы сверхпроводящей катушки именно в нелинейной области ВАХ сверхпроводника.

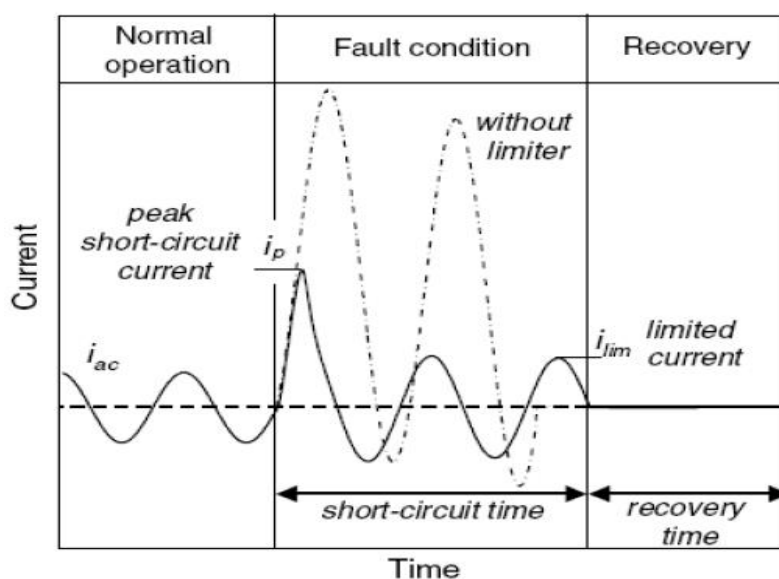


Рисунок 5.3 – Режимы работы токоограничителя

Представленная на рисунке 5.1 схема может быть описана простейшим дифференциальным уравнением для индуктивной цепи

$$L \frac{di}{dt} + i(R_{СП}(I, T) + R) = U \sin(\omega t), \quad (5.1)$$

где  $L$  – индуктивность сверхпроводящей катушки, Гн;  $i$  – ток в цепи, А;  $U$  – напряжение источника, В;  $R$  – активное сопротивление нагрузки или сопротивление короткого замыкания в зависимости от рассматриваемого режима, Ом;  $R_{СП}$  – активное сопротивление сверхпроводящей катушки, Ом.

В данном уравнении следует учесть нелинейный характер активного сопротивления сверхпроводящей (СП) катушки, которое зависит от модуля мгновенного значения тока по следующему выражению, полученному при помощи преобразования выражения для ВАХ сверхпроводящей ленты (путём деления частей уравнения на ток)

$$R_{СП}(I) = \frac{E_0}{i} \left( \frac{i}{I_K} \right)^n, \quad (5.2)$$

где  $I_K$  – ток, который мы условно выбираем как критический ток сверхпроводника, А. Как правило, принято считать такой ток критическим, при котором напряженность поля внутри сверхпроводника равна 1 мкВ/см (данный критерий предложен производителем ВТСП ленты);  $E_0$  – напряжение на ленте катушки при протекании по ней критического тока, В;  $n$  – показатель степени ВАХ сверхпроводящей ленты.

В выражении (5.1) критический ток  $I_K$  в свою очередь сам изменяется по следующему закону [128]

$$I_K(T) = -\frac{I_{K0}}{0,1848} \ln \left( \frac{T}{93} \right), \quad (5.3)$$

где  $I_{K0}$  – критический ток в собственном поле при 77К, А;  $T$  – температура окружающей среды, К.

Заметим, что при превышении температуры свыше 90 К, критический ток можно считать равным нулю.

Из выражения (5.3) видно, что для построения достоверной модели токоограничения необходимо учитывать процесс нагрева обмотки. Для того,

чтобы учесть нагрев сверхпроводящей катушки, составим уравнение теплового баланса

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q(I, R_{\text{СП}}) - Aq(\Delta T)}{C_{\Sigma}(T)}, \quad (5.4)$$

где  $Q$  – количество теплоты, созданное в объёме катушки переходящей в резистивной состояние при прохождении по ней тока в единицу времени, Вт;  $A$  – площадь поверхности катушки, м<sup>2</sup>;  $q$  – плотность теплового потока, уходящего в жидкий азот с единицы площади поверхности катушки в единицу времени, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_{\Sigma}$  – суммарная теплоёмкость ВТСП катушки, зависящая от температуры, Дж/К.

Количество теплоты, которое создаёт проходящий по ВТСП катушке ток, можно найти как

$$Q(I, R_{\text{СП}}) = \int_{t_{\text{кз}}}^{t_{\text{откл}}} i(R_{\text{СП}})^2 R_{\text{СП}}(T) dt, \quad (5.5)$$

где  $t_{\text{кз}}$  и  $t_{\text{откл}}$  – время возникновения и отключения короткого замыкания соответственно.

Плотность теплового потока  $q$  имеет сложную зависимость от разницы температур между охлаждаемой поверхностью и жидким азотом, которая представлена на рисунке 5.4. Как видно, при значительном перегреве сверхпроводящей катушки отвод тепла от неё будет происходить неэффективно, что будет обуславливать дальнейший перегрев вплоть до пережога ВТСП провода.

Уравнения (5.1-5.5) необходимо объединить в систему уравнений и решать совместно. Решение будет выполняться численно в среде Matlab Simulink.

Как было сказано выше, на примере представленной модели необходимо определить, при каком сочетании параметров, как режимных, так и конструктивных, сверхпроводящий трансформатор будет способен нормально функционировать после цикла успешного АПВ. Другими словами, необходимо найти недопустимые значения параметров с точки зрения перегрева обмоток трансформатора, при которых (после цикла успешного АПВ) СПТ не вернётся в



сверхпроводящее состояние, или, другими словами, разогретая в результате перехода в нормальное состояние обмотка не успеет охладиться в цикле АПВ.

Настоящая работа ставит целью показать скорее качественный характер протекания тепловых процессов в ВТСП устройстве, поскольку полученную математическую модель доселе удалось верифицировать только по поведению тока в цепи со сверхпроводящей катушкой малых размеров. Тем не менее, некоторые из полученных результатов предполагается возможным масштабировать и обобщать для более крупных устройств, таких как СПТ.

От соотношения параметров длительности короткого замыкания и длительности бестоковой паузы зависит, успеет ли обмотка трансформатора остыть в результате перегрева токами короткого замыкания достаточно, чтобы трансформатор сумел вернуться в сверхпроводящий режим.

Более глубокий смысл несёт показатель степени ВАХ сверхпроводящей ленты. От показателя  $n$  вольтамперной характеристики сверхпроводника зависит, насколько резко будет ограничиваться ток КЗ, что, как нетрудно догадаться, будет непосредственно влиять на величину перегрева. Как показывают исследования, в общем случае показатель нелинейности ВАХ в разных частях сверхпроводящего устройства (например, катушки) будет различным. Этот факт не будет учитываться в настоящей работе; предполагается, что показатель нелинейности ВАХ взят средним по всей длине сверхпроводящего провода. Необходимость варьировать значения этого показателя исходит из гипотезы, что со временем, в результате механических и термомагнитных воздействий на сверхпроводник, показатель степени будет изменяться и, как следствие, будет изменяться форма сигнала тока, а значит, и величина нагрева.

### **5.3 Влияние различных параметров трансформатора на уровень перегрева**

В этом разделе рассмотрим уровень перегрева ВТСП катушки при варьировании различных параметров самой катушки и цепи, в которой она находится (рисунок 5.4), а также параметров режима, например, длительность короткого замыкания. Изучение будет проводиться путём серии

вычислительных экспериментов, в которых будут варьироваться заранее оглашённые параметры.

*Эксперимент 1 – Зависимость максимальной температуры перегрева ВТСП катушки от показателя степени ВАХ и длительности короткого замыкания.*

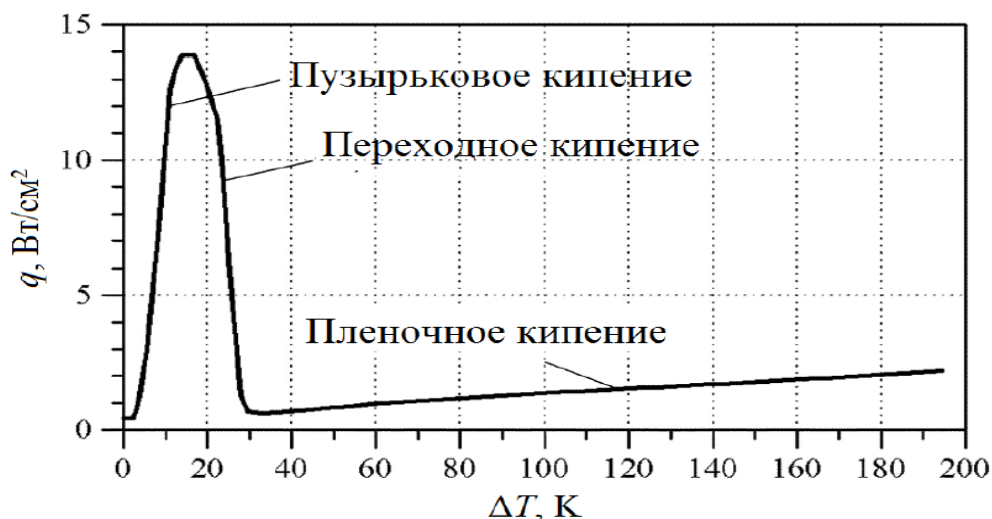


Рисунок 5.4 – Плотность теплового потока в зависимости от разницы температур между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей жидкостью

На рисунке 5.5 представлена серия поверхностей, отражающих зависимость максимальной температуры перегрева катушки от показателя  $n$  ВАХ (выражение 5.2) и длительности короткого замыкания, а также сопротивления цепи при коротком замыкании. Прочие параметры схемы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения параметров схемы замещения для эксперимента 1

Параметры схемы	
Амплитудное значение напряжения источника $U_{\max}$	5 В
Частота источника напряжения	50 Гц
Индуктивность $L$	8 мкГн
Сопротивление нагрузки $R_{\text{нагр}}$	0,45 Ом
Сопротивление короткого замыкания $R_{\text{кз}}$	0,0001 0,0286 Ом
Длительность короткого замыкания, $t_{\text{кз}}$	0,1..0,2 с
Показатель нелинейности ВАХ, $n$	1..20
Длина ленты в ВТСП катушке, м	3

На рисунке 5.6 все поверхности сведены вместе специальным образом для того, чтобы продемонстрировать несколько значимых эффектов.

Во-первых, почти на всех поверхностях максимальное значение температуры испытывает слабую зависимость от длительности короткого замыкания, и лишь на последних двух ( $R_{кз}=0,02$  и  $R_{кз}=0,0286$ ) эта зависимость начинает проявляться. Это связано с тем, что постоянная времени нагрева тела (сверхпроводящей катушки) оказывается мала по сравнению с длительностью короткого замыкания, и лишь в случаях, когда возрастает активное сопротивление цепи короткого замыкания, ток в цепи начинает уменьшаться, и, следовательно, пропорционально квадрату тока уменьшается энергия, требуемая для нагрева тела, а, значит, увеличивается постоянная времени нагрева последнего, что обуславливает зависимость максимальной температуры от длительности КЗ.

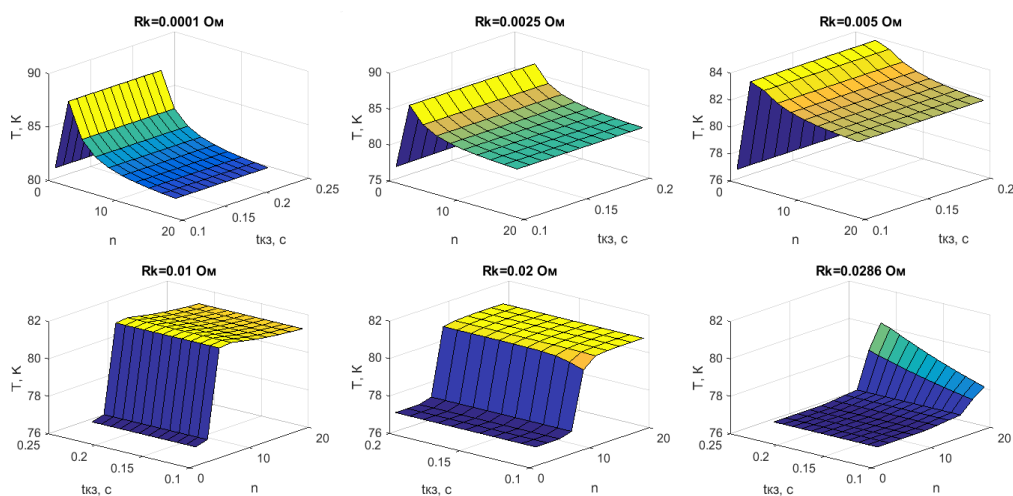


Рисунок 5.5 – Зависимость максимальной температуры перегрева ВТСП катушки от показателя степени ВАХ ( $n$ ) и длительности КЗ ( $t_{кз}$ ) при различных сопротивлениях цепи КЗ ( $R_{кз}$ )

Во-вторых, в верхней части рисунка 5.5 можно наблюдать явный экстремум максимальной температуры в зависимости от показателя  $n$ . Этот экстремум обусловлен сложным характером взаимосвязи между током в цепи и сопротивлением ВТСП катушки, которые определяют друг друга и при некотором  $n$  это сочетание приводит к выделению максимальной энергии с

поверхности ВТСП проводника. В нижней части рисунка 5.6 на диаграммах видно, что максимум температуры «расплывается» в ступенчатой поверхности, но это происходит потому, что сопротивление короткого замыкания начинает быть соизмеримым с сопротивлением катушки в резистивном состоянии. Важно также отметить, что с ростом сопротивления цепи КЗ этот максимум сдвигается в сторону возрастания  $n$ .

В-третьих, обратим внимание, что для каждой поверхности имеет место резкое возрастание температуры после некоторого значения  $n$ .

Если зафиксировать показатель нелинейности ВАХ, например, на уровне, полученном ранее экспериментально ( $n=15,5$ ), то зависимость максимальных температур от двух других параметров будет такой, как на рисунке 5.6. При этом видно, что длительность короткого замыкания при малых значениях  $R_{кз}$  не оказывает сильного влияния на максимальную температуру потому, что установившийся температурный режим наступает много быстрее, чем сработает релейная защита. А при больших значениях сопротивления КЗ сами токи короткого замыкания оказываются недостаточными для того, чтобы вызвать существенный перегрев.

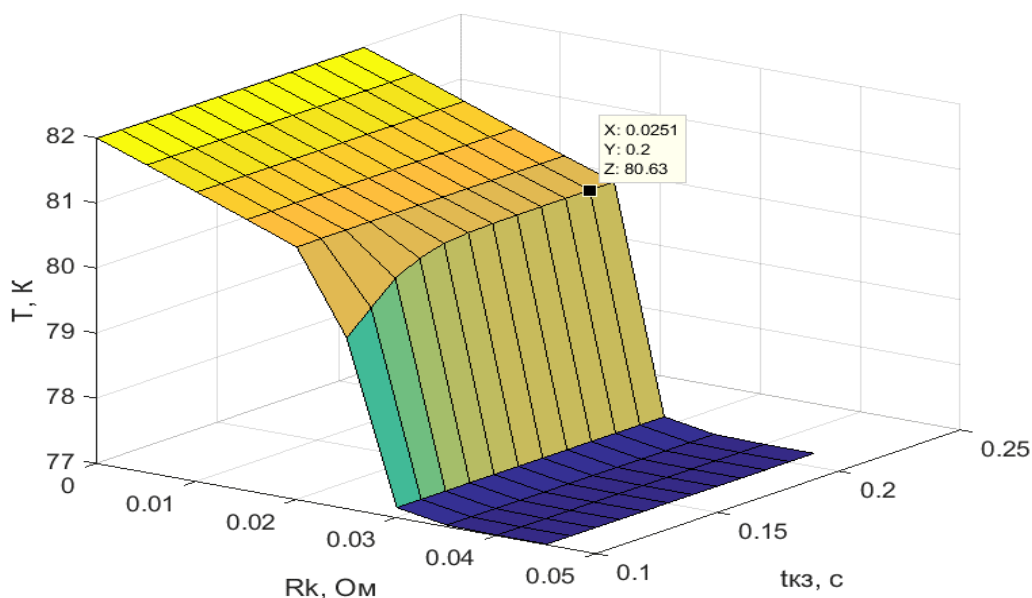


Рисунок 5.6 – Зависимость максимальной температуры перегрева ВТСП катушки от длительности короткого замыкания ( $t_{кз}$ ) и сопротивления цепи короткого замыкания ( $R_{кз}$ ) при фиксированном  $n=15.5$

Однако предложенные выше объяснения справедливы для условий настоящего эксперимента на малой катушке. В крупногабаритных устройствах следует ожидать, что постоянная времени будет больше влиять на уровень максимальных температур уже из-за того, что крупные устройства сложнее нагреть. К тому же и уровни токов КЗ в крупных устройствах значительно выше.

*Эксперимент 2 – Зависимость максимальной температуры перегрева ВТСП катушки от показателя степени ВАХ и напряжения источника.*

Рассмотрим поведение катушки при преднамеренном её перегревании высокими мощностями источника, учитывая также показатель нелинейности ВАХ. Регулирование мощности источника будет проводиться путём изменения его напряжения. Параметры схемы и режима представлены в таблице 5.2. Результаты моделирования представлены в виде поверхности на рисунке 5.7.

Таблица 5.2 – Значения параметров схемы замещения для эксперимента 2

Параметры схемы	
Амплитудное значение напряжения источника $U_{\max}$	10..25 В
Частота источника напряжения	50 Гц
Индуктивность L	8 мкГн
Сопротивление нагрузки $R_{\text{нагр}}$	0,45 Ом
Сопротивление короткого замыкания $R_{\text{кз}}$	0,0001 Ом
Длительность короткого замыкания, $t_{\text{кз}}$	0,2 с
Показатель нелинейности ВАХ, $n$	1..20
Длина ленты в ВТСП катушке, м	3

Построенная поверхность хорошо отражает всю важность присутствия высокого показателя  $n$  у ВТСП устройства (в районе 5-15), поскольку при малых  $n$  (менее 5) рост температуры в случае повышения напряжения становится критическим. Данное утверждение требует проверки на модели крупногабаритного устройства, однако, несомненно то, что при малых значениях показателя нелинейности ВАХ тепловыделения будут наибольшими, что связано с недостаточно быстрым ограничением тока, но достаточно быстрым ростом сопротивления.

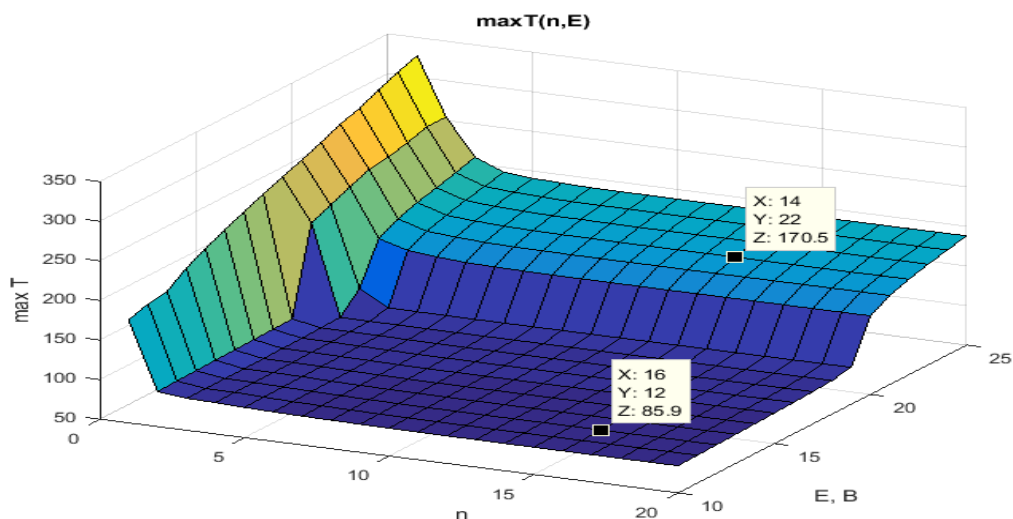


Рисунок 5.7 – Зависимость максимальной температуры перегрева ВТСП катушки от показателя нелинейности ВАХ и напряжения источника

#### 5.4 Анализ влияния показателя нелинейности вольтамперной характеристики на уровень токоограничения

Цель настоящего раздела заключается в том, чтобы показать, что коэффициент нелинейности ВАХ существенно влияет на уровень токоограничения.

Приведём схему на рисунке 5.1 к более классическому виду принципиальной электрической схемы (рисунок 5.8). В качестве параметров схемы замещения выберем реальные параметры схемы, определённые из физического эксперимента выше. Параметры схемы и некоторые расчётные величины приведём в таблице 5.3.

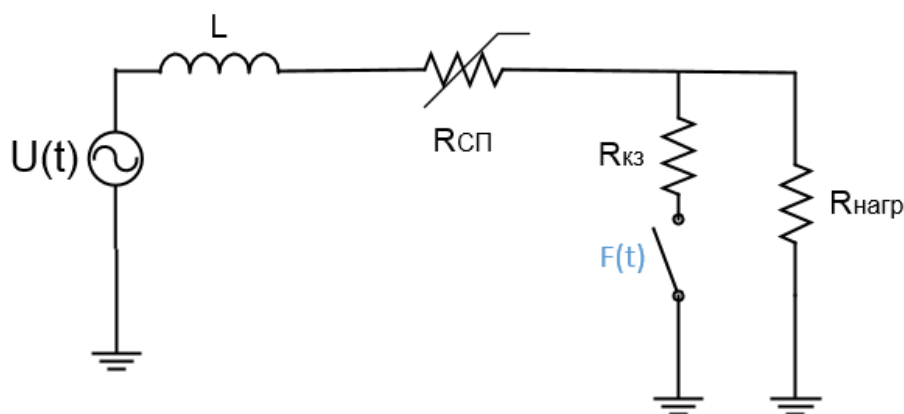


Рисунок 5.8 – Принципиальная схема для моделирования КЗ на нагрузке

Таблица 5.3 – Значения параметров схемы и расчётные величины

Параметры схемы	
Амплитудное значение напряжения источника $U_{\max}$	5 В
Частота источника напряжения	50 Гц
Индуктивность $L$	8 мкГн
Сопротивление нагрузки $R_{\text{нагр}}$	0,45 Ом
Сопротивление короткого замыкания $R_{\text{кз}}$	0,029 Ом
Расчётные параметры	
Амплитуда тока нормального режима $I_{\text{нагр}}$	11,1 А
Амплитуда тока короткого замыкания (без токоограничения) $I_{\text{кз}}$	175 А
$I_{\text{кз}}/I_{\text{нагр}}$	15,8

Решение системы уравнений (5.1-5.5) при замыкании ключа  $F(t)$  при параметрах, равных реальным параметрам экспериментальной схемы, даёт следующую осциллограмму переходного процесса по току (рисунок 5.9).

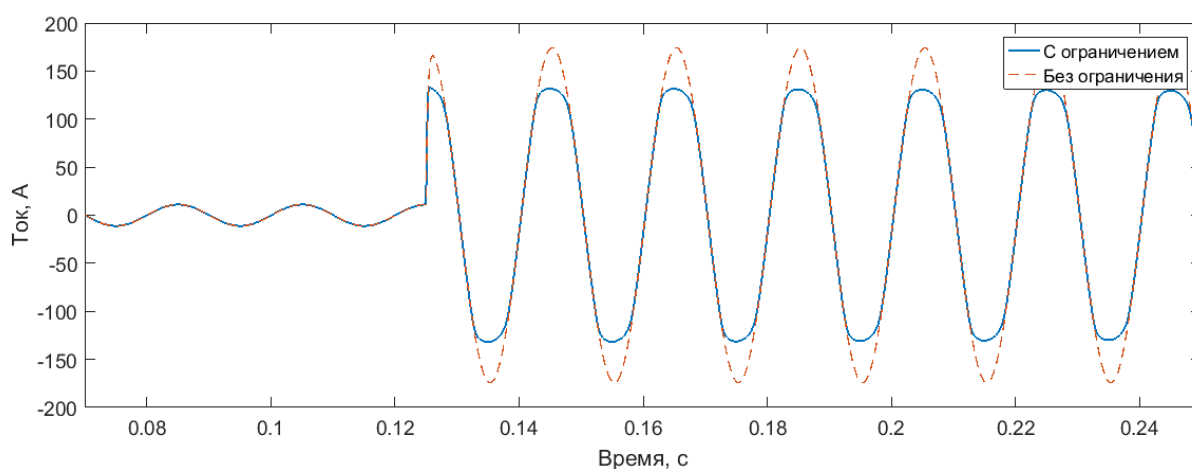


Рисунок 5.9 – Осциллограмма тока при КЗ с токоограничением и без токоограничения

Из рисунка 5.9 видно хорошее совпадение формы кривой ограниченного тока с кривой, полученной в эксперименте, что косвенно свидетельствует об адекватности составленной модели. На представленной осциллограмме ток ограничен со 175 А до 132 А (или снижение кратности тока КЗ с 15,8 до 11,9), что соответствует показателю степени  $n$  (выражение 4.2), равному 15,5.

Заметим, что при прочих равных условиях, зная величину тока без токоограничения и с токоограничением, можно определять средний показатель  $n$  для любого изделия из ВТСП провода. Приведём теперь зависимость максимального тока в исследуемой цепи от показателя  $n$  (рисунок 5.10).

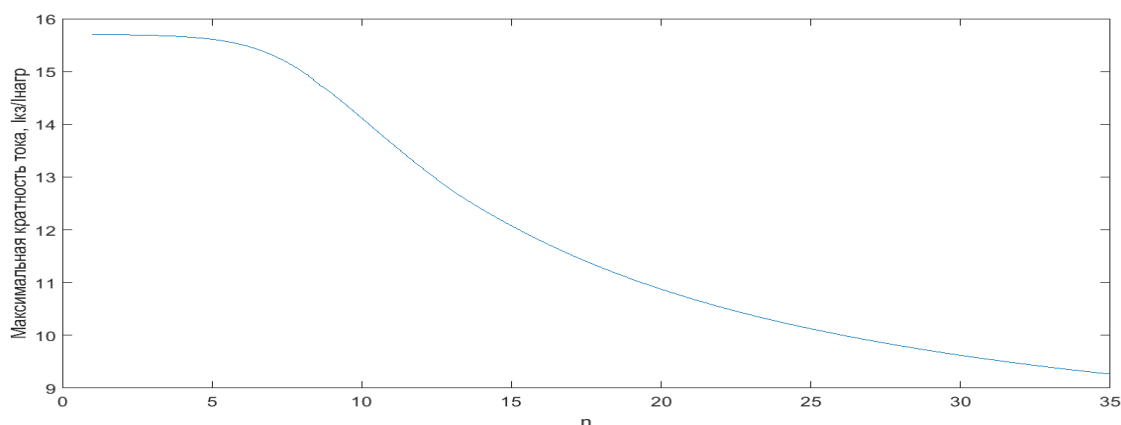


Рисунок 5.10 – Зависимость максимальной кратности ограниченного тока КЗ от показателя нелинейности ВАХ

В реальных экспериментах показатель степени  $n$  для ВТСП проводов обычно не превышает 15 (и свыше 30 для низкотемпературных сверхпроводящих проводов) [129]. На кривой (рисунке 5.10) видно, что при малых показателях степени  $n$  токоограничение оказывается несущественным. Этот факт представляет важность потому, что, как было сказано выше, термомагнитные и механические воздействия способны изменить показатель степени  $n$  изделия из ВТСП провода. И, если средний показатель степени ВАХ такого изделия оказывается мал, то с точки зрения токоограничения такое изделие оказывается неэффективным.

Приведём также кривую зависимости максимального перегрева от показателя степени  $n$  (рисунке 5.11) для представленного случая. Отметим, однако, что кривая максимальных перегревов находится в сильной зависимости от параметров схемы, таких как сопротивление короткого замыкания цепи, сопротивление ВТСП изделия в нормальном состоянии. Тем не менее, полученная кривая демонстрирует явную зависимость перегрева от нелинейности ВАХ. Ниже этот факт будет рассмотрен более подробно.



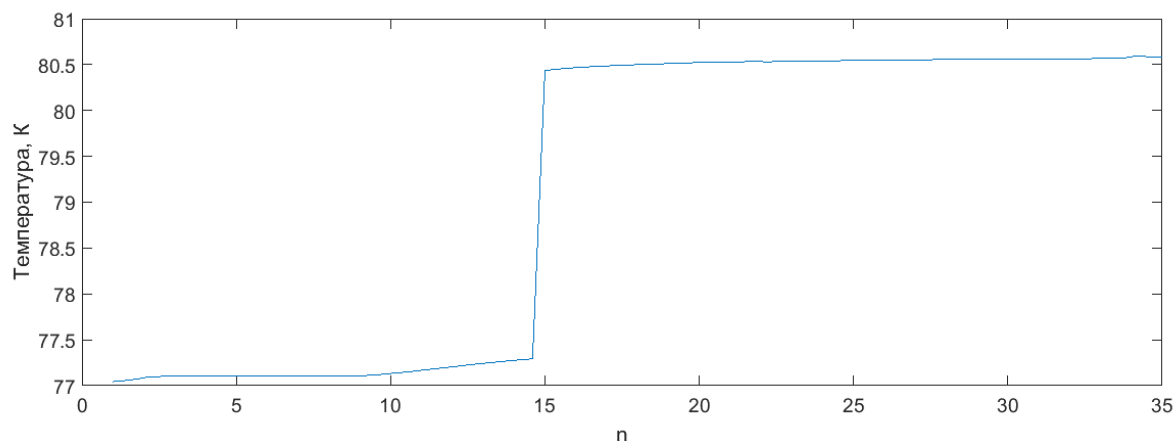


Рисунок 5.11 – Зависимость максимальной температуры нагрева ВТСП изделия в зависимости от показателя нелинейности ВАХ

### 5.5 Влияние времени бестоковой паузы на уровень охлаждения трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой

Поскольку ВТСП трансформатор предполагается эксплуатировать в реальных энергосистемах, его работа не должна приводить к нарушению устойчивости режима работы энергосистемы. Одним из таких регламентированных режимов является цикл автоматического повторного включения, который предполагает в себе наличие времени бестоковой паузы, необходимой для самоустранения причины короткого замыкания на линии электропередачи. Согласно [130] уставку АПВ первого цикла в сетях 6-10 кВ принимают обычно не более 2 с. Минимальное значение уставки в сетях того же класса напряжений варьируется в широких пределах и зависит от многих условий. Произвольно примем в первом приближении минимальное значение уставки равным 0,4 с.

Поскольку в течение бестоковой паузы тепловыделения с поверхности обмотки трансформатора прекращаются, изменение температуры будет полностью определяться отводом тепла в охлаждающую жидкость, который в свою очередь определяется зависимостью, изображённой на рисунке 5.3. Охлаждение трансформатора также не зависит от способа, которым был вызван его предварительный нагрев, то есть не зависит от параметров сопротивления короткого замыкания, напряжения источника и др. Поэтому поставим задачу определения минимальной температуры, до которой сможет охладиться

сверхпроводящая катушка в зависимости от максимальной температуры нагрева в предшествующем режиме в результате протекания тока короткого замыкания. Моделироваться эти процессы будут по-прежнему с использованием схемы, изображённой на рисунке 5.8 с параметрами из таблицы 5.3, за исключением сопротивления короткого замыкания  $R_{кз}$ , которое принимается равным нулю. Принятие нулевым сопротивления короткого замыкания позволит получить режим с максимальным током короткого замыкания, а значит и с максимальным нагревом катушки.

Результаты моделирования представлены на рисунках 5.12-5.15. На рисунках 5.12 и 5.13 представлены примеры зависимости температуры от времени при следующей цепочке событий:

- Время  $t = 0..125$  мс – нормальный режим;
- 125..325 мс – короткое замыкание;
- 325..725 мс – отключение КЗ и бестоковая пауза в цикле АПВ;
- 725..1000 мс – успешное АПВ и возврат в установившийся режим.

На рисунке 5.12 представлен случай успешного теплового возврата сверхпроводниковой катушки в сверхпроводящее состояние после 0,4 секунд бестоковой паузы, а также зависимость теплового потока от времени. На рисунке 5.13. представлен случай НЕВОЗВРАТА катушки в сверхпроводящее состояние.

Очевидно, предположить, что при фиксированном времени бестоковой паузы успешность теплового возврата будет зависеть от достигнутой в режиме короткого замыкания температуры. То есть, для того чтобы устройство вернулось, необходимо за время бестоковой паузы последнему охладиться ниже определённой температуры. Эта температура будет определяться амплитудой тока последующего установившегося режима в случае успешного АПВ. Если произвольно предположить, что амплитуда тока установившегося режима не превышает 40 А (при критическом токе ВТСП катушки 80 А), тогда, подставляя это значение в выражение (4.3) и выражая из него  $T$  как неизвестное, получим необходимую для теплового возврата температуру, равную 85 К.

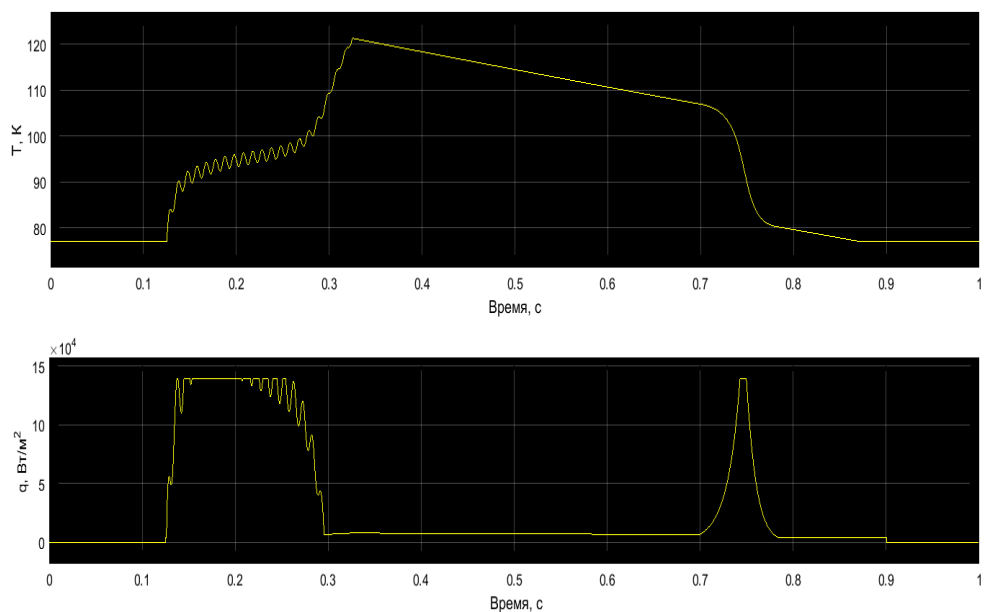


Рисунок 5.12 – Зависимости температуры ( $T$ ) и плотности теплового потока ( $q$ ) от времени – наблюдается тепловой возврат

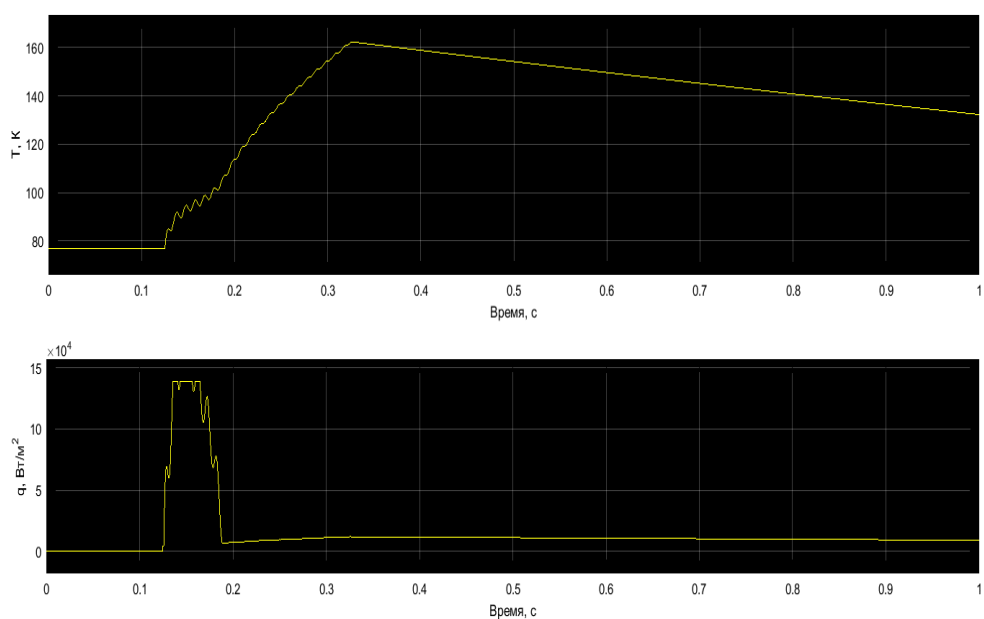


Рисунок 5.13 – Зависимости температуры ( $T$ ) и плотности теплового потока ( $q$ ) от времени – наблюдается тепловой невозврат

На рисунках 5.14 и 5.15 представлены зависимости минимальной температуры, достижимой в течение бестоковой паузы, от максимальной температуры, достигнутой в режиме предшествующего короткого замыкания. При этом на рисунке 5.14 зависимости выполнены для времени длительности бестоковой паузы  $t_{бт} = 0,4$  с, а на рисунке 5.15 для  $t_{бт} = 2$  с.

Черной сплошной линией на рисунках отмечена граница температуры, необходимая для теплового возврата катушки, намотанной из ленты длиной 3м. Эти результаты в дальнейшем планируется подтвердить экспериментально на реальной ВТСП катушке.

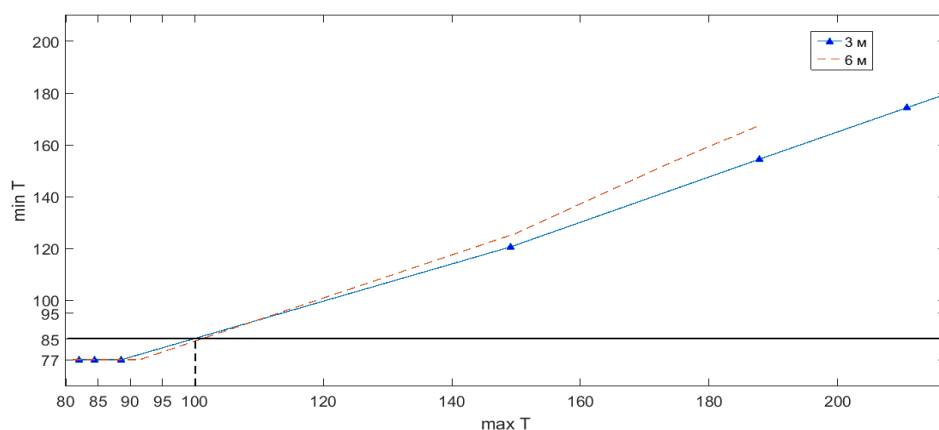


Рисунок 5.14 – Зависимость минимальной температуры охлаждения в течение бестоковой паузы от максимальной температуры предварительного нагрева обмотки при  $t_{бт}=0,4$  с

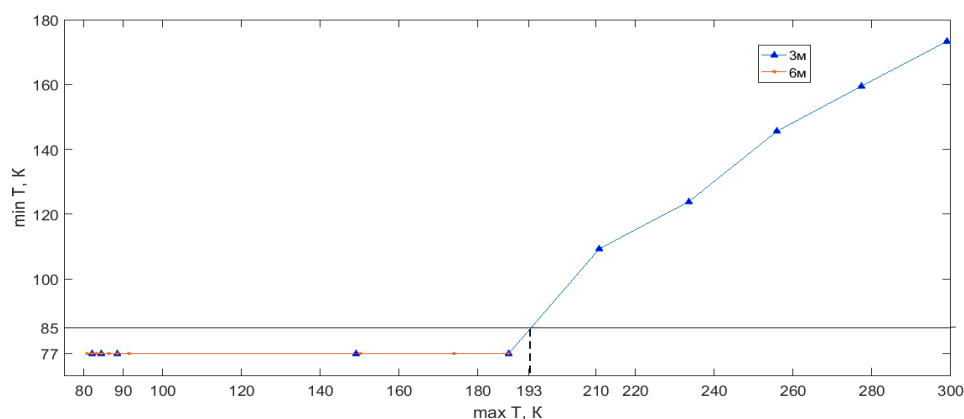


Рисунок 5.15 – Зависимость минимальной температуры охлаждения в течение бестоковой паузы от максимальной температуры предварительного нагрева обмотки при  $t_{бт} = 2$  с

Для сравнения на рисунке 5.13 также показана зависимость для катушки с длиной ленты 6 м, которая будет медленнее нагреваться и медленнее остывать, что справедливо ввиду того, что общая масса ВТСП ленты, а, следовательно, и

теплоёмкость увеличиваются. Этот факт может иметь как положительную, так и отрицательную стороны. С одной стороны, массивное ВТСП устройство будет «неохотно» нагреваться токами свыше критического, а с другой стороны также «неохотно» будет остывать после отключения последних. Это ставит определённую оптимизационную задачу баланса между перегревом и охлаждением для крупных ВТСП устройств, таких, как трансформаторы. Постановка и решение данной оптимизационной задачи планируется в дальнейших исследованиях.

### **5.6 Исследование опытного образца физической модели трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой**

Всякая математическая модель должна быть подтверждена эмпирическими методами, которыми в нашем случае являются физические эксперименты с натурными моделями сверхпроводящих устройств. Решение о создании собственной экспериментальной базы по исследованию «крупномасштабной» сверхпроводимости и возможности внедрения устройств на основе ВТСП лент было принято задолго до участия в настоящем проекте.

На базе Новосибирского государственного технического университета ведётся разработка собственного варианта исполнения сверхпроводящего трансформатора с функцией токоограничения. Отличительной особенностью устройства будет являться более глубокая проработка именно функции токоограничения, как приоритетной, по нашему мнению, для данного устройства.

Основными препятствиями на пути к эффективному токоограничению являются перегрев, неравномерное токоограничение по обмотке и перенапряжения, возникающие в обмотках СП трансформатора. Исследования перегрева трансформатора при выходе обмоток из СП состояния и критерии возврата трансформатора в СП состояние после отключения тока КЗ описаны в [131]. Проблемы неравномерного токоограничения по обмотке были преодолены при помощи изменения конструкции обмотки трансформатора [132].

Согласно [127] превышение критического тока сверхпроводника способствует началу развития и распространения нормальной зоны, то есть зоны, в которой разрушена сверхпроводимость. Вместе с тем, согласно [133], развитие нормальной зоны в устройствах из высокотемпературных сверхпроводников происходит равномерно по всей длине, что эквивалентно тому, что, например, вся катушка будет сразу полностью переходить в смешанное состояние при превышении критического тока. Принимая эту гипотезу, симитируем поведение СП катушки, через которую питается нагрузка, при внезапном коротком замыкании на нагрузке. Моделируемая схема и схема проведения опыта представлены на рисунках 5.16 и 5.17.

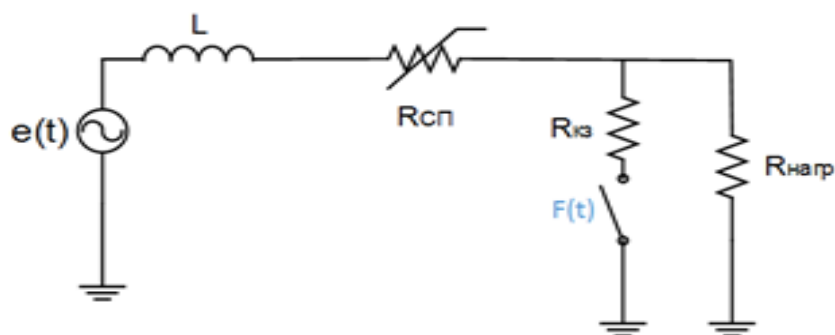


Рисунок 5.16 – Схема, моделирующая работу токоограничивающей катушки в случае КЗ

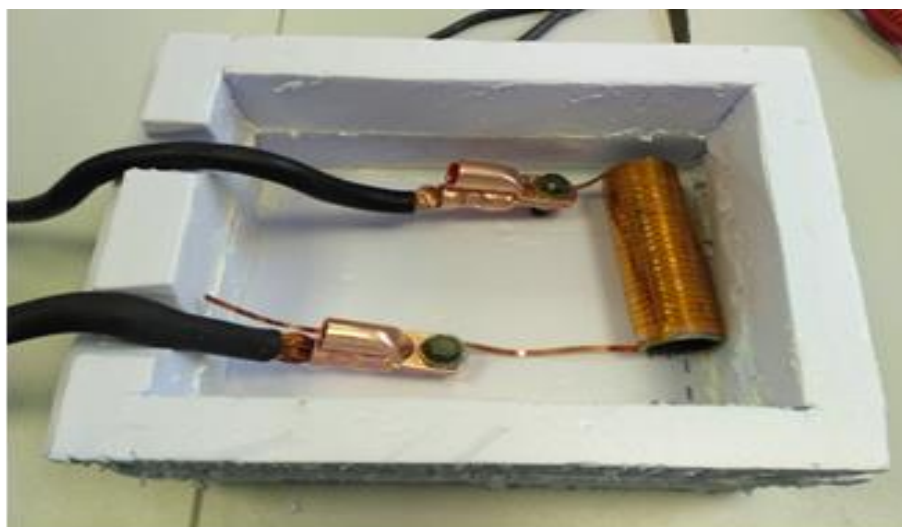


Рисунок 5.17 – Катушка из сверхпроводящей YBCO ленты в ёмкости из полистирола для заполнения жидким азотом

Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления можно удовлетворительно аппроксимировать с помощью степенной функции вида

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{I}{I_k}\right)^n \quad (5.6)$$

где  $E_0$  – коэффициент при степенной функции;  $I_k$  – критический ток сверхпроводящей ленты, или ток, при котором напряженность электрического поля в ленте будет равна 1 мкВ/см;  $n$  – показатель степени или «крутизны» ВАХ;  $I$  – ток, протекающий через сверхпроводящую ленту;  $E$  – напряженность электрического поля в ленте.

Важно отметить, что крутизна ВАХ напрямую влияет на уровень предполагаемых перенапряжений, поскольку чем более резко будет изменяться сопротивление сверхпроводника, тем более резко будет ограничиваться ток, быстрое изменение которого по закону электромагнитной индукции приведёт к перенапряжениям.

Ниже приводятся результаты математического моделирования и осциллограмма токоограничивающей катушки, для которой  $n=27,36$ ,  $E_0=0,00541$ ,  $I_k=80$  А, в случае короткого замыкания на нагрузке (рисунок 5.18). Замеры производились при помощи анализатора FLUKE 435-II. Видно хорошее совпадение осциллограмм тока в модели и опыте.

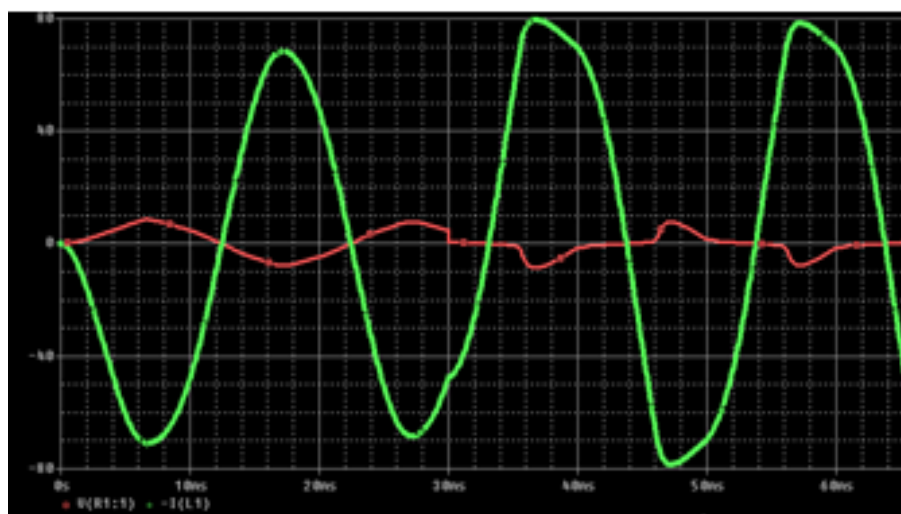


Рисунок 5.18 – Результаты моделирования короткого замыкания за катушкой в программе PSpice. Замыкание происходит на 30мс (ток показан зелёным)

Из осциллограмм видно, что ограничение тока сопровождается срезом вершин синусоидального сигнала. Однако можно видеть, что несмотря на довольно резкий срез сигнала тока на обмотке, не появляется существенных перенапряжений. Так, на рисунке 5.18 видно, что в случае равенства сопротивлений нагрузки и катушки в нормальном состоянии, падение напряжения на всей цепи (красная линия) во время токоограничения не превышает номинального рабочего. Сигнал по напряжению от осциллографа, полученный в эксперименте, имеет слабую разрешающую способность и не может быть использован для количественной оценки напряжений, при этом форма этого сигнала позволяет судить о качественном характере процесса.

Таким образом, подход, при котором сверхпроводящая катушка рассматривается как переходящая в смешанное, а затем нормальное состояние, при превышении критического тока по всему объёму целиком оказывается верным. Как показал опыт, такой переход не вызывает существенных перенапряжений на целой катушке (рисунок 5.2).

Уже в начале работы над проектом в фонд организации поступило 40 метров высокотемпературной сверхпроводящей YBCO ленты, сделанной специально под заказ компанией «SuperOx» (рисунок 5.19). Вся лента была использована для разработки физической модели сверхпроводящего трансформатора мощностью 8 кВт, напряжениями 220/110 В (рисунки 5.20-5.22).



Рисунок 5.19 – Сверхпроводящая YBCO лента





Рисунок 5.20 – Изготовленный на основе эпоксидного компаунда теплоизолированный каркас для намотки сверхпроводящей ленты

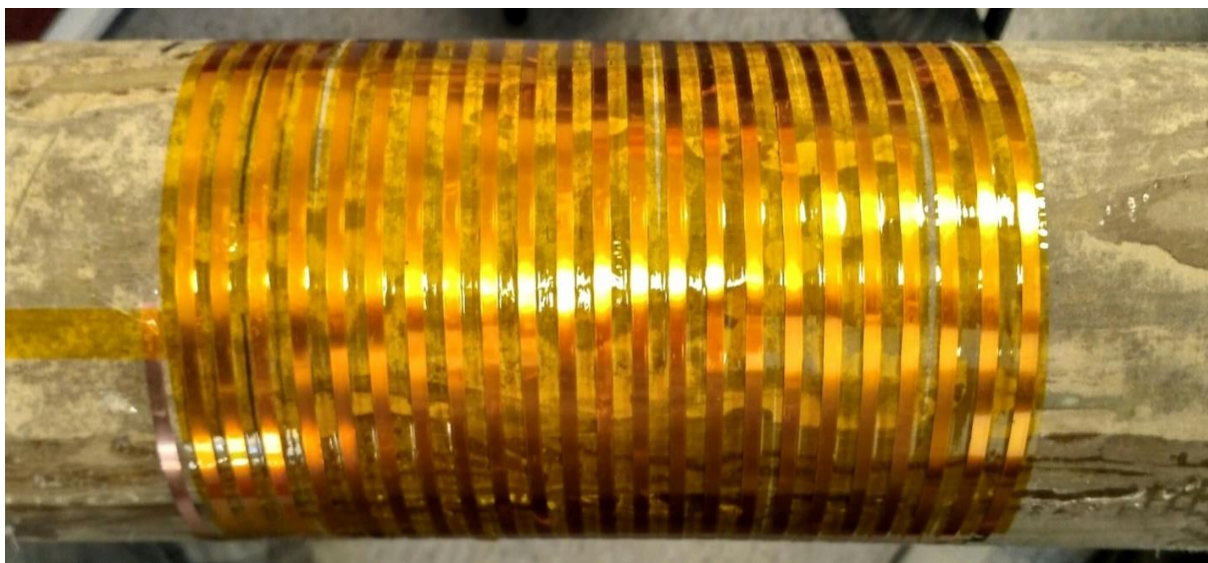


Рисунок 5.21 – Промежуточный этап намотки сверхпроводящей ленты на каркас



Рисунок 5.22 – Обмотки высокого (слева) и низкого (справа) напряжений ВТСП трансформатора

В настоящее время физическая модель ВТСП трансформатора в однофазном исполнении выполнена на кафедре «Систем электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета, она позволяет исследовать ВАХ и переходные процессы при КЗ на низкой стороне трансформатора. В ближайшее время предстоят испытания трансформатора на электродинамической модели энергосистемы.

### **5.7 Преимущества трансформатора с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой**

Резюмируя вышеизложенные аспекты конструкции и режимы ВТСП трансформаторов, можно оценить некоторые технологические и экологические преимущества этих трансформаторов по сравнению с параметрами традиционных масляных высоковольтных трансформаторов. Они заключаются в следующем:

- снижение нагрузочных (динамических) потерь активной мощности в обмотках ВТСП трансформатора более чем на 90% при номинальном токе нагрузки, что значительно увеличивает КПД трансформатора до 99% и существенно повышает энергоэффективность его использования;
- уменьшение общих габаритов и веса ВТСП трансформатора до 40%. Вследствие этого возможно их применение в уже существующих габаритах подстанций без конструктивного изменения и увеличения площади размещения, но со значительным увеличением трансформируемой мощности трансформаторов;
- ограничение токов короткого замыкания за счет перехода обмотки или обмоток, в зависимости от вида короткого замыкания в нормальное состояние, что позволяет при аварийных режимах облегчить электромагнитные процессы в коммутационной аппаратуре электрической сети;
- большая перегрузочная способность ВТСП трансформаторов позволяет выдерживать двукратные перегрузки в течение 48 часов, без повреждения и старения изоляции, что не снижает остаточный ресурс его срока службы [134];
- ВТСП трансформаторы пожаро- и взрывобезопасны в связи с отсутствием в качестве главной изоляции масла, что существенно повышает их экологичность [135];
- снижение уровня шума, что повышает комфортность их размещения и обслуживания;
- сверхнизкие потери холостого хода и короткого замыкания, что существенно зависит от расположения и исполнения магнитопровода ВТСП трансформатора: «теплое» (снаружи криостата) или «холодное» (внутри криостата). При этом «теплое» расположение магнитопровода позволяет использовать относительно дешевую тонколистовую электротехническую сталь с магнитной индукцией до 1,6 Т. В случае «холодного» расположения магнитопровода конструкция криостата упрощается и размеры магнитопровода существенно уменьшаются, однако энергетические затраты на охлаждение несколько увеличатся. При использовании аморфных сталей или сплавов

величина тепловыделения составляет до 0,35 Вт/кг, при 1,7 Т, 50Гц вместо 0,8 Вт/кг;

– затраты за весь срок службы при эксплуатации ВТСП трансформаторов на половину меньше по сравнению с затратами на обслуживание традиционных масляных трансформаторов, а по некоторым данным эти затраты будут на 70% меньше.

## 5.8 Выводы

На основе построенной модели исследовались различные аспекты теплового поведения сверхпроводящей катушки при варьировании её параметров, а также параметров режима в широком диапазоне. Были сделаны следующие выводы:

1 Выявлено непосредственное влияние показателя нелинейности ВАХ, на уровень максимальных температур перегрева ВТСП устройства: при малых  $n$  сочетание недостаточного токоограничения и достаточно возросшего сопротивления приводит к максимальному тепловыделению в объёме ВТСП устройства. Это позволяет сделать предположение о недопустимости применения ВТСП устройств с малыми средними показателями нелинейности ВАХ, которое нуждается в проверке физическим экспериментом.

2 Показано, что с увеличением показателя степени нелинейности ВАХ, уровень токоограничения существенно увеличивается. По известным значениям ограниченного и не ограниченного тока КЗ можно однозначно определить средний показатель нелинейности ВАХ сверхпроводящего устройства.

3 Доказана возможность возврата ВТСП устройства в сверхпроводящее состояние в течение цикла бестоковой паузы автоматического повторного включения, она полностью определяется условиями охлаждения и достигнутой в предшествующем режиме короткого замыкания температурой.

4 Предложен критерий определения допустимой температуры перегрева по уровню тока последующего установившегося режима в случае фиксированного времени бестоковой паузы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных в диссертационной работе научных исследований можно сделать следующее заключение:

1. Выполнен анализ известных и существующих систем планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания электрооборудования по техническому состоянию. Показано, что проблема планирования и ремонта электрооборудования на основе текущего состояния электрооборудования позволяет реализовать систему планирования ремонтов как реальный инструмент управления в системе технического обслуживания электрооборудования.

2. Показано, что теория нечетких множеств и нечеткая логика представляют собой перспективное научное направление, позволяющее формализовать знания экспертов в виде вербальных оценок и лингвистической переменной для создания формализованной нечеткой математической модели причинно-следственных отношений. Предложена и разработана математическая модель текущей диагностики на основе системы нечетких линейных уравнений, решение которой позволяет определить вектор - столбец приоритетности возможных причин установленных дефектов оборудования электросетевого комплекса.

3. Проведенные исследования показывают, что при наличии некоторых признаков неисправностей трансформаторного или коммутационного оборудования, а также лингвистической нечеткой оценки этих признаков экспертами, можно сделать правдоподобные выводы о причинах возможных неисправностей. Рассмотренные примеры доказывают приоритетность возможных причин предаварийного состояния, которое выражается значениями функции принадлежности в диапазоне от 0 до 1. Оценка текущего технического состояния электросетевого оборудования и, в частности, трансформаторов требует не только использования методов неразрушающего контроля, но также применения экспертных оценок. Эти оценки могут рассматриваться как некоторый предварительный диагноз, отражающий опыт и знания технического эксперта, и являются

дополнительными логическими и аналитическими оценками с интуитивной и эвристической сторон. Более объективный результат получен путем согласования экспертных оценок.

4. Доказано, что высокая степень согласованности мнений в группе экспертов на основе медианы Кемени позволяет практически безошибочно полагаться на оценки экспертов в текущей технической диагностике электросетевого оборудования. При этом медиана Кемени позволяет определить мнение эксперта наименее удаленного от мнений всех остальных экспертов. Это приводит к тому, что оценка эксперта, мнение которого совпадает с медианой Кемени, может иметь существенное отличие от средней арифметической оценки. Асимметрия в распределении оценок, наличие больших выбросов во мнениях являются необходимыми условиями применения медианных оценок.

5. Показано, что предложенная методика технической диагностики текущего состояния на основе согласованных экспертных оценок применима для оценки состояния немаслонаполненного электрооборудования (когда невозможно применение ХАРГ), а также для криогенного электрооборудования, с диэлектрической средой в виде жидкого азота с температурой  $77^{\circ}\text{K}$ .

6. Доказано, что существует возможность ограничения тока короткого замыкания в электрической сети с помощью трансформатора с ВТСП обмотками, в том числе с возможной дополнительной обмоткой для этой цели. При этом в первый полупериод ограничение тока короткого замыкания не так существенно, как в последующие полупериоды за ним. Это обусловлено более быстрым затуханием апериодической составляющей тока короткого замыкания, чем в традиционных трансформаторах с обмоткой из медного провода, а также увеличением температуры сверхпроводящей обмотки ВТСП трансформатора. Возвращение в сверхпроводящее состояние обмотки ВТСП трансформатора в значительной степени зависит от соотношения величин тока короткого замыкания и рабочего тока, а также от толщины слоя стабилизатора в сверхпроводниковом проводе.

7. Ограничение различных видов токов короткого замыкания с помощью ВТСП трансформатора за счет существенного увеличения сопротивления обмоток при потере сверхпроводящего состояния позволяет отказаться от продольно включенных реакторов с высоким индуктивным и активным сопротивлением. При этом снижаются потери активной мощности, повышается надежность и улучшаются технико-экономические показатели систем электроснабжения по сравнению с отдельно установленными обычными реакторами для ограничения токов короткого замыкания.

8. Выявлено непосредственное влияние показателя нелинейности ВАХ на уровень максимальных температур перегрева ВТСП устройства: при малых  $n$  сочетание недостаточного токоограничения и достаточно возросшего сопротивления приводит к максимальному тепловыделению в объеме ВТСП устройства. Это позволяет сделать предположение о недопустимости применения ВТСП устройств с малыми средними показателями нелинейности ВАХ, которое нуждается в проверке физическим экспериментом. Показано, что с увеличением показателя степени нелинейности ВАХ уровень токоограничения существенно увеличивается.

9. Доказана возможность возврата ВТСП устройства в сверхпроводящее состояние в течение цикла бестоковой паузы АПВ, что полностью определяется условиями охлаждения и достигнутой в предшествующем режиме короткого замыкания температурой. Предложен критерий определения допустимой температуры перегрева по уровню тока последующего установившегося режима (предполагается успешное срабатывание АПВ в первом цикле) в случае фиксированного времени бестоковой паузы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Концепция диагностики электротехнического оборудования подстанций и линий электропередачи электрических сетей ОАО "ФСК ЕЭС". – Москва, 2004. – 188 с.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300–97. – утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 08.05.97. – Москва : ЭНАС, 2004. – 153 с.
3. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Ключев [и др.] ; под. ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 657 с.
5. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
6. Алпатов, М. Е. В. В. Соколов и диагностика трансформаторов / М. Е. Алпатов // Соколов В.В. Избранные труды / [сост.: А. Г. Овсянников, В. Н. Осотов, В. Н. Бережной]. – Новосибирск : Сибприн, 2015. – С. 9–10.
7. Соколов, В. В. Опыт обновления и продления срока службы мощных силовых трансформаторов / В. В. Соколов // Соколов В.В. Избранные труды / [сост.: А. Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной]. – Новосибирск : Сибприн, 2015. – С. 98–104.
8. Овсянников, А. Г. Все о трансформаторах / А. Г. Овсянников, В. М. Толчин // Энергоэксперт. – 2015. – № 2. – С. 6–9.
9. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования : справочник / А. И. Ящура. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 504 с.
10. Китушин, В. Г. Макродиагностика технического состояния оборудования / В. Г. Китушин, Ф. Л. Бык, Д. Е. Шерварли // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : сб. науч. трудов. – Санкт-Петербург : Северная звезда, 2010. – Вып. 60 : Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / под ред.: Н. И. Воропая, А. И. Таджибаева. – С. 480–486.



11. Синягин, Н. Н. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики / Н. Н. Синягин, Н. А. Афанасьев, С. А. Новиков. – Москва : Энергоиздат, 1984. – 448 с.
12. Назарычев, А. Н. Расчет и анализ надежности высоковольтных электродвигателей электростанций с учетом влияния режимов и условий эксплуатации / А. Н. Назарычев // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2001. – №1. – С. 32–38.
13. Мошкарин, А. В. Состояние и перспективы развития энергетики Центра России / А. В. Мошкарин, А. М. Смирнов, В. И. Ананьин ; под ред. А. В. Мошкарин ; Иван. гос. энерг. ун-т. – Москва – Иваново, 2000. – 192 с.
14. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. – Москва, 2009. – 27 с.
15. РД 34-38-030-92. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей : рук. норм. док. / утв. зам. Министром топлива и энергетики РФ А. Ф. Дьяковым. – Москва, 1993. – 158 с.
16. РД 34.20.501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей / утв. Президентом РАО "ЕЭС России" А. Ф. Дьяков. – 15-е изд. доп., перераб. – Москва, 1995. – 155 с.
17. Барков, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова // Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок : сб. тр. семинара. – Москва, 1999. – С. 115–156
18. Колпачков, В. И. Производственная эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт энергетического оборудования : справочник / В. И. Колпачков, А. И. Ящура. – Москва : Энергосервис, 1999. – 439 с.
19. Концепция совершенствования системы технического обслуживания и ремонта энергоблоков тепловых электростанций. Обоснование. Критерии. Теория. Стратегия. Экономика. – Москва : Изд-во АО «ЦКБ ЭНЕРГОРЕМОНТ», 1996. – 28 с.

20. Назарычев, А. Н. Выбор рациональной стратегии ремонтов электрооборудования / А. Н. Назарычев // Энергетика : экономика, технологии, экология. – 2001. – № 1. – С.74–79.
21. Назарычев, А. Н. Модели оптимизации межремонтных периодов электрооборудования с учетом результатов диагностирования / А. Н. Назарычев // Вестник ИГЭУ. – 2001. – № 1. – С. 16–20.
22. Осипов, О. И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов / О. И. Осипов, Ю. С. Усынин. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
23. Савельев, В. А. Принципы новой технологии управления техническим состоянием электрооборудования станций и подстанций / В. А. Савельев, А. Н. Назарычев // РНСЭ : материалы докладов. – Казань : Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2001. – Т. II. – С.42–45.
24. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва, 1989. – 32 с.
25. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. – Москва : ФГУП Стандартиформ, 2009. – 10 с.
26. РД 34.45–51.300–97. Объемы и нормы испытания электрооборудования / под общ. ред. : Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004 – 179 с.
27. Осотов, В. Н. Некоторые аспекты оптимизации системы диагностики силового электрооборудования на примере Свердловэнерго : автореф. 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 доступа: [http://www.rao-ees.ru/ru/invest\\_inov/concept\\_2030.pdf](http://www.rao-ees.ru/ru/invest_inov/concept_2030.pdf). – Загл. с экрана.
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/](http://amstm.ru/projects/holding_mrsk/). – Загл. с экрана.

30. Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатьев, Л. В. Виноградова, Ю. Ю. Рогожников, Д. А. Ворошина // Электрические станции. – 2011. – № 5. – С. 36–45.
31. 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. Система компьютерной диагностики маслonaполненного оборудования в рамках энергосистемы / И. В. Давиденко [и др.] // Энергетик. – 2000. – № 11. – С. 52–56.
33. Хальясмаа, А. И. Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Электроэнергетика глазами молодежи-2014 : сб. тр. V междунар. молодёжная науч.-техн. конф. – Томск, 2014. –С. 187–193.
34. 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.
35. Скляр, В. Ф. Диагностическое обеспечение энергетического производства / В. Ф. Скляр, Р. А. Гуляев. – Киев : Техника, 1985. – 184 с.
36. Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем и определение перспектив надежной работы ЕЭС России : тез. докл. / под ред.: А. Г. Мамиконянца, Б. А. Алексеева. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 1999. – 168 с.
37. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8.3. – P. 338–353.
38. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
39. Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике : пер. с фр. / Д. Дюбуа, А. Прад. – Москва : Радио и связь, 1990. – 288 с.

40. Dubois, D. Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets / D. Dubois, H. Prade // *International Journal of General Systems*. – 1990. – Vol. 17.2. – P. 191.
41. Yager, R. R. On a general class of fuzzy connectives / R. R. Yager // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1980. – Vol. 4.3. – P. 235–242.
42. Yager, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking / R. R. Yager // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1988. – Vol. 18.1. – P. 183–190.
43. Прикладные нечеткие системы / под. ред.: Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно ; пер. с яп. Ю. Н. Чернышова. – Москва : Мир, 1993 – 366 с.
44. Klir, G. Foundations of fuzzy set theory and fuzzy logic: a historical overview / G. Klir // *International Journal of General Systems*. – 2001. – Vol. 30.2. – P. 91–132.
45. Altrock, C. V. Fuzzy logic and NeuroFuzzy applications explained. Englewood Cliffs / C. V. Altrock. – New Jersey : Prentice Hall, 1995. – 350 p.
46. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. – 1974. – Vol. 121.12. – P. 1585.
47. Larsen, M. P. Industrial applications of fuzzy logic control / M. P. Larsen // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1980. – Vol. 12.1. – P. 3–10.
48. Lootsma, F. A. Fuzzy logic for planning and decision making / F. A. Lootsma. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1997. – 198 p.
49. Liang, Q. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design / Q. Liang, J. M. Mendel // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2000. – Vol. 8.5. – P. 535–550.
50. Mendel, J. M. Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J. M. Mendel, R. I. John, F. Liu // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2006. – Vol. 14.6. – P. 808–821.
51. Coupland, S. Type-2 Fuzzy Logic and the modelling of uncertainty / S. Coupland, R. John // *Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models* / Ed. by H. Bustince, F. Herrera, J. Montero. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – P. 3–22. – (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 220.)
52. Atanassov, K. T. Intuitionistic fuzzy sets / K. T. Atanassov // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1986. – Vol. 20.1. – P. 87–96.

53. Fuzzy Logic: A Spectrum of Theoretical & Practical Issues / eds. P. P. Wang, E. E. Kerre, D. Ruan. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. – 459 p. – (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 215.)
54. Baczynski, M. Fuzzy Implications / M. Baczynski, B. Jayaram, J. Kacprzyk. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. – 310 p. – (Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 231).
55. Mendel J. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial / J. Mendel // Proceedings of the IEEE. – 1995. – Vol. 83.3. – P. 345–377.
56. Castillo, O. Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications / O. Castillo, P. Melin. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. – 237 p. – (Studies in Fuzziness and Soft Computing Vol. 223).
57. Riid, A. Transparent Fuzzy Systems: Modeling and Control [Электронный ресурс] : Thesis / A. Riid. – Tallinn : Tallinn Technical university, 2002. – Режим доступа : <http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.17.7219>. – Загл. с экрана.
58. Castro, A. R. G. Knowledge discovery in neural networks with application to transformer failure diagnosis / A. R. G. Castro, V. Miranda // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – Vol. 20.2. – P. 717–724.
59. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений / под ред. И. Ф. Шахнова. – Москва, 1976. – С. 172–216.
60. Hosticka, B. Neuronale Netze – und was kommt danach? / B. Hosticka, P. Richert // Elektronik. – 1992. – Vol. 13. – P. 140–144.
61. Kohonen, T. The Self-Organizing Map / T. Kohonen // Proc. of the IEEE. – 1990. – Vol. 78. № 9. – P. 1464–1477.
62. An Automatic Diagnosing System for the Blast Furnace Operating Condition / M. Saito, R. Kimura, T. Sumigama, M. Izumi // Proceedings IECON '84 : 1984 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Keio Plaza Inter, Continental Hotel, Tokyo, Japan, October 22-26, 1984 : industrial applications of microelectronics. – P. 883–888.
63. Koch, M. Ein Vergleich von Entwurfsverfahren für Klassifikatoren auf der Basis der Bayesund Fuzzy-Theorie zur Prozeßsteuerung / M. Koch // 2 Workshop

"Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2. – Ilmenau : Technische Universität Ilmenau, 1993. – P. 198–211.

64. Barschdoff, D. Neural Networks as Signal- and Pattern Classifiers / D. Barschdoff, D. Becker // Technisches Messen. – Oldenbourg Verlag, 1990. – Vol. 57, № 11. – P. 437–444.

65. Баршдорф, Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей / Д. Баршдорф // Приборы и системы управления. – 1996. – №2. – С.48–52.

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

67. 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). – Riga, Latvia, 2015. – 11-13 May. – P. 115–119.

68. Левин, В. М. Интеллектуальная диагностика оборудования – компонент активно-адаптивной электрической сети / В. М. Левин, Д. В. Танфильева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – №2. – С. 272–275.

69. Математическая энциклопедия. В 5 т. / гл. ред. И. М. Виноградов. – Т. 1. – Москва : Советская Энциклопедия, 1977. – 576 с.; Т.4. – Москва : Советская Энциклопедия, 1984. – 608 с.

70. Паномарев, А. С. Принятие решений при нечетком отношении предпочтений на множестве альтернатив : учеб.-метод. пособие / А. С. Паномарев. – Харьков : Изд-в НТУ «ХПИ», 2002. – 32 с.

71. Паномарев, А. С. Нечеткие множества в задачах автоматизированного управления и принятия решения : учеб. пособие / А. С. Паномарев. – Харьков : Изд-во НТУ «ХПИ», 2005. – 232 с.

72. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов (Основное электрооборудование в энергосистемах : обзор отечественного и зарубежного опыта) / Б. А. Алексеев. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.

73. Живодерников, С. В. Зарубежный опыт мониторинга трансформаторного оборудования [Электронный ресурс] / С. В. Живодерников, А. Г. Овсяников, В. А. Русов. – Режим доступа : [http://megaom.ucoz.ru/nornativ/vv\\_oborudovanie/statja\\_zarubezhnyj\\_opyt\\_monitoringa\\_oborudovanija.pdf](http://megaom.ucoz.ru/nornativ/vv_oborudovanie/statja_zarubezhnyj_opyt_monitoringa_oborudovanija.pdf). – Загл. с экрана.
74. Левин, В. М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию / В. М. Левин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 8. – С. 37–42.
75. Левин, В. М. Автоматизация мониторинга силовых трансформаторов / В. М. Левин, Д. В. Кузьмина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 173–176.
76. Организация мониторинга силовых трансформаторов на базе комплекса «Диагностика+» / Г. В. Попов [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 3. – С. 1–4.
77. Вдовико, В. П. Методология системы диагностирования электрооборудования высокого напряжения в условиях его эксплуатации / В. П. Вдовико // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – № 1 (31). – С. 25–32.
78. Ахьеев, Дж. С. Техническая диагностика электрооборудования с использованием нечетких моделей / Дж. С. Ахьеев, В. З. Манусов // Электротехника. Электротехнология. Энергетика : сб. науч. тр. VII междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июнь 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3. Секция «Энергетика». – С. 254–258.
79. Ахьеев, Дж. С. Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой / Д. С. Ахьеев, В. З. Манусов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
80. Ahyoev J. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models / J. Ahyoev, V. Manusov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 324–329.
81. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств : пер. с франц. / А. Кофман. – Москва : Радио и связь, 1982. – 432 с.

82. Гурин, В. В. Опыт диагностики и продления срока службы трансформаторного оборудования в полевых условиях Чехии, Словакии, Болгарии / В. В. Гурин, В. В. Соколов // / В. В. Соколов // Соколов В.В. Избранные труды / [сост.: А. Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной]. – Новосибирск : Сибприн, 2015. – С.73–97.
83. Соколов, В. В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением / В. В. Соколов // Известие АН Энергетика. – 1997. – № 1. – С. 155–168.
84. Методы испытания и диагностики трансформаторного оборудования в эксплуатации / В. В. Соколов, В. П. Маяков, М. Я. Осервассер, В. Н. Бережной // Соколов В. В. Избранные труды / [сост.: А. Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной]. – Новосибирск : Сибприн, 2015. – С. 122–134.
85. Соколов, В. В. Новая методология диагностики трансформаторного оборудования с ранжированием по техническому состоянию / В. В. Соколов // Соколов В. В. Избранные труды / [сост.: А. Г. Овсянников, В.Н. Осотов, В.Н. Бережной]. – Новосибирск : Сибприн, 2015. – С. 172–190.
86. Методы оценки увлажненности мощных силовых трансформаторов / М. Е. Иерусалимов [и др.] // Электротехника. – 1978. – № 1. – С. 42–46.
87. Манусов, В. З. Диагностика технического состояния трансформаторного оборудования на основе нечетких моделей / В. З. Манусов, Е. А. Токаренко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №1–2. – С. 269–272.
88. Ahyoev, J. S. Diagnosing Of The Current Technical Condition Of Electric Equipment On The Basis Of Expert Models With Fuzzy Logic/ S. A. Dmitriev, V. Z. Manusov, J. S. Ahyoev // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) : proceedings, Riga & Cesis, Latvia, 13-14 October, 2016. – Riga & Cesis, Latvia, 2016. – P. 243–246.
89. Ахьеев, Дж. С. Модель диагностики обмоток трансформатора на основе нечетких симптомов / В. З. Манусов, Дж. С. Ахьеев // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : сб. науч. тр. XX науч. техн. конф., Томск, 2-4 декабря 2014 г. В 2 т. – Томск, 2014. – Т. 1. Секция «Эффективность электроэнергетических установок и систем». – С. 105–107.



90. 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. – Т. 13, №2. – С. 114–120.
91. Левин, В. М. Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей : учеб. пособие / В. М. Левин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 97 с.
92. Ахьеев, Дж. С. Анализ текущего состояния трансформаторов на основе экспертных оценок и нечеткой логики / Дж. С. Ахьеев, В. З. Манусов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2 (74). – С. 37–40.
93. Ахьеев, Дж. С. Диагностика текущего состояния высоковольтного оборудования на основе экспертных нечетких моделей / Дж. С. Ахьеев, Е. А. Попов // Наука. Технологии. Инновации. (НТИ-2016) : сб. науч. тр. X всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 05–09 декабря 2016 г. В 9 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. Секция «Энергетика». – С. 50–52.
94. Литвак, Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. – Москва : Радио и связь, 1982. – 184 с.
95. Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование : учебник : в 3ч. / А. И. Орлов. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 567 с.
96. Секретарев, Ю. А. Получение и использование эвристической информации при принятии решений : учеб. пособие / Ю. А. Секретарев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 36 с.
97. Бешелев, С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – Москва : Статистика, 1980. – 263 с.
98. Кемени, Дж. Кибернетическое моделирование: некоторые приложения / Дж. Кемени, Дж. Снелл. – Москва : Советское радио, 1972. – 192 с.
99. Зотьев, Д. Б. К проблеме определения весовых коэффициентов на основании экспертных оценок / Д. Б. Зотьев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, №1. – С.75–78.
100. Новиков, Д. А. Экспертные оценки – инструменты аналитика / Д. А. Новиков, А. И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т.79, №4. – С. 3–4.
101. Ахьеев, Дж. С. Сравнительный анализ методов согласования экспертных оценок в технической диагностике электрооборудования/ Дж. С. Ахьеев, Д. О.

Крюков // Дни науки НГТУ-2016 : материалы науч. студ. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 31–32.

102. Манусов, В. З. Согласование экспертных оценок в задаче текущей технической диагностики трансформаторного оборудования/ В. З. Манусов, Д. О. Крюков, Дж. С. Ахьеев // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы VI всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием 24-25 ноября 2016 г., посвящ. 70-летию Рубц. индустр. ин-та. – Рубцовск, 2016. – С. 267–275.

103. Ахьеев, Дж. С. Согласование экспертных оценок при диагностике текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования / В. З. Манусов, Д. О. Крюков, Дж. С. Ахьеев // Докл. АН высшей школы РФ. – 2017. – № 1(34). – С. 72–84.

104. Петровский, А. Б. Теория принятия решений : учеб. для студентов высших учебных заведений / А. Б. Петровский. – Москва : Академия, 2009. – 400 с.

105. Ахьеев, Дж. С. Перспективы применения трансформаторов со сверхпроводниковыми обмотками в электроэнергетических системах/ Дж. С. Ахьеев, Д. А. Софронов // Наука. Технологии. Инновации. (НТИ-2016) : сб. науч. тр. X Всероссийская науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 05–09 декабря 2016 г. В 9 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. Секция «Энергетика». – С. 58–60.

106. Ахьеев, Дж. С. Перспективы инновационного применения трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой в электрических сетях России / В. З. Манусов, Дж. С. Ахьеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 135–139.

107. Superconducting fault current limiter for railway transport / Fisher L. M. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – Т. 78, №. 14. – P. 1654–1657.

108. Next generation more-electric aircraft: a potential application for HTS superconductors / Luongo C. A. [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Т. 19, №. 3. – С. 1055–1068.

109. Козулин, А. Высокотемпературные сверхпроводниковые трансформаторы - новое поколение подстанционного оборудования / А. Козулин, А. Виноградов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2008. – № 12. – С. 7–9.
110. Анненков, Ю. М. Перспективные материалы и технологии в электроизоляционной и кабельной технике / Ю. М. Анненков, А. С. Ивашутенко. – Томск : Изд-во ТПУ, 2011. – 212 с.
111. Kalsi, S. S. Applications of high temperature superconductors to electric power equipment / S. S. Kalsi. – New Jersey : John Wiley & Sons Inc, 2011. – 312 pp.
112. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – Москва : Энергия, 1970. – 520 с.
113. Манусов, В. З. Математическая модель электромагнитного переходного процесса в электрической сети, содержащей сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа / В. З. Манусов, П. А. Михеев // Электротехника. – 2008. – №7. – С. 50–56.
114. Манусов, В. З. Математическая модель электромагнитного переходного процесса для сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания / В. З. Манусов, Д. А. Павлюченко, П. А. Михеев // Проблемы региональной энергетики = Problems of regional energy. – 2017. – № 2 (34). – С. 45–51.
115. Ахьеев, Дж. С. Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / Дж. С. Ахьеев, В. З. Манусов, Д. А. Павлюченко // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1 (33). – С. 15–23.
116. Ahyoev, J. S. A Study of Superconducting Transformer with Short-Circuit Current Limitation / J. S. Ahyoev, V. Z. Manusov, D. A. Pavlyuchenko // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2018. – Vol. 8, № 1, February. – P. 505–512.
117. Манусов, В. З. Влияние сверхпроводниковых токоограничителей на электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах / В. З. Манусов, П. А. Михеев // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 4 (29). – С. 143–156.

118. Fuzzy Control System for Voltage Regulation In Power Transformers / D. H. Spatti, I. N. Da Silva, W. F. Usida, R. A. Flauzino // *IEEE Latin America Transactions*. – 2010. – Vol. 8, № 1. – P. 51–57.
119. Анализ нечетких признаков неисправности трансформаторного оборудования / В. З. Манусов, Д. И. Коваленко, С. А. Дмитриев, С. А. Ерошенко // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия: Энергетика*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 124–127.
120. Ахъеев, Дж. С. Анализ нечетких признаков неисправностей высоковольтного электрооборудования электроэнергетических систем/ В. З. Манусов, Д. И. Коваленко, Дж. С. Ахъеев // *Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность : материалы республ. науч.-практ. конф. Таджик. техн. ун-т им. акад. М. С. Осими, Душанбе, 24 декабря 2016 г.* – Душанбе, 2016. – С. 25–28.
121. Ахъеев, Дж. С. Анализ технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе нечетких признаков / Дж. С. Ахъеев, В. З. Манусов, Д. В. Орлов // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2017. – № 3 (89). – С. 109–123.
122. Forman, E. H. The Analytical Hierarchy Process: An Exposition / E. H. Forman, S. I. Gass // *Operations Research*. – 2001. – Vol. 49, № 4. – P. 469–487.
123. Lippert, Barbara C. HIST 1.0; Decision Support Software for Rating Buildings by Historic Significance / Lippert, Barbara C., Stephen F. Weber. – National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5683. – Retrieved 2007-08-20.
124. Saaty, T. L. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy / T. L. Saaty // *Network Process*. – 2008. – Vol. 102, Iss. 2. – P. 251–318.
125. Saaty, Thomas L. Principia Mathematica Decernendi: Mathematical Principles of Decision Making. Generalization of the Analytic Network Process to Neural Firing and Synthesis / Saaty, Thomas L. – Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 2010. – 528 pp.
126. Bodin, Lawrence. Exercises for Teaching the Analytic Hierarchy Process [Электронный ресурс] / Bodin, Lawrence; Saul I. Gass // *INFORMS Transactions*

- on Education. – 2004. – Vol. 4, № 2. – P. 1–13. – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/profile/Lawrence\\_Bodin/publication/229051468\\_Exercises\\_for\\_Teaching\\_the\\_Analytic\\_Hierarchy\\_Process/links/02e7e51a73edae55b5000000/Exercises-for-Teaching-the-Analytic-Hierarchy-Process.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Lawrence_Bodin/publication/229051468_Exercises_for_Teaching_the_Analytic_Hierarchy_Process/links/02e7e51a73edae55b5000000/Exercises-for-Teaching-the-Analytic-Hierarchy-Process.pdf). – Загл. с экрана.
127. Wojtasiewicz, G. Fault Current Limitation by 2G HTS Superconducting Transformer-Experimental Investigation / G. Wojtasiewicz // *Acta Physica Polonica A*. – 2016. – Т. 130, №. 2. – С. 516–520.
128. Манусов, В. З. Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В. З. Манусов, Н. В. Александров // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2013. – Т. 323, №. 4. – С. 100–105.
129. Critical Current Distribution along the BI-2212 High Temperature Superconducting Coil / Y. A. Ilyin [et al.] // *Advances in Superconductivity X*. – Springer, Tokyo, 1998. – P. 799–802.
130. Овчинников, В. В. Автоматическое повторное включение / В. В. Овчинников. – Москва : Энергопрогресс, 2001. – 108 с.
131. Grilli, F. Measuring transport AC losses in YBCO-coated conductor coils / F. Grilli, S. Ashworth // *Superconductor Science and Technology*. – 2007. – № 20. – P. 794–799.
132. Brandt, E. Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field / E. Brandt, M. Indenbom // *Physical Review B*. – 1993. – Vol. 48, № 17. – P. 12893–12906.
133. Magnusson, N. AC losses in high-temperature superconducting tapes exposed to longitudinal magnetic fields / N. Magnusson, A. Wolfbrandt // *Cryogenics*. – 2001. – № 41. – P. 721–724.
134. Weber, C. S. Design and Operational Testing of a 5/10-MVA HTS Utility Power Transformer / C. S. Weber, C. T. Reis, D. W. Hazelton // *IEEE Transaction on applied superconductivity*. – 2005. – Vol 15, № 2. – P. 2210–2213.
135. Лутидзе, Ш. И. Сверхпроводящие трансформаторы / Ш. И. Лутидзе, Э. А. Джафаров. – Москва : Научтехлитиздат, 2002. – 206 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ**

ШИРКАТИ САҶОМИИ  
ХОЛДИНГИИ КУШОДАИ  
«**БАРҚИ ТОЧИК**»



OPEN STOCK  
HOLDING COMPANY  
«**BARQI TOJIK**»

734026, ш. Душанбе, хиёбони Исмоили Сомонӣ, 64 734026, Dushanbe, Ismoil Somoni avenue, 64  
☎ +992 372 235-86-68, факс/fax(10992372) 235-86-92, Сомона/saut www.barkitajik.tj, E-Mail:barki.tajik@gmail.com

№ \_\_\_\_\_  
Ба \_\_\_\_\_ аз \_\_\_\_\_

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Дж.С. Ахъёева

Полученные результаты в диссертационной работе Дж.С. Ахъёева на тему «Модели и методы технической диагностики электросетевого оборудования на основе нечеткой логики», рассмотрены и обсуждены на техническом совете ОАХК «Барки Точик».

На сегодняшний день, как и во многих других странах, электрооборудование электроэнергетических систем в значительной степени изношено, отдельные его виды более чем на 60%. В связи с этим, разработанные в диссертации методы диагностики текущего технического состояния электрооборудования представляют значительный практический интерес. Полученные данные позволяют наметить план первоочередных мероприятий по ремонту и обновлению электрооборудования, на основе оценок опытных специалистов (экспертов) и повысить при этом качество управленческих решений.

Диссертационная работа Дж.С. Ахъёева, в связи с вышеизложенным, весьма актуальна и ее результаты будут использованы при оценке состояния основного электрооборудования электрических сетей.

Начальник эксплуатации и  
технического обслуживания



М.Мирзоев

ЧУМХУРИИ  
ТОҶИКИСТОН  
ҶСП  
«ЭНЕРГОРЕМОНТ»



РЕСПУБЛИКА  
ТАДЖИКИСТАН  
ЗАО  
«ЭНЕРГОРЕМОНТ»

734042 1-й проезд проспекта С. Шерози -26. Расчетный счет 20202972813600001281

ОАО «Ориен-банк» г. Душанбе. МФО 350101369 код банка 734001. ИНН 030001422 тел. 222-25-39, 222.25-38

Утверждаю

Ген. директор ЗАО

«ЭНЕРГОРЕМОНТ»

Хушов Ш.С.

2018 г.



### АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы Дж. С. Ахъёева на тему «Модели и методы технической диагностики электросетевого оборудования на основе нечеткой логики».

Для проверки адекватности предложенной автором системы текущей технической диагностики дана оценка технического состояния трансформатора ТДНТ-16000/110.

Трансформатор был выведен из эксплуатации в связи с отключением. По экспертным оценкам, наиболее приоритетной причиной имеющихся признаков является длительное неотключение тока КЗ или недостаточная электродинамическая стойкость обмотки. Вторая по приоритету причина подтвердилась. Это свидетельствует о правдоподобных рассуждениях на основе предложенной автором модели нечетких причинно-следственных отношений.

Разработанная система диагностики позволяет производить анализ текущего технического состояния трансформаторов и другого электрооборудования на основе квалифицированных экспертных оценок.

Таким образом, предложенная система оценки текущего технического состояния электрооборудования, в данном случае, выдала вполне адекватное заключение о состоянии трансформатора. Применение данной системы как рекомендательной может быть вполне оправдано.

Начальник цеха  
ремонта трансформаторов

Мирзоев Сухроб



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

д.т.н., доцент

С.В. Брованов

\_\_\_\_\_ 2018 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Дж.С. Ахьеева в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационной работы Дж.С. Ахьеева на тему «Модели и методы технической диагностики электросетевого оборудования на основе нечеткой логики» в учебный процесс кафедры «Систем электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета.

Разработанные в диссертационной работе модели и методы оценки текущего технического состояния электрооборудования электросетевого комплекса электроэнергетических систем излагаются в дисциплинах «Диагностика электрооборудования систем электроснабжения» и «Диагностика и эксплуатация оборудования объектов и систем электроэнергетики». Материалы диссертационной работы успешно используются при написании выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций, а также в исследованиях аспирантов.

Заведующий кафедрой СЭС  
к.т.н., доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'P' and 'A' followed by a horizontal line.

Д.А. Павлюченко



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**  
**ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени академика М.С. Осими**

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11,  
Факс: (+992 37) 221-71-35, E-mail: [rector.ttu@mail.ru](mailto:rector.ttu@mail.ru), Web: [www.ttu.tj](http://www.ttu.tj)

**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор ТТУ им. акад. М.С. Осими  
Одиназода Хайдар Одина



«                » 2018 г.

**А К Т**

**о внедрении результатов диссертационной работы Ахъёева Джавода Саламшоевича: «Модели и методы технической диагностики электросетевого оборудования на основе нечеткой логики», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.**

Комиссия в составе: председателя д.т.н., доцента Саидзода Р.Х. и членов комиссии к.т.н., доцента Фохакова А.С., зав. каф. «Электрические станции», к.т.н., Султонова Ш.М., к.т.н., доцента Касобова Л.С. и к.т.н., доцента Давлатшоева Д.Д. свидетельствует о том, что следующие результаты диссертационной работы аспиранта Новосибирского государственного технического университета Дж.С. Ахъёева, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе на энергетическом факультете

Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими:

1. Необходимость совмещения системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) с системой оценки текущего технического состояния (ТТС) высоковольтного электрооборудования электроэнергетических систем.
2. Новые модели, для диагностики трансформаторного электрооборудования, основанные на нечетких причинно-следственных отношениях между признаками и причинами неисправностей.
3. Основы для технической диагностики немаслонаполненного электрооборудования, включая трансформаторы с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой и криогенной средой охлаждения.

Эти положения диссертационной работы Дж.С. Ахъёева излагаются в дисциплине по магистерской программе: «Технические средства диагностики электрооборудования высокого напряжения».

Использование указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанной дисциплины с учетом современных научных и практических требований.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ,

Проректор по учебной работе, первый проректор,  
д.т.н., доцент

/ Р.Х. Саидзода

ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Начальник Учебно-методического управления,  
к.т.н., доцент

/ А.С. Фохаков

Заведующий кафедрой «Электрические станции» /

/ Ш.М. Султонов

Доцент кафедры «Электрические станции», к.т.н. /

/ Л.С. Касобов

Доцент кафедры «Электрические станции», к.т.н. /

/ Д.Д. Давлатшоев

Подписи Саидзода Р.Х., Фохакова А.С., Султонова Ш.М., Касобова Л.С. и Давлатшоева Д.Д.

ЗАВЕРЯЮ

Начальник отдела кадров  
и специальных работ



/ С.Т. Бадурдинов

Документ соответствует установленным требованиям.

Технический секретарь

/ М.М. Якубова