

На правах рукописи



АХЪЁЕВ Джавод Саламшоевич

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

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Манусов Вадим Зиновьевич

Официальные оппоненты: **Литвак Валерий Владимирович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, профессор

Хальясмаа Александра Ильмаровна
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра "Автоматизированные электрические системы" Уральского энергетического института, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск

Защита состоится «27» сентября 2018 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации http://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya_dzh.s_aheeva_1528343819_152834603274.pdf

Автореферат разослан «___» июля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 маслонаполненного 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 особенно-

стями 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.

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. Овсянников, В.М. Левин и др.

Цель диссертационной 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**:

1. Выполнить критический обзор методов оценки технического состояния электрооборудования и необходимости применения методов искусственного интеллекта.
2. Составить матрицы нечетких причинно-следственных отношений между признаками (симптомами) и реальными причинами дефектов электрооборудования.
3. Разработать метод решения системы линейных нечетких алгебраических уравнений для электрооборудования, включая трансформаторы со сверхпроводящей высокотемпературной обмоткой.
4. Разработать метод определения степени согласованности экспертов на основе медианы Кемени.
5. Верифицировать математическое описание электромагнитных переходных процессов в ВТСП трансформаторе с функцией ограничения тока КЗ на физической модели.

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.

Методы исследований. В работе используются теория электромагнитных процессов, теория нечетких множеств, метод анализа иерархий, а также методы согласования экспертных оценок.

Научная новизна работы:

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.

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.

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».

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.

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 7 работ в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Российской Федерации, 6 работ включены в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS и 11 работ в прочих изданиях. В работах, опубликованных в соавторстве личный вклад автора не менее 60 %.

Структура и объем диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена смена парадигмы планово-предупредительных ремонтов электрооборудования на концепцию системы ремонтов по текущему техническому состоянию оборудования электросетевого комплекса. Развитие электроэнергетических систем и повышение требований к качеству их функционирования в значительной степени зависят 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.

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.

Концепция системы планово-предупредительных ремонтов. Разработка системы рациональной эксплуатации и планового ремонта оборудования была начата в СССР в 1923 году. Она заключалась в определении численности ремонтного персонала по полному списку электрических машин, трансформаторов, низковольтной и высоковольтной аппаратуры, освещения, в проектировании электроремонтных мастерских на каждом из заводов.

При использовании системы планово-предупредительных ремонтов (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.

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.

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

- 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:

- 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.

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.

Во второй главе показаны возможности и преимущества использования нечеткой логики в задачах текущей диагностики. 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,

modus ponens должен быть расширен таким образом, чтобы фиксировать неопределенность, результатом которого является обобщенный *modus ponens*:

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

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

$$(p' \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q' \quad \Rightarrow \quad B' = A' \circ R_{A \rightarrow B} \quad (1)$$

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 1.

$$\begin{array}{l} \text{Импликация:} \quad \text{если } (x, \mu_A(x)) \in A \text{ тогда } (y, \mu_B(y)) \in B \\ \text{Антецедент:} \quad (x, \mu_{A'}(x)) \in A' \text{ (аналогично } A) \\ \hline \text{Вывод:} \quad (y, \mu_{B'}(y)) \in B' \text{ (аналогично } B) \end{array}$$

Функция принадлежности вывода $\mu_{B'}(y)$ оценивается согласно

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

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

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

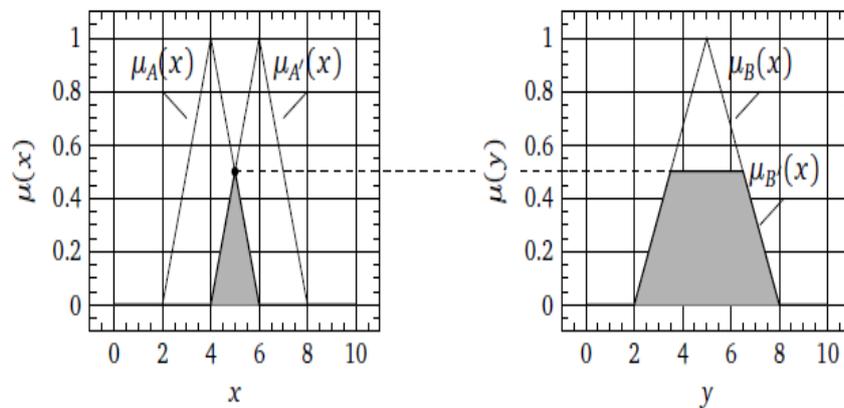


Рисунок 1 – Нечеткая импликация минимального типа

На рисунке 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).

В третьей главе рассмотрены предложенные нечеткие модели для диагностики текущего технического состояния электрооборудования. 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 сетей 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. Современное высоковольтное электрооборудование, в частности трансформаторы, в значительной степени выработали свой эксплуатационный ресурс. Например, в энергосистеме Республики Таджикистан срок эксплуатации трансформаторов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Длительности эксплуатации трансформаторов 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

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

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

Отношение этих нечетких множеств можно обозначить как

$$B = A \bullet R,$$

где знак « \bullet » 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).

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.

Дефекты, обнаруживаемые при повреждении обмоток у силовых трансформаторов, как следствие некоторых предпосылок-симптомов (таблица 2):

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 2 – 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

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, 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 вектор-столбец приоритетных причин неисправностей.

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

Примем аналогичную модель для высоковольтных выключателей пространство возможных повреждений и причин их возникновения будет, конечно, другим. Оценка экспертов также изменится.

Неисправности, обнаруженные у высоковольтного выключателя, будут следующими (таблица 3)

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.

Таблица 3 – 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

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

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. Либо, если вводить метрику и поместить элементы множества P в пространство, то элементы будут представляться точками этого пространства, что схематично можно видеть на рисунке 2.

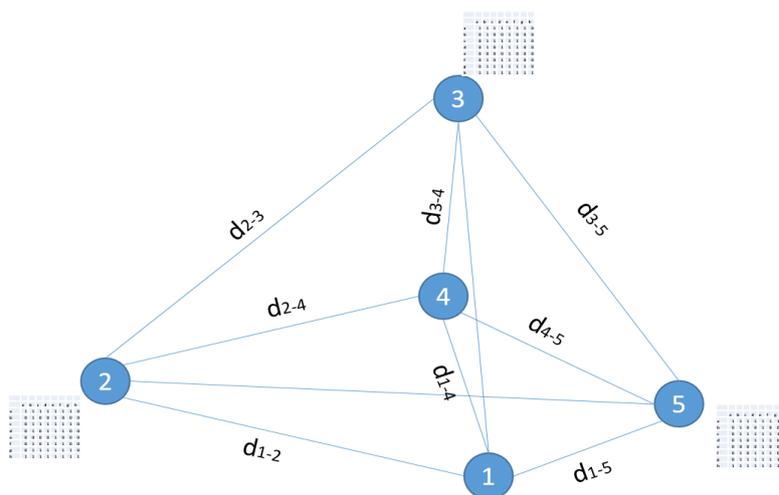


Рисунок 2 — Пространство экспертных мнений

Расстояния можно определить по выражению (2)

$$d(P_i, P_j) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n |p_{i,k,l} - p_{j,k,l}|, \quad (2)$$

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

$$M^*(P_1, \dots, P_m) = \arg \min_P \sum_{i=1}^m d(P, P_i). \quad (3)$$

И, представив полученные расстояния в виде таблицы, по выражению (3) отыщем медиану Кемени.

Результаты расчетов медианы Кемени для каждого контролируемого параметра приведены ниже.

По первому признаку медианой оценкой оказалось мнение эксперта под № 7. По второму признаку медианой оказались мнения экспертов под № 1 и №6. По третьему признаку медианой оказалось мнение эксперта под № 7. По четвертому признаку медианой оказалось мнение эксперта под № 4. По совокупности всех оценок можно получить совокупность среднеарифметических и медианных оценок по всем контролируемым параметрам (таблица 4).

Таблица 4 – Средние и медианные экспертные оценки

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
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
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
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, 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 является необходимым условием для целесообразности применения медианы Кемени и других непараметрических алгебраических методов. Однако, медиана Кемени указывает лишь на эксперта,

мнение которого имеет «наибольший вес», но это еще не характеризует общую согласованность мнений. В работе предпринята попытка дать оценку согласованности мнений экспертов по экспертизе.

Оценка согласованности экспертных мнений осуществляется по следующей формуле

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

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 $0,5 \leq \text{ОС} < 0,9$.

В четвертой главе рассмотрена математическая модель электромагнитных процессов и ограничение токов КЗ с помощью трансформаторов с ВТСП обмотками при следующих допущениях: ВТСП провод переходит из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние равномерно по всей длине, все элементы сети, кроме ограничивающего сопротивления, являются линейными. 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. Также модель позволяет учесть начальную и конечную величины индуктивности сверхпроводникового токоограничителя до начала и после окончания электромагнитного переходного процесса соответственно. Рассмотрим схему, содержащую сверхпроводящий ограничитель тока (СОТ) (рисунок 3).

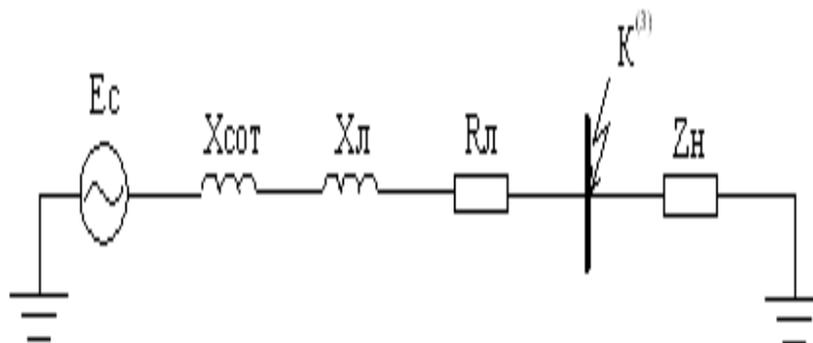


Рисунок 3 – Однолинейная схема для построения математической модели E_C – электродвижущая сила (ЭДС) источника напряжения; $X_{СОТ}$ – индуктивное сопротивление СОТ; $X_{Л}$ – индуктивное сопротивление КЛ; $R_{Л}$ – активное сопротивление КЛ; $Z_{Н}$ – комплексное сопротивление нагрузки потребителя

По второму закону Кирхгофа имеем:

$$E(t) = \frac{d\psi_{COT}(t)}{dt} + \frac{d\psi_K(t)}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (4)$$

где ψ_{COT} и ψ_K – потокосцепления СОР 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:

$$\psi_K(t) = L_K(t) \cdot i(t) = L_K \cdot i(t) \quad (5)$$

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

$$\psi_{COT}(t) = L_{COT}(t) \cdot i(t) \quad (6)$$

С учётом вышеприведённых уравнений получаем дифференциальное уравнение переходного процесса

$$E(t) = \frac{d[L_{COT}(t) \cdot i(t)]}{dt} + \frac{d[L_K(t) \cdot i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \quad (7)$$

С учётом свойства производной произведения двух функций преобразуем дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} E(t) = & \frac{d[L_{COT}(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_{COT}(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + \\ & + \frac{d[L_K(t)]}{dt} \cdot i(t) + L_K(t) \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} + i(t) \cdot R_K \end{aligned}$$

Исходя из физической природы индуктивности, а также в виду того, что индуктивность кабеля не зависит от времени, выражение (7) несколько упрощается

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

Как известно, для того чтобы нарушить сверхпроводящее состояние необходимо увеличить либо температуру, либо величину воздействующего магнитного поля (рисунок 4). В быстродействующих СОР используется как раз увеличение магнитного поля в момент КЗ в сети. Анализ зависимостей внешнего сопротивления СОР позволяет сделать вывод о целесообразности введения адекватной физической функции, монотонной, легко интегрируемой и дифференцируемой функции. В качестве такой функции может быть применена экспонента, как это изображено на рисунке 5.

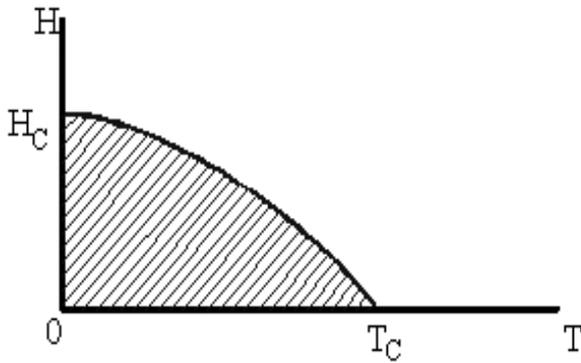


Рисунок 4 – Область существования сверхпроводимости

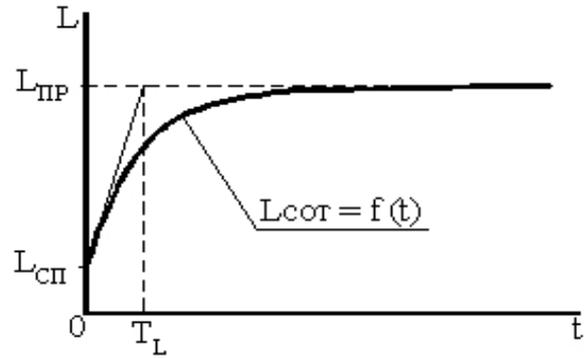


Рисунок 5 – Изменения индуктивности СОТ при КЗ в сети

Тогда изменение индуктивности СОТ как функции времени

$$L_{СОТ}(t) = L_{ПП} + (L_{СП} - L_{ПП}) \cdot e^{-\frac{t}{T_L}}, \quad (8)$$

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

С математической точки зрения применение метода припасовывания для отыскания параметров электромагнитного переходного процесса при учёте индуктивности СОТ функцией, приведёт к погрешности в определении величин параметров переходного процесса. Решение поставленной задачи, даже с учётом изменения индуктивности СОТ (рисунок 5) численными методами, не является достаточно наглядным с точки зрения влияния динамики изменения индуктивности СОТ на электромагнитный переходный процесс.

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

$$\frac{dy}{dx} + P(x) \cdot y = Q(x) \quad (9)$$

Решение такого уравнения находится в виде

$$y = e^{-\int P(x)dx} \cdot \left[\int Q(x) \cdot e^{\int P(x)dx} dx + C \right] \quad (10)$$

В итоге решение уравнения электромагнитного переходного процесса будет выглядеть в виде

$$i(t) = e^{-\int P(t)dt} \cdot \left[\int Q(t) \cdot e^{\int P(t)dt} dt + C \right], \quad (11)$$

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.

Если в выражении (11) 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.

Учитывая, что ВТСП трансформатор имеет криогенную диэлектрическую среду для изоляции обмоток применение метода хроматографического анализа растворенных в масле газов не применима, поэтому в работе предложено применение нечетких моделей для этих трансформаторов.

Рассмотрим набор следующих возможных повреждений, обнаруживаемых у ВТСП трансформаторов (таблица 5):

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 5 – 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

Аналогичным образом, как показано в третьем разделе, решение системы нечетких уравнений дает следующий вектор - столбец приоритетности 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

В целом взаимосвязь между дефектами и состояниями электрооборудования может быть представлена в виде нечетких функций рисунок 6 и в виде таблицы соответствия рисунок 7.

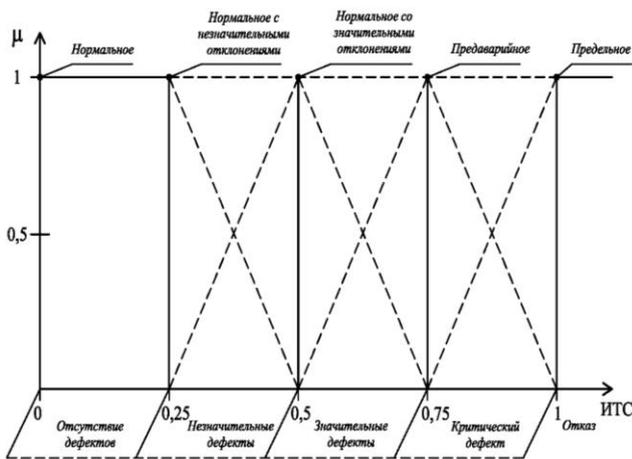


Рисунок 6 – Функции принадлежности состояний электрооборудования



Рисунок 7 – Соотношение дефектов и состояний электрооборудования

В пятой главе были выполнены экспериментальные исследования на опытном образце ВТСП трансформатора в однофазном исполнении. 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 вольт-амперной характеристики.

Превышение критического тока сверхпроводника способствует началу развития и распространения нормальной зоны, то есть зоны, в которой разрушена сверхпроводимость. Вместе с тем, развитие нормальной зоны в устройствах из высокотемпературных сверхпроводников происходит равномерно по всей длине. Это эквивалентно, например, тому, что 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 нагрузку.

Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления можно удовлетворительно аппроксимировать с помощью степенной функции вида

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{I}{I_k}\right)^n \quad (12)$$

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 «крутизна» 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 8). Замеры производились при помощи анализатора FLUKE 435-II. Видно хорошее совпадение осциллограмм тока в модели и опыте.

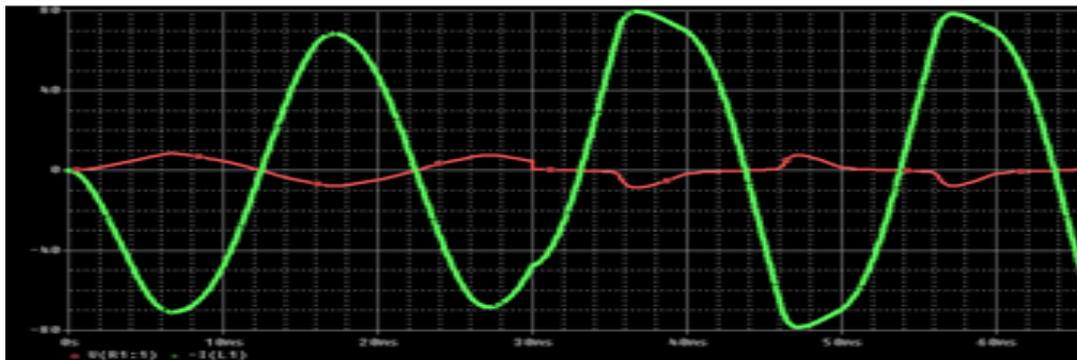


Рисунок 8 – Результаты моделирования короткого замыкания за катушкой в программе PSpice. Замыкание происходит на 30мс (ток показан зелёным)

Из осциллограмм видно, что ограничение тока сопровождается срезом вершин синусоидального сигнала.

Уже в начале работы над проектом в фонд организации поступило 40 метров высокотемпературной сверхпроводящей YBCO ленты, сделанной специально под заказ компанией «SuperOx». Вся лента была использована для разработки физической модели сверхпроводящего трансформатора мощностью 8 кВт, напряжениями 220/110 В (рисунки 9–10).

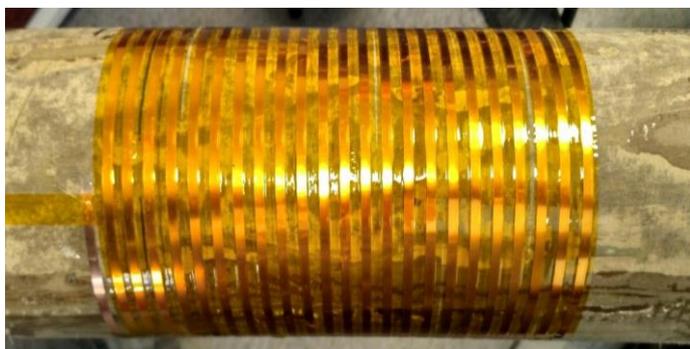


Рисунок 9 – Промежуточный этап намотки сверхпроводящей ленты на каркас



Рисунок 10 – Обмотки 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.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении к диссертации содержатся материалы, подтверждающие внедрение данной работы.

Основными результатами диссертационной работы являются:

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° К.
6. Доказана, 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 разных 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 вольт-амперной характеристики на уровень максимальных температур ВТСП трансформатора: при малых n сочетание недостаточного токоограничения и достаточно возросшего сопротивления приводит к максимальному тепловыделению в обмотках. Это позволяет сделать предположение о недопустимости применения ВТСП трансформатора 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Ахъёев, Дж. С.** Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой / В. З. Манусов, Д. С. Ахъёев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
2. **Ахъёев, Дж. С.** Нечеткие модели распределенной генерации возобновляемых источников энергии Республики Таджикистан / Дж. С. Ахъёев, А. К. Киргизов, Э. Г. Ядагаев // Науч. вестн. НГТУ. – 2016. – №3(64). – С. 117–131.
3. **Ахъёев, Дж. С.** Анализ текущего состояния трансформаторов на основе экспертных оценок и нечеткой логики / В. З. Манусов, Дж. С. Ахъёев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2 (74). – С. 37–40.

4. **Ахъёев, Дж. С.** Перспективы инновационного применения трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой в электрических сетях России / В. З. Манусов, Дж. С. Ахъёев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 135–139.
5. **Ахъёев, Дж. С.** Обоснование использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии для покрытия дефицита мощности в Республике Таджикистан / В. З. Манусов, З. С. Ганиев, Дж. С. Ахъёев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 139–142.
6. **Ахъёев, Дж. С.** Создание интегрированной системы электроснабжения острова Русский и управление её режимами / В. З. Манусов, Н. Хасанзода, Дж. С. Ахъёев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 142–145.
7. **Ахъёев, Дж. С.** Оптимизация режимов городских электрических сетей мегаполиса / В. З. Манусов, Дж. С. Ахъёев, А. К. Киргизов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 1. – С. 189–192.

Публикации в зарубежных конференциях и изданиях, входящих в нукометрические базы данных Web of Science и Scopus:

8. **Ahyoev, J. S.** Construction and optimization of a power complex with a distributed generation on the basis of renewables and methods of artificial intelligence (on the example of the Republic of Tajikistan) / J. S. Ahyoev, V. Z. Manusov, A. K. Kirgizov // E3S Web of Conferences. International Conference on Sustainable Cities (ICSC 2016), May 19, Ekaterinburg, Russia. – Ekaterinburg, Russia, 2016. – Vol. 6. – С. 23–29.
9. **Ahyoev, J. S.** The Effective Use of STATCOM in the Electrical System of the Republic of Tajikistan to Reduce the Losses of Active Power in the Electric Network / V. Z. Manusov, A. K. Kirgizov, J. S. Ahyoev // 13th international scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering, Novosibirsk, 03-06 октября 2016 г. : in 12 vol. – Novosibirsk, 2016. – Vol. 1, p. 3.– P. 60–63.
10. **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.
11. **Ахъёев, Дж. С.** Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В. З. Манусов, Д. А. Павлюченко, Дж. С. Ахъёев // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1 (33). – С. 15–23.
12. **Ahyoev, J. S.** Optimization of Power Distribution Networks in Megacities / V. Z. Manusov, P. V. Matrenin, J. S. Ahyoev, L. S. Atabaeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 72.
13. **Ahyoev, J. S.** A Study of Superconducting Transformer with Short-Circuit Current Limitation / V. Z. Manusov, D. A. Pavlyuchenko, J. S. Ahyoev // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2018. – Vol. 8, № 1, February. – P. 505–512.

Материалы международных и всероссийских конференций:

14. **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.
15. **Ахьеев, Дж. С.** Техническая диагностика электрооборудования с использованием нечетких моделей / В.З. Манусов, Дж. С. Ахьеев // Электротехника. Электротехнология. Энергетика : сб. науч. тр. VII междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3. Секция «Энергетика». – С. 254–258.
16. **Ahyoev, J.** Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models / V. Manusov, D. Ahyoev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 324–329.
17. **Ахьеев, Дж. С.** 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 нояб. 2016 г., посвящ. 70-летию Рубц. индустр. ин-та. – Рубцовск, 2016. – С. 267–275.
18. **Ахьеев, Дж. С.** Анализ нечетких признаков неисправностей высоковольтного электрооборудования электроэнергетических систем / В. З. Манусов, Д. И. Коваленко, Дж. С. Ахьеев // Электроэнергетика, гидроэнергетика, надежность и безопасность : материалы респ. науч.-практ. конф, Душанбе, 24 декабря 2016 г. / Таджик.техн.ун-т им. академика М. С. Осими. – Душанбе, 2016. – С. 25–28.
19. **Ахьеев, Дж. С.** Согласование экспертных оценок при диагностике текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования / В. З. Манусов, Д. О. Крюков, Д. С. Ахьеев // Докл. АН высшей школы РФ. – 2017. – № 1(34). – С. 72–84.
20. **Ахьеев, Дж. С.** Анализ технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе нечетких признаков / В. З. Манусов, Дж. С. Ахьеев, Д. В. Орлов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 3 (89). – С. 109–123.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 1016. Подписано в печать 09.07.2018 г.