

На правах рукописи



ВЫСОГОРЕЦ Светлана Петровна

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАСЕЛ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 35 – 110 КВ.**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт – Петербургском государственном политехническом университете» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Научный руководитель - кандидат технических наук, профессор  
**Васильев Анатолий Петрович**

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
**Андреев Александр Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент  
**Скорняков Владимир Анатольевич**

Ведущая организация           Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «14» марта 2013г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургском государственном политехническом университете» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29, первый учебный корпус, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.11  
кандидат технических наук, доцент



Максим Георгиевич Попов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Наиболее важным и дорогостоящим оборудованием электрических сетей являются силовые трансформаторы. В России в настоящее время больше половины эксплуатируемого парка силовых трансформаторов работают с превышением назначенного ресурса. Общий износ основных фондов ОАО «МРСК Северо-Запада» составляет по состоянию на 2011 год 63,7 %. Анализ причин отказов показывает, что их значительное количество обусловлено эксплуатацией оборудования со сроком службы более 25 лет. Из исследований ряда авторов следует, что в среднем около 40% отказов вызваны развивающимися дефектами, которые могли быть устранены на ранней стадии развития. В силовых трансформаторах 35 – 110 кВ из дефектов износового характера часто встречается увлажнение изоляции и загрязнение примесями, образующимися при старении масла. В данных условиях работы возрастает роль, как технической диагностики энергетического оборудования, так и проведения превентивных мер при осуществлении технического обслуживания.

Группа залитых электроизоляционных масел в силовые трансформаторы напряжением 35 – 110 кВ (масла со сниженной противоокислительной стабильностью) имеет менее жесткие требования к качеству, по сравнению с требованиями, предъявляемыми к качеству масел силовых трансформаторов напряжением 220 кВ и более. Поэтому проблема оценки качества эксплуатационных масел, как системы мер обеспечивающих надежность и долговечность силовых трансформаторов, наиболее актуальна для трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ.

Значительное ухудшение качества эксплуатационных масел, неизбежно ведет к электрическому и механическому износу целлюлозной изоляции, восстановить которую практически невозможно, вместе с тем можно снизить скорость старения изоляционных материалов. Своевременное проведение мероприятий по поддержанию стабильных характеристик изоляции путем постоянного удаления продуктов старения из эксплуатационного масла и своевременного восстановления его ресурса является превентивной мерой позволяющей обеспечить требуемый уровень надежности маслонаполненных трансформаторов. Для своевременного принятия мер, направленных на повышение надежности и долговечности силовых трансформаторов, необходим научный анализ и поиск решений.

Отмеченные обстоятельства определяют **актуальность темы**, как в теоретических, так и в практических аспектах, и востребованность ее результатов в деятельности предприятий осуществляющих эксплуатацию силовых трансформаторов.

В диссертации развиты критерии оценки ресурса жидкой изоляции, так как общепризнанно, что остаточный ресурс твердой изоляции тесно связан с остаточным ресурсом трансформаторного масла, в конечном итоге влияющий на надежность оборудования. Большой вклад в изучение проблем обеспечения надежности в электроэнергетике внесли член-корр. РАН, профессор А.Ф. Дьяков, д.т.н., профессор, чл. корр. РАН Н.И. Воропай, д.т.н., профессор М.Ш. Мисриханов, д.т.н., профессор С.И. Кривошеев, зав.НИС, к.т.н. А.Е. Монастырский, д.т.н., профессор Ю.Я. Чукреев, д.т.н., профессор А.М. Андреев, д.т.н., профессор М.А. Короткевич.

**Целью работы** является разработка новых методов и алгоритма оценки качества эксплуатационных масел, как системы мер обеспечивающих надежность и долговечность силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ. Достижение поставленной цели связывается в данной диссертационной работе с **решением следующих задач**:

1. Проведение обобщения результатов исследовательских работ по изучению химической структуры трансформаторных масел, теоретических основ окислительных процессов протекающих в них. Анализ факторов влияющих на процессы старения масел. Определение оптимальных периодов воздействия на процессы окисления масел, позволяющих продлить срок эксплуатации, как масел, так и силовых трансформаторов.

2. Проведение оценки достаточности перечня регламентированных при текущей эксплуатации показателей качества масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ с точки зрения обеспечения надежности оборудования в условиях эффективного управления активами. Поиск методов позволяющих оценивать качество эксплуатационных трансформаторных масел на перспективу.

3. Разработка концептуальной математической модели направленной на исследование возможности на основе измеренных значений регламентированных показателей качества масел прогнозировать снижение ресурса масел. Разработка и проведение научного эксперимента.

4. Разработка новых методов и алгоритма оценки качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ.

5. Проведение научного анализа существующего подхода к организации контроля качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ, как процесса обеспечивающего надежность энергосистем, определение проблем и формирование предложений по его доработке.

**Объектом исследования** является процесс изменения качества изоляционных масел при эксплуатации маслонаполненных силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ без специальных защит масла. **Предметом исследования** является корреляция ряда показателей качества эксплуатационных масел от степени его старения с последующей оценкой на ее основе эффективности существующего подход при организации контроля силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ.

**Методы исследования.** В ходе исследований использованы системный анализ, теория вероятностей, теория надежности, теория принятия решений, методы математической статистики, корреляционный и регрессионный анализ, непараметрические методы статистики. При организации лабораторных экспериментов использованы стандартизированные методики измерения показателей качества трансформаторных масел.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Впервые установлены правила классификации трансформаторов на группы по противоокислительной стабильности, позволяющие прогнозировать снижение ресурса масел на основе измеренных показателей качества. В основу правил заложена разработанная модель, представленная одноуровневым бинарным деревом.

2. На основе созданной математической модели впервые разработан «Алгоритм подбора системы мер, направленных на поддержание удовлетворительного качества эксплуатационных масел». Посредством вышеуказанного алгоритма определяются оптимальные сроки проведения работ и набор мероприятий, необходимых для поддержания качества эксплуатационных масел в удовлетворительном состоянии.

3. Впервые, в качестве способа тестовой оценки ресурса эксплуатационных масел трансформаторов, предложена методика измерения противоокислительной стабильности, стандартизированная в ГОСТ 981-75.

4. Впервые разработан «Метод определения объема материалов, номенклатуры и порядка проведения работ по восстановлению ресурса эксплуатационных трансформаторных масел».

**Практическая значимость** работы заключается:

1. В установлении наиболее рационального способа восстановления эксплуатационных свойств трансформаторных масел, дающего максимальный технико-экономический эффект, а именно: проведение работ по восстановлению утраченного ресурса масел непосредственно на работающем оборудовании. Предложенные методы и алгоритм позволяют выбрать оптимальный момент проведения профилактических работ, определить объем материалов, номенклатуру и порядок проведения работ для достижения максимального эффекта с минимальными затратами. Предложенный способ организации технической эксплуатации силовых трансформаторов позволяет увеличить срок службы масел, соответственно сократить их расход, а также продлить межремонтный период работы силовых трансформаторов.

2. В повышении надежности и долговечности трансформаторов. Поддерживая при эксплуатации трансформаторов оптимальное качество залитых изоляционных масел, предотвращая образование продуктов глубокого окисления при старении масел, тем самым повышается надежность и продлевается ресурс трансформаторов: посредством уменьшения гидролитической деструкции целлюлозной изоляции предотвращается снижение ее механической прочности.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Обоснование целесообразности введения нового показателя качества эксплуатационных масел – «стабильность против окисления», позволяющего проводить тестовую оценку ресурса масел.

2. Новый «Алгоритм подбора системы мер, направленных на поддержание удовлетворительного качества эксплуатационных масел» разработанный на основе созданной однофакторной математической модели.

3. Новый «Метод определения объема материалов, номенклатуры и порядка проведения работ по восстановлению ресурса эксплуатационных трансформаторных масел», основанный на организации специального лабораторного эксперимента.

4. Новые лабораторные методики обработки трансформаторных масел и адсорбентов.

5. Новые требования к качеству эксплуатационных масел и объему плановых периодических измерений силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ, как к мерам, обеспечивающим поддержание стабильных характеристик изоляции трансформаторов.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований:** Достоверность результатов обеспечивается использованием обширного статистического материала по отказам трансформаторов; воспроизводимостью результатов экспериментов; применением современного программного комплекса для расчетов. Результаты работы находятся в согласии с известными теоретическими положениями.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались на: Научно-техническом совете (далее НТС) ОАО «МРСК Северо-Запада» (г.Санкт-Петербург, 2007); НТС ОАО «МРСК Северо-Запада» (г.Сыктывкар, 2009); 81-м Международном научном семинаре им. Ю.Н.Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г.Санкт-Петербург, 2009); 34-м заседании Международного научно-практического семинара «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования» ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» (г.Санкт-Петербург, 2010); 83-м Международном научном семинаре им. Ю.Н.Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г.Кинешма, 2011); НТС ОАО «МРСК Северо-Запада» (г.Псков, 2012); Научно-техническом совете ОАО «МРСК Северо-Запада» «Комиэнерго» (г.Сыктывкар, 2012 год); Заседании кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» (г.Санкт-Петербург, 2012).

**Реализация результатов работы.** Результаты исследования используются в ОАО «МРСК Северо-Запада». Разработанные методы включены в стандарт организации ОАО «МРСК Северо-Запада» «Диагностика маслонаполненного оборудования по результатам испытаний трансформаторного масла», основные положения разработанных методов и методик вошли в «Инструкцию по проведению экспериментальных работ при оценке восприимчивости трансформаторного масла к воздействию антиокислительной присадки (ионол)». Разработанные методы и алгоритм в феврале 2012 года рассмотрены на НТС ОАО «МРСК Северо-Запада» одобрены, признаны актуальными и рекомендованы к внедрению в филиалах ОАО «МРСК Северо-Запада».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, из них 1 в издании рекомендованных ВАК.

**Структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 100 наименований, 17 приложений, включает 146 страниц машинописного текста, 19 рисунков, 14 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет, цель, задачи и методы исследования, раскрыты научная новизна и практическая ценность результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

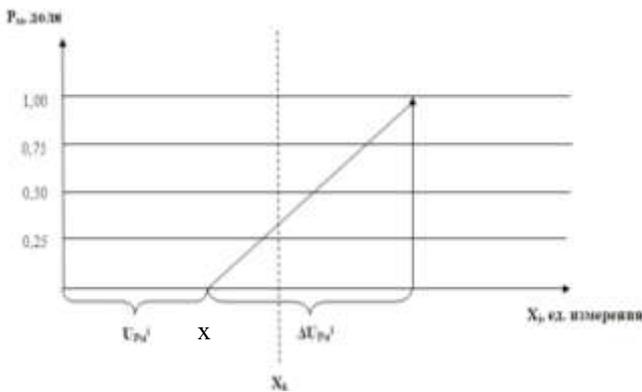
**В первой главе** приведен обзор научно-исследовательских работ по изучению химической структуры трансформаторных масел, кинетической закономерности окислительных процессов протекающих в нем.

Установлено, что наиболее эффективным периодом воздействия на окислительный процесс масла с целью его предотвращения является время завершения индукционного периода окисления (периода, в течение которого отсутствуют видимые изменения качества масла), соответственно, наиболее эффективными являются мероприятия, направленные на его продление. Вместе с этим, установлено, что существующие пороговые значения ряда регламентированных показателей качества масла ориентированы на глубокие стадии старения, в период которых проведение работ по восстановлению ресурса масла на работающем оборудовании неэффективно.

Существенным недостатком контроля в текущей эксплуатации силовых трансформаторов является отсутствие каких-либо методов прогноза качества эксплуатационных масел. Решить данную проблему позволяет измерение стабильности против окисления трансформаторного масла, стандартизированное ГОСТ 981-75. Однако, измерение стабильности, является сложным, трудоемким лабораторным анализом, поэтому оправдано определить маркеры, с помощью которых можно выявлять объекты, требующие анализа по предложенному методу. С этой целью была выдвинута гипотеза о существовании корреляции показателей качества и стабильности масла.

**Во второй главе** для эмпирической проверки и доказательства выдвинутого предположения разработана концептуальная математическая модель, определена ее структура и параметры. Исходя из предмета исследования, определена выборка силовых трансформаторов из всей генеральной совокупности, подлежащая анализу, а также объем проводимых измерений, подобраны методики измерений, условия процесса окисления эксплуатационного масла и пороговые значения.

На модели представленной графически (рисунок 1) значения показателей качества масла ( $X_i$ ) откладываются на оси абсцисс, значения доли утраченного ресурса масла ( $P_M$ ) – на оси ординат. На основе полученных знаний установлено наличие двух областей состояния масла: область ( $U_{PM}^i$ ), описанная диапазоном величин ( $X_i$ ) измеряемого показателя ( $i$ ), в пределах которых вероятность необратимого ухудшения качества масел является минимальной и практически постоянна (индукционный период), и область ( $\Delta U_{PM}^i$ ), описываемая промежутком времени, в течение которого нарастает вероятность необратимого ухудшения качества масла.



**Рисунок 1 - Изменение вероятности ухудшения показателей качества масла, характеризующих его утраченный ресурс.**

$P_M$  – вероятная доля утраченного ресурса, измеряется в долях,  $P_M \in (0 \div 1)$ , шаг изменения – 0,25;  $X_i$  – значение показателя качества масла, измеряется в единицах применительно к виду измерения;  $i$  – наименование показателя качества масла,  $i \in (0 \div m)$ ;  $m$  – множество показателей качества масла ( $m=4$ ).

Точкой ( $X$ ) на оси абсцисс графика является значение показателя качества масла ( $i$ ), указывающее на завершение индукционного периода. Исходя из кинетики окислительного процесса и состава, образующихся в масле продуктов окисления следует, что индикативностью к процессам старения масел обладают следующие показатели качества: кислотное число (далее  $KЧ$ ), водорастворимые кислоты и щелочи (далее  $ВКЩ$ ), содержание антиокислительной присадки агидол-1 (далее  $Присадка$ ), тангенс диэлектрических потерь масла (далее  $Tg\delta_m$ ).

Для оценки степени старения масла подобран метод измерения противоокислительной стабильности (далее *Стабильность*) по ГОСТ 981-75.

Силовые трансформаторы напряжением 35 и 110 кВ являются конструктивно различными электрическими аппаратами, однако, происходящие процессы термоокислительного старения залитых масел одинаковы для трансформаторов всех классов напряжения. Непараметрический метод Манна-Уитни позволит доказать вышеуказанное утверждение. Для проведения обязательного априорного анализа подобран одномерный непараметрический метод «ящика с усами». В случае наличия существенной асимметрии изучаемых признаков для корректного применения корреляционно-регрессионного анализа предложено проводить математическое преобразование входных данных логарифмированием и/или извлечением квадратного корня. Для построения

модели взаимосвязи показателей качества и степени старения масла определен метод корреляционно-регрессионного анализа, в процессе которого оценивается теснота взаимосвязи с применением шкалы Чеддока. С целью характеристики аналитического вида вышеуказанной зависимости следует провести построение уравнения регрессии с помощью регрессионного анализа. Подходящим для выявления эффектов взаимодействия является дисперсионный анализ.

В ходе проведения статистической обработки результатов исследований представим степень старения масел посредством категориальных переменных: удовлетворительная и неудовлетворительная *Стабильность*. Исходя из заданных условий представления результатов измерений, в качестве методов, позволяющих установить правила классификации трансформаторов на группы по классу противоокислительной стабильности выбраны три: деревья классификаций, дискриминантный анализ, логистическая регрессия. Проверку значимости различий значений факторов (показателей качества масла и возраста) в группах трансформаторов с разной стабильностью масла проведем с применением ящичных диаграмм. При ассиметричном распределении факторов, наличии квазивыбросов и выбросов в данных, значимость различий показателей качества масла для разных классов стабильности следует проверять на основе медианных значений с доверительными интервалами (медианы более устойчивы к выбросам).

**В третьей главе** представлены экспериментальные данные, их анализ и основанные на полученных данных заключения. В ходе априорного анализа с помощью U-критерия Манна-Уитни доказано, что процессы окисления, протекающие в маслах, не зависят от конструктивных особенностей силовых трансформаторов. Соответственно, допустимо все силовые трансформаторы 35 и 110 кВ объединить в одну общую совокупность для дальнейшего моделирования зависимости откликов (противоокислительная стабильность масла: кислотное число окисленного масла (далее *КЧОМ*) и осадок образованный после окисления (далее *Осадок*)) от факторов (возраст трансформатор (далее *Возраст*), *КЧ*, *ВКЩ*, *Tgδ<sub>m</sub>*, *Присадки*). В ходе проведенных исследований доказано наличие взаимосвязи между факторами (*КЧ*, *ВКЩ*, *Tgδ<sub>m</sub>*, *Присадка*) и откликом (*КЧОМ* и *Осадок*). На основе корреляционно-регрессионного анализа определены направление и теснота взаимосвязи.

Представим результаты исследования взаимосвязи показателей качества масла (фактора) от степени старения масла (отклика *КЧОМ*) графически с расслоением по классу *Стабильность* (удовлетворительная и неудовлетворительная) (рисунок 2). На диаграммах

рассеяния (рисунок 2) ось абсцисс содержит преобразованные значения показателей качества эксплуатационных масел, ось ординат – преобразованные значения *КЧОМ*. При этом зададимся условием: в случае, если противокислительная стабильность не снижена (удовлетворительная), класс *Стабильности* будет равен 0, если противокислительная стабильность снижена (неудовлетворительная), класс *Стабильности* будет равен 1. На диаграммах рассеяния (рисунок 2) наблюдается расслоение результатов измерений на две группы (за исключением нескольких измерений): удовлетворительная и неудовлетворительная *Стабильность* масла.

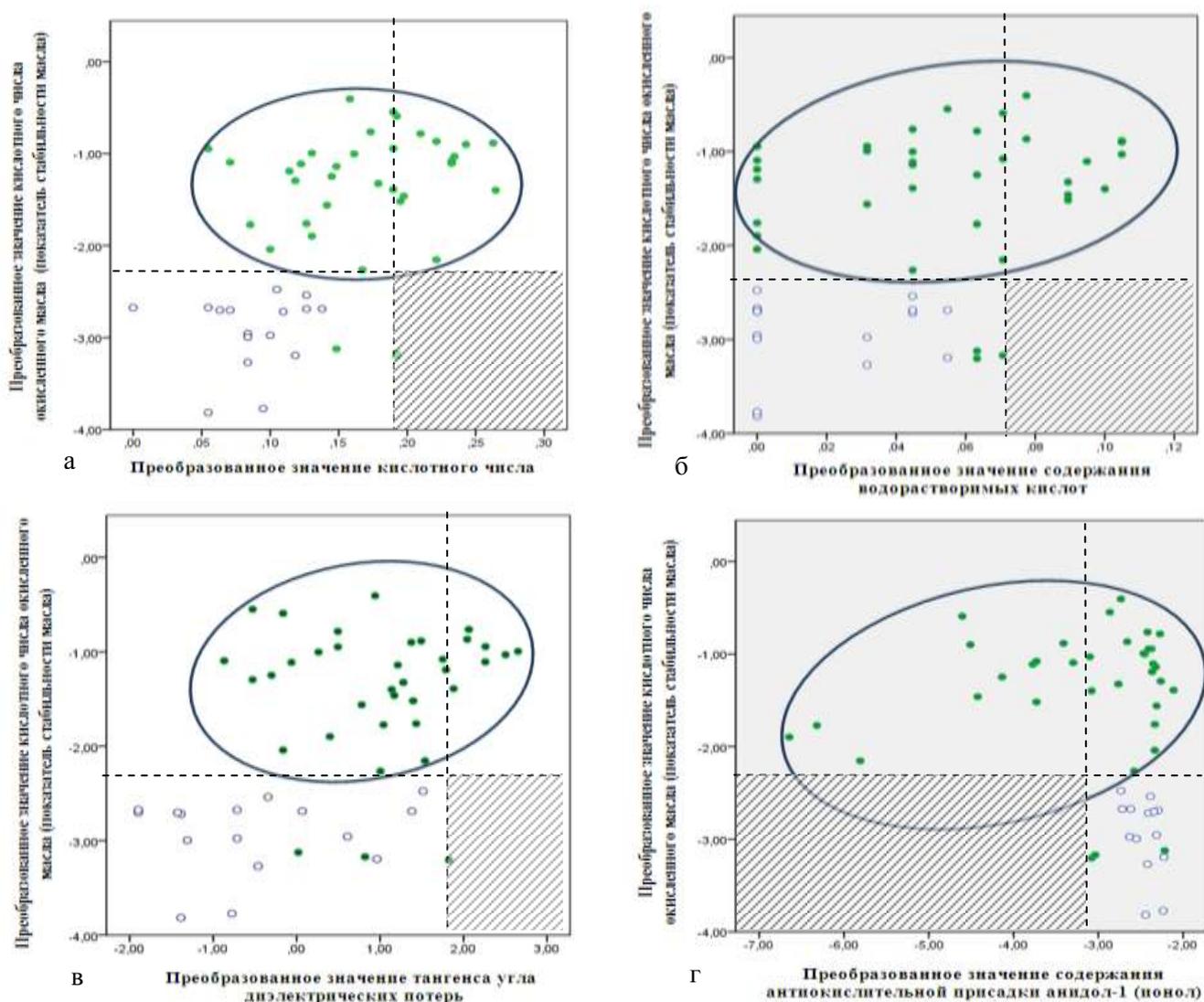


Рисунок 2 - Диаграмма рассеяния преобразованных переменных фактора и отклика с расслоением по фактору *Стабильность*: а) *КЧ* – *КЧОМ*; б) *ВКЩ* – *КЧОМ*; в) *Tgδ<sub>m</sub>* - *КЧОМ*; г) *Присадка* - *КЧОМ*:

- - интерпретированный результат измерения: стабильность масла удовлетворительная;
- - интерпретированный результат измерения: стабильность масла неудовлетворительная.

При оценке взаимосвязи факторов с откликом *Осадок* получены результаты аналогичные отклику *КЧОМ*. Наличие расслоения по классу *Стабильности*, а также невысокие парные коэффициенты корреляции каждого фактора с каждым откликом

позволяют предположить, что по объединенным данным (вся выборка трансформаторов) не удастся получить адекватные и пригодные для прогнозирования модели множественной регрессии, описывающие зависимости *КЧОМ* и *Осадки* от факторов. Однако наличие расслоения трансформаторов по классу стабильности указывает на возможность прогнозирования снижения ресурса масла (показателя *Стабильность*) в зависимости от значений показателей качества масел с помощью иных методов моделирования.

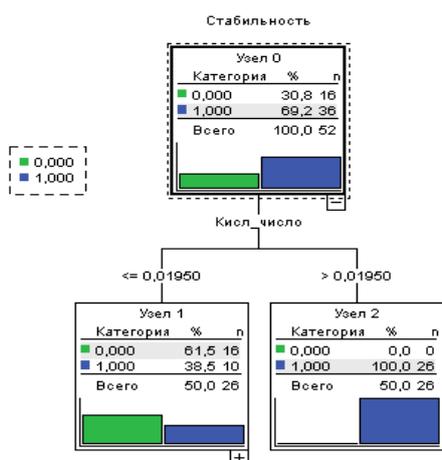
С целью экспертного определения предельных значений показателей качества масла, в интервале которых все результаты измерений (все трансформаторы) имели неудовлетворительную стабильность, на диаграммах рассеяния (рисунок 2) при заданных условиях построены области (заштрихованы), не содержащие внутри ни одного результата измерения. При сравнении полученных значений показателей качества масла, с установленными нормативными значениями, обнаружено, что действующие нормы не обеспечивают гарантированного обнаружения пониженного ресурса масла на ранних стадиях старения. Данные наблюдения были подтверждены диаграммами рассеяния, где откликом является *Осадок*.

С целью получения аналитического вида зависимости откликов (*КЧОМ* или *Осадка*) от факторов (*КЧ*, *ВКЩ*, *Tgδ<sub>м</sub>*, *Присадка*, *Возраст*) проведен подбор наиболее адекватной модели на основе перебора различных вариантов уравнений регрессии. Получены значимые и адекватные уравнения регрессии, но не имеющие прогностической ценности. Для выявления эффектов взаимодействия факторов на отклик применен дисперсионный анализ, по результатам которого построены значимые и адекватные уравнения регрессии, но также имеющие низкие прогностические свойства. Соответственно, для моделирования показателей стабильности масла следует использовать другие методы статистического анализа.

С целью выработки правил разделения трансформаторов на две группы *Стабильности* (удовлетворительная и неудовлетворительная) классификация трансформаторов проведена с помощью трех непараметрических методов: дерева классификации, дискриминантный анализ, логистическая регрессия. Первоначально проведена проверка значимости различий факторов (*Возраст*, *КЧ*, *ВКЩ*, *Tgδ<sub>м</sub>*, *Присадка*) в разных группах *Стабильности*. Проверка проведена графически с построением ящичных диаграмм. Установлено наличие квазивыбросов и выбросов (по показателям: *Tgδ<sub>м</sub>*, *Присадка*), обнаружена асимметричность распределения факторов, соответственно,

значимость различий показателей качества масла для разных классов *Стабильности* проверена на основе медианных значений с доверительными интервалами. Величины достигнутого уровня значимости показателей *КЧ*, *ВКЩ*,  $Tg\delta_m$  много меньше 0,05 и доверительные интервалы медиан для разных классов *Стабильности* не пересекаются. Для показателя *Присадка* достигнутый уровень значимости близок к значению 0,05. Т.о., результаты графического анализа и теста Манна-Уитни позволяют сделать вывод о значимости различий значений факторов *КЧ*,  $Tg\delta_m$ , *ВКЩ*, *Присадка* в разных группах *Стабильности*. Наличие вышеуказанных различий указывает на возможность качественной классификации трансформаторов по группам *Стабильности* на основе значений факторов с выработкой правил классификации.

а) Классификация трансформаторов на группы по классу *Стабильности* на основе деревьев классификаций. Классификация по одному фактору методом деревьев представлена на рисунок 3. Графически удельный вес трансформаторов каждого класса на рисунке показан столбчатой диаграммой. Классификация трансформаторов на группы по классам



**Рисунок 3 - Дерево классификации трансформаторов на группы по классам *Стабильности* на основе фактора *КЧ*:  
0,000 – Стабильность удовлетворительная;  
1,000 – Стабильность неудовлетворительная.**

которым определяется к какой группе по классу *Стабильности* следует отнести трансформатор.

*Стабильность* равна 0:

$$D\Phi_0 = -11,537 + 52,876 KЧ - 0,221 Tg\delta_m + 113,540 \text{Присадка} + 0,377 \text{Возраст}$$

*Стабильность* равна 1:

$$D\Phi_1 = -11,942 + 130,586 KЧ - 0,007 Tg\delta_m + 95,230 \text{Присадка} + 0,364 \text{Возраст}$$

*Стабильности* только на основании значения фактора *КЧ* дает 80,8% правильно классифицированных объектов.

б) Классификация трансформаторов на группы по классу *Стабильности* на основе дискриминантного анализа. Наилучший способ классификации на основе дискриминантного анализа определен методом перебора различных вариантов. Моделирование было проведено при исключении фактора *ВКЩ*, являющегося мультиколлинеарным *КЧ*. Получены две дискриминантные функции по

которым определяется к какой группе по классу *Стабильности* следует отнести трансформатор.

Дискриминантный анализ позволил безошибочно классифицировать 84,6% трансформаторов на классы по стабильности. Наиболее важным фактором для классификации на группы по классу *Стабильности* является *КЧ*, далее *Tgδ<sub>m</sub>* и *Присадка*. *Возраст* не является группирующей переменной, но позволяет повысить точность прогноза.

в) Классификация трансформаторов на группы по классу *Стабильности* на основе логистической регрессии. Наиболее адекватное уравнение логистической регрессии было получено методом перебора различных вариантов. Факторы *Возраст*, *Tgδ<sub>m</sub>*, *Присадка* являются незначимыми в уравнении (достигнутый уровень значимости критерия Вальда > 0,05). Фактор *ВКЩ* не включен в уравнение, т.к. является мультиколлинеарным *КЧ*. Вероятность отнесения трансформатора к классу *Стабильности* равной *I* определяется уравнением:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(-2,350 + 193,608 \text{ КЧ})}}$$

*P* - разделяющее значение (вероятность отнесения). Если разделяющее значение вероятности  $P \geq 0,3$ , то трансформатор будет отнесен к классу *Стабильности* равной *I*.

Таким образом, методом логистической регрессии верно классифицированы 78,8 % трансформаторов. Вероятность отнесения трансформатора к классу *Стабильности* равной *I* зависит только от значения *КЧ*.

При сравнении результатов классификации различными методами, установлено, что все три метода позволяют разработать модели, имеющие значительный процент верных прогнозов, в которых значимым группирующим фактором является *КЧ*, однако более понятное решающее правило классификации позволяет дать метод деревьев классификаций. *Возраст* трансформатора не является группирующей переменной ни в одной из вышеуказанных моделей.

На основе полученной модели впервые разработан «Алгоритм подбора системы мер, направленных на поддержание удовлетворительного качества эксплуатационных масел», позволяющий эффективно планировать проведение работ необходимых для поддержания качества жидкой изоляции. Решением проблемы выбора оптимального набора системы мер для восстановления ресурса масел является разработка нового метода, основанного на организации специального лабораторного эксперимента, моделирующего различные варианты проведения работ по восстановлению ресурса масла. Для реализации

экспериментальных исследований впервые разработаны лабораторные методики обработки трансформаторных масел и адсорбентов.

В ходе проведенных исследований доказана необходимость корректировки существующего подхода к организации контроля силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ по результатам физико-химического анализа масел. Установлен оптимальный объем плановых периодических измерений, новые требования к качеству эксплуатационных масел.

**В четвертой главе** представлены технико-экономические показатели применения разработанных методов и алгоритма оценки качества эксплуатационных трансформаторных масел. Проведенная апробация результатов научных исследований на реальных объектах показала совпадение полученных и ожидаемых улучшений качества изоляционных масел установленных в ходе экспериментальных исследований.

Внедрение новых методов и алгоритма оценки качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ дает экономический эффект заключающийся в сокращении затрат на техническую эксплуатацию и ремонты силовых трансформаторов (для филиала ОАО «МРСК Северо-Запада» «Комиэнерго» в отношении 19 трансформаторов составил 13 105 680 рублей), и технический эффект, заключающийся в увеличении межремонтного периода работы силовых трансформаторов, а также повышения их ресурса (долговечности).

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

В представленной диссертационной работе поставлена и решена важная научно-техническая задача современной электроэнергетики, связанная с повышением надежности и долговечности силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ без специальных защит масла в условиях оптимизации затрат на их эксплуатацию и ремонты.

На основе проведенного анализа научно-исследовательских работ установлено, что принятая на сегодняшний день система контроля качества эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ не позволяет производить их оценку на перспективу. Впервые в качестве способа тестовой оценки ресурса эксплуатационного масла предложена методика измерения стабильности против окисления, стандартизированная ГОСТ 981-75.

Для исследования возможности с помощью измеренных значений показателей качества масел прогнозировать снижение ресурса масел разработана концептуальная математическая модель зависимости параметров масла от степени его старения, положенная в основу проведенного научного эксперимента. В ходе реализации научного эксперимента впервые разработаны лабораторные методики обработки трансформаторных масел и адсорбентов:

- «Методика введения антиокислительной присадки агидол-1 (ионол) в трансформаторное масло при организации экспериментальных работ в лабораторных условиях».
- «Методика обработки трансформаторного масла силикагелем при организации экспериментальных работ в лабораторных условиях».
- «Методика подготовки в лабораторных условиях силикагеля для организации экспериментальных работ».

На основе результатов проведенных исследований доказано наличие взаимосвязи между показателями качества масла, обладающих индикативностью к продуктам старения масла (*КЧ*, *ВКЩ*, *Tg<sub>д.м.</sub>*, *Присадка*) и показателями характеризующими остаточный ресурс масла (противоокислительная стабильность: *КЧОМ* и *Осадок*). Определены направление и теснота взаимосвязи.

По результатам проведенных работ впервые установлены оптимальные правила классификации трансформаторов на группы, позволяющие прогнозировать снижение ресурса масел на основе измеренных показателей качества. В основу правил заложена разработанная математическая модель, представленная одноуровневым бинарным деревом. На основе созданной модели впервые разработан «Алгоритм подбора системы мер, направленных на поддержание удовлетворительного качества эксплуатационных масел».

Впервые разработан «Метод определения объема материалов, номенклатуры и порядка проведения работ по восстановлению ресурса эксплуатационных трансформаторных масел».

Установлен оптимальный объем плановых периодических измерений, новые требования к качеству эксплуатационных масел силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в изданиях рекомендованных ВАК РФ:**

1.Высогорец С.П. Метод оценки эффективности восстановления ресурса трансформаторных масел, в процессе работы силовых трансформаторов. / С.П. Высогорец, А.П.Васильев. // Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления» №2, 2011. С.59 – 65.

**Публикации в сборниках научных трудов и докладов:**

2.Высогорец С.П. Оценка состояния силовых трансформаторов напряжением 35 – 220 кВ по результатам обязательных периодических испытаний и измерений (физико-химического анализа трансформаторного масла). / С.П. Высогорец, А.П. Васильев. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / Отв.ред. Н.И.Воропай, А.И.Таджибаев (ПЭИПК) 2010: изд.Учебного совета ПЭИПК. – СПб.: «Северная звезда», 2010. С.502 – 511.

3.Высогорец С.П. Оценка состояния силовых трансформаторов напряжением 35 – 220 кВ по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. / С.П. Высогорец, А.П. Васильев. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджибаев (ПЭИПК) 2010: изд. Учебного совета ПЭИПК. – СПб.: «Северная звезда», 2010. С.511 – 519.

4.Высогорец С.П. Обеспечение работоспособности оборудования электрических сетей в условиях истощения ресурса. / С.П. Высогорец, А.П. Васильев. //Сборник докладов 34 заседания международного научно-технического семинара «Методы и средства оценки состояния электроэнергетического оборудования» / Под ред. А.И.Таджибаева. – СПб.: ПЭИПК, 2010. С.200.

5.Высогорец С.П. Новые методы и методики оценки качества эксплуатационных трансформаторных масел как диэлектрика, обеспечивающего надежность силовых трансформаторов напряжением 35 – 110 кВ / С.П. Высогорец, А.П. Васильев. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.62. Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения / Отв. ред. Н.И.Воропай, В.А.Савельев. - Иваново: ПресСто, 2011. С.522-531.