

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора  
Худоногова Анатолия Михайловича на диссертационную работу

**Креховой Анастасии Владимировны** на тему:

«Метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел» по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

**1. Актуальность темы диссертационной работы** заключается в повышении надежности работы и безопасности эксплуатации силовых трансформаторов. Интерес к данной тематике проявляют научные сотрудники и производственники, поскольку силовые трансформаторы являются одними из самых ответственных и дорогих элементов энергосистемы.

Влиянию факторов эксплуатации силовых трансформаторов на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла до недавнего времени уделялось не достаточно внимания. В основе диссертационной работы лежит метод акустического контроля эксплуатационных показателей всего трансформатора по качеству трансформаторного масла как диагностической среды.

Важными факторами, изменяющими свойства масла в работающем трансформаторе, являются влага и содержание целлюлозы. Следовательно, разработка новых методов, позволяющих определить качество трансформаторного масла по этим параметрам для установления технического состояния всего силового трансформатора, является актуальным вопросом.

Диссертантом на основе литературного анализа показано, что исследование увлажнённости и наличия целлюлозы в масле акустическим методом перспективно и позволит значительно улучшить качество контроля трансформаторного масла.

Целью диссертационной работы является повышение надежности работы и безопасности эксплуатации силовых трансформаторов на основе контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел, что, в свою очередь, соответствует актуальности темы исследования.

Для достижения поставленной цели автором сформулированы задачи исследования акустических свойств трансформаторного масла:

1. разработка метода акустического контроля эксплуатационных показателей качества;
2. определение влияния увлажненности и содержания целлюлозы на акустический спектр;
3. установление зависимости между концентрацией влаги, целлюлозы и спектральной полосой звуковой мощности.
4. обоснование использования коэффициента демпфирования средой в качестве критерия работоспособности трансформаторного масла, и разработка практических рекомендаций по применению метода для повышения надежности работы и безопасности эксплуатации силовых трансформаторов.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснование полученных выводов и рекомендаций по каждой из глав и заключения подтверждается общим содержанием диссертационной работы и методами, использованными автором.

При исследовании возможности применения нового метода акустического контроля автор опирается на широкий анализ уже существующих решений, положения теории и планирования экспериментов, методы математической статистики и регрессионного анализа при обработке экспериментальных данных. Результаты исследований находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, что также подтверждает достоверность результатов.

### **3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

К научной новизне можно отнести следующие положения, представленные автором диссертационной работы:

1. метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторного масла по факторам увлажненности и содержанию целлюлозы;

2. результаты экспериментальных исследований влияния примесей, а именно увлажненности и содержания целлюлозы, на акустический спектр трансформаторного масла: определена значимость факторов и несущие частоты, ответственные за содержание примесей в масле;

3. данные, демонстрирующие значимые аппроксимирующие зависимости уровня звуковой мощности от содержания примесей для несущих частот 2 и 4 кГц соответственно;

4. коэффициент демпфирования средой звуковой волны как критерий работоспособности трансформаторного масла, по величине которого и с помощью разработанной методики возможно определить массовую долю влаги и целлюлозы, содержащихся в образце трансформаторного масла.

**4. Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что внесен определенный вклад в разработку методов контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов, позволяющий сделать вывод о качестве трансформаторного масла с учетом эксплуатационных факторов износа. Немаловажно отметить, что у работы имеются дальнейшие пути развития, начиная с применения метода для оценки других эксплуатационных факторов и заканчивая применением к исследованию других рабочих жидкостей.

### **5. Апробация работы и публикации**

Основные положения, результаты, выводы диссертационной работы доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на всероссийских и международных научно-технических конференциях: XIII Международная молодежная научная конференция «Интеллект и наука» (г. Железногорск, 2013 г.); XIV Всероссийская научная конференция с

международным участием «Интеллект и наука» (г. Железногорск, 2014 г.), V Международная молодежная научная конференция «Молодежь и XXI век» (г. Курск, 2015 г.); Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2016», посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств (г. Красноярск, 2016 г.); XVIII Всероссийский симпозиум с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях» (г. Красноярск, 2016 г.); XII Международная научно-техническая конференция «Завалишинские чтения – 2017» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), а также на научно-технических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы» Института нефти и газа ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет» (г. Красноярск, 2019 г.).

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, включая 3 статьи в периодических журналах, рекомендованных ВАК.

#### **6. Оценка содержания диссертации**

Диссертация А.В. Креховой состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений и изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 44 таблицы. Список использованных источников из 111 наименований.

**Во введении** освещена общая проблематика трансформаторного хозяйства РФ. Изложены цель, задачи, методы исследования, научная новизна, практическая значимость, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**В первой главе** на основе анализа литературных источников и исследований, выполненных соискателем, установлена экономическая целесообразность контроля в режиме реального времени по сравнению с планово-предупредительным ремонтом. Аргументировано использование трансформаторного масла в качестве диагностической среды. Определены основные факторы, характеризующие эксплуатационный износ трансформаторного масла по причине старения. Выявлены качественные

характеристики влияния изменения трансформаторного масла от увлажненности и наличия целлюлозы и указаны способы их контроля, определены достоинства и недостатки перечисленных методов контроля. Изложены основы теории акустических свойств жидких сред, которые объясняют закономерности распространения звука в жидкости. Обоснованная автором идея автоматизации процесса контроля по состоянию измерительной среды является актуальной.

**Во второй главе**, посвященной разработке методики контроля, объектом исследования назначено трансформаторное масло марки Т1500 (среда), оценка влияния изменяемых и контролируемых факторов (влаги и целлюлозы) определена как предмет исследования. Произведен выбор марки трансформаторного масла по степени его использования. Представлена конструкция испытательной установки, состоящей из образца трансформаторного масла, помещенного в резервуар, двух пьезокерамических преобразователей, генератора сигналов, усилителей, микроконтроллера, программного обеспечения и характеристики интерфейса программы обработки сигнала. Приведены методики оценки погрешности измерения, где с помощью критериев значимости проверяются гипотезы об абсолютных значениях параметров или о соотношениях между ними для генеральных совокупностей с известной функцией распределения вероятностей.

Для проверки независимых выборок значимость определялась по  $t$ -критерию Стьюдента. В качестве независимых выборок использовалось новое (0% примесей) и отработанное (с различными примесями) трансформаторное масло. Методики и гипотезы не вызывают сомнений.

**В третьей главе** приведены сводные результаты экспериментальных исследований.

В первом подразделе главы представлены таблицы и графики изменения акустического спектра эталонного и отработанного трансформаторных масел по октавам в зависимости от повторяемости опыта. Приведён статистический расчёт значимости влияния примесей трансформаторного масла на акустический спектр в зависимости от объема выборки. Отмечено, что примеси, находящиеся

в трансформаторном масле, влияют с достоверной вероятностью 95% на его акустический спектр.

Во втором подразделе по аналогичной методике установлена зависимость влияния влаги в точках интервала (0; 0,0994; 0,224; 0,355) процентной шкалы на акустический спектр эталонного трансформаторного масла. Установлено, что значимость влияния данного фактора также 95%. Проведён корреляционный анализ, который установил, что наибольшее значение коэффициента корреляции (-0,96) наблюдается на частоте 2 кГц.

В третьем подразделе статистически исследовано влияние целлюлозы на акустический спектр чистого трансформаторного масла в точках интервала (0; 0,06; 0,18; 0,31) процентной шкалы, в результате которого установлена его значимость, превышающая 95%. Корреляционный анализ показал, что несущей частотой, отвечающей за наличие целлюлозы в образце масла, является частота 4 кГц.

По перечисленным факторам автором для частот 2 и 4 кГц проведён регрессионный анализ с целью получения эмпирических зависимостей, отвечающих за наличие влаги и целлюлозы в трансформаторном масле. Автором оценена адекватность полученных регрессионных моделей, сходимость которых с экспериментальными данными достигает 88-92 %.

**Четвёртая глава** посвящена разработке практических рекомендаций применения метода, где приводятся значения коэффициента демпфирования средой звуковой волны. Автор в первом подразделе обосновывает переход к безразмерным коэффициентам демпфирования для удобства оценки работоспособности трансформаторного масла по наличию влаги и целлюлозы, которые могут быть использованы в качестве диагностических величин. Следующий подраздел касается практического применения метода диагностики. Предположение автора о возможности применения метода для определения других факторов является обоснованным.

**В заключении** работы изложены основные научные и практические результаты работы.

## **7. Замечания по диссертационной работе**

1 В предложенной методике обработки результатов экспериментов не учитывается погрешность, связанная с возможными резонансными явлениями в измерительной емкости.

2 В работе не указано, на основании чего в качестве критерия оценки был выбран именно критерий Стьюдента.

3 Расчет коэффициента демпфирования средой звуковой волны (п. 4.1 диссертации) приведен описательно в текстовом формате, а не формулой.

4 В тексте работы имеют место стилистические погрешности и опечатки (например, на стр. 61 приведен общий принцип работы экспериментальной установки и первым этапом отражено «формирование усилителем требуемой мощности сигнала». Совершенно понятно, что первым этапом должно быть «задание начальных условий облучающего поля», что подтверждается структурной схемой экспериментальной установки, приведенной на стр. 56). Они не снижают общего положительного впечатления о работе, но их присутствие позволяет сделать такое замечание.

5. Первая глава диссертации перегружена материалами из ГОСТов.

6. Большинство выводов не содержат количественных показателей.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают научную новизну, теоретическую и практическую ценность результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы.

## **8. Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы соответствуют представленным в диссертации, а также результатам исследований и основным положениям.

## **9. Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.011-2011**

Структура и оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.011-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

**10. Соответствие диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842**

**Соответствие п. 9:** в диссертационной работе содержится решение научной задачи, которая имеет важное значение для развития знаний в области исследований технического состояния силовых трансформаторов и совершенствования методов и средств их контроля и диагностики.

**Соответствие п. 10:** работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертационная работа А.В. Креховой имеет прикладной характер, акт о внедрении подтверждает практическое использование полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором технические и организационные решения достаточно аргументированы и имеют отличия от аналогичных решений, представленными другими авторами.

**Соответствие п. 11, 12 и 13:** основные научные результаты диссертации достаточно полно изложены, при этом количество публикаций соответствует установленным требованиям. Соискатель имеет 14 опубликованных работ, в том числе 3 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Основные результаты работы были многократно представлены и обсуждены на международных научно-практических конференциях.

**Соответствие п. 14:** в диссертации соискатель надлежащим образом ссылается на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов. В диссертации соискатель использует результаты научных работ, выполненных лично и в соавторстве, и отмечает это обстоятельство.



## 11. Общее заключение по диссертационной работе

Диссертация Креховой Анастасии Владимировны на тему «Метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел» соответствует специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся разработки, направленные на совершенствование методов контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов, что имеет существенное значение для развития энергетического комплекса страны.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Анастасия Владимировна Крехова, достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Профессор кафедры «Электроподвижной состав»

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,

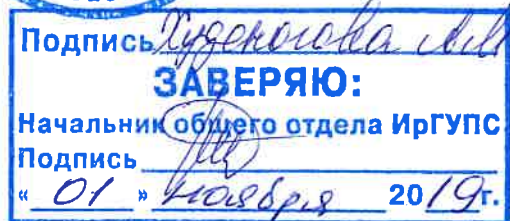
д-р техн. наук, профессор



А.М. Худоногов

«01» ноября 2019 г.

М.П.



Почтовый адрес: 6640744, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15

Тел. 8 (964) 273-47-79

E-mail: a.hudonogov@yandex.ru