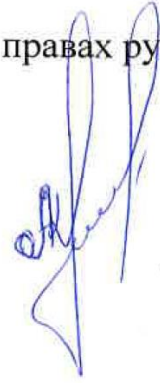


На правах рукописи



Крехова Анастасия Владимировна

**МЕТОД АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Батрак Андрей Петрович

Официальные оппоненты: **Власов Юрий Алексеевич**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный архитектурно-
строительный университет», кафедра
«Автомобильный транспорт и электротехника»,
профессор

Худоногов Анатолий Михайлович
доктор технических наук, профессор;
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей
сообщения», кафедра «Электроподвижной
состав», профессор

Ведущая организация Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Защита состоится 5 декабря 2019 г. в 14.00 на заседании
диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет», по адресу: 660074, г. Красноярск, ул.
Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на
сайте Сибирского федерального университета . www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

Актуальность работы.

Силовые трансформаторы являются наиболее дорогими и важными составляющими любой энергетической системы. Однако на сегодняшний день в России, по разным статическим данным, около 70% силовых трансформаторов выработали свой ресурс. При этом опыт эксплуатации показывает, что примерно 70–80 % всех отказов связано не с выработкой ресурса, а с образованием и развитием различных дефектов внутри трансформатора, поэтому остро стоит вопрос диагностики состояния силового трансформатора энергетического оборудования и его своевременного ремонта.

Современная система сосредоточена в основном на проведении и контроля при вводе в эксплуатацию и капитальном ремонте, что не может в полной мере обеспечивать надежность и безопасность работы трансформаторов.

Трансформаторное масло отвечает за работоспособность всей системы. Как диагностическая среда трансформаторное масло позволяет выявить до 70% возможных дефектов трансформатора, связанных со старением изоляции. Поэтому актуальными являются вопросы его качества, контроля технического состояния и диагностики в качестве показателя технического состояния трансформатора.

Научная идея заключается в разработке нового метода акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел по параметрам увлажненности и содержанию целлюлозы.

Степень научной проработанности темы. Способы контроля трансформаторного масла изложены в работах В.В. Бузаева, И.В. Давиденко, Т.М. Чупак и др. Однако описанные методы требуют высокой трудозатратности, специального оборудования, реагентов и помещений, а также высокой квалификации персонала, что делает актуальным разработку и применение новых методов контроля и диагностики трансформаторного масла.

Цель диссертационной работы – повысить надежность работы и безопасность эксплуатации силовых трансформаторов на основе контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел.

Задачи исследования:

1. Разработать метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторного масла;
2. Исследовать влияние примесей (увлажненности и содержания целлюлозы) на акустический спектр трансформаторного масла;
3. Установить зависимости между концентрацией примесей (увлажненностью и содержанием целлюлозы) и спектральной полосой звуковой мощности;

4. Обосновать критерий работоспособности трансформаторного масла и разработать практические рекомендации по применению предложенного метода для повышения надежности работы и безопасности эксплуатации силовых трансформаторов.

Объект исследования – трансформаторное масло как эксплуатационный показатель качества силового трансформатора.

Предмет исследования – оценка влияния примесей (увлажненности и содержания целлюлозы) на акустический спектр трансформаторного масла.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы непосредственного наблюдения звуковой мощности акустического спектра при изменении массовой доли примесей, методы теории и планирования экспериментов по выявлению влияния примесей на качество масел.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций доказана теоретически и экспериментально, аргументированы научные положения. Результаты работы и выводы подтверждены статистическими методами обработки результатов наблюдений. Для исследования разработана экспериментальная установка, позволяющая измерять величины акустического спектра масла.

На защиту выносятся:

1. Метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторного масла;

2. Результаты исследования влияния примесей (увлажненности и содержания целлюлозы) на акустический спектр трансформаторного масла.

3. Значимые зависимости между концентрацией примесей (увлажненностью и содержанием целлюлозы) и спектральной полосой звуковой мощности;

4. Критерий работоспособности трансформаторного масла.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторного масла;

2. Получены результаты исследования влияния примесей (увлажненности и содержания целлюлозы) на акустический спектр трансформаторного масла;

3. Установлены значимые зависимости между концентрацией примесей (увлажненностью и содержанием целлюлозы) и спектральной полосой звуковой мощности;

4. Обоснован критерий работоспособности трансформаторного масла.

Практическая значимость работы. Предложенный акустический метод может быть использован для контроля эксплуатационных показателей трансформаторного масла, для классификации масел по показателю гигроскопичности, для нефтеподготовки по степени увлажненности.

Реализация результатов работы. Результаты исследования использованы в учебном процессе кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством» Политехнического института ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», внедрены в деятельность АО «КрасЭКо», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались:

1. на XIII Международной молодежной научной конференции «Интеллект и наука», 16–18 апреля 2013 г.;
2. на XIV Всероссийской научной конференции с международным участием «Интеллект и наука», 16–18 апреля 2014 г.;
3. на V Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век», 26–27 февраля 2015 г.;
4. на Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны – 2016», 15–25 апреля 2016 г.;
5. на XVIII Всероссийском симпозиуме с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях», 8–14 августа 2016 г.;
6. на Международной научно-технической конференции «Завалишинские чтения – 2017», 10–14 апреля 2017 г.;
7. на научно-технических семинарах кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы» Института нефти и газа, Сибирский федеральный университет, 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе три работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, одна – в базе SCOPUS.

Личный вклад автора заключается в постановке, планировании и непосредственном проведении экспериментов, обобщении полученных результатов, подготовке научных статей.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 145 страниц машинописного текста, 37 рисунков, 44 таблицы. Состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цель и задачи исследований, сформулированы основные тезисы, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведен обзор существующих систем контроля и диагностики силовых трансформаторов, которые не в полной мере отвечают современным требованиям к скорости, надёжности и безопасности контроля эксплуатационных показателей силовых трансформаторов.

С целью устранения выявленных недостатков контроля в качестве диагностической среды предлагается использовать трансформаторное масло, а его эксплуатационные и износные показатели использовать в качестве контрольных значений разрабатываемой методики диагностики.

Основными выявленными эксплуатационными и износными показателями качества трансформаторного масла является увлажненность и содержание целлюлозы. Изучены методы их контроля, имеющие существенные недостатки: трудоемкость, необходимость в специализированном оборудовании, реагентах, помещениях и высокой квалификации персонала. Следовательно, необходим поиск новых методов контроля этих характеристик.

В качестве одного из таких методов предложен метод акустического контроля по параметрам увлажненности и содержания целлюлозы.

Вторая глава посвящена разработке метода акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел по параметрам увлажненности и содержания целлюлозы. Блок-схема метода представлена на рис. 1. Приведены технические характеристики средств испытания и измерения. Предложена методика обработки экспериментальных данных.

В качестве объекта исследования выбрано трансформаторное масло марки Т-1500 ввиду его распространенности в наиболее массовых старых трансформаторах мощностью до 500 кВ, небольшого процентного содержания сернистых соединений, повышенной стабильности к окислению, невысокой стоимости.

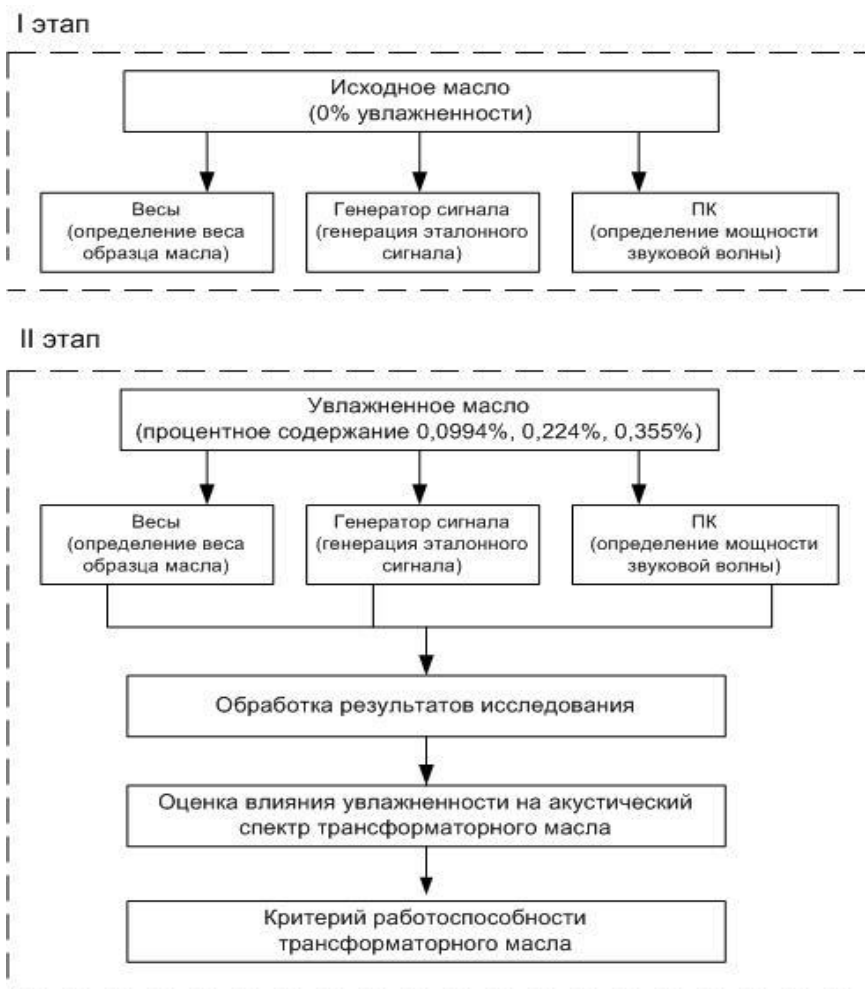
Метод контроля предусматривает два основных этапа исследования.

На первом этапе проводится изучение влияния увлажнённости на акустический спектр трансформаторного масла, где определялась мощность звуковой волны, прошедшей через образец эталонного трансформаторного масла, в котором содержание примесей 0 %, по 13 частотам в диапазоне от 1 до 10 кГц.

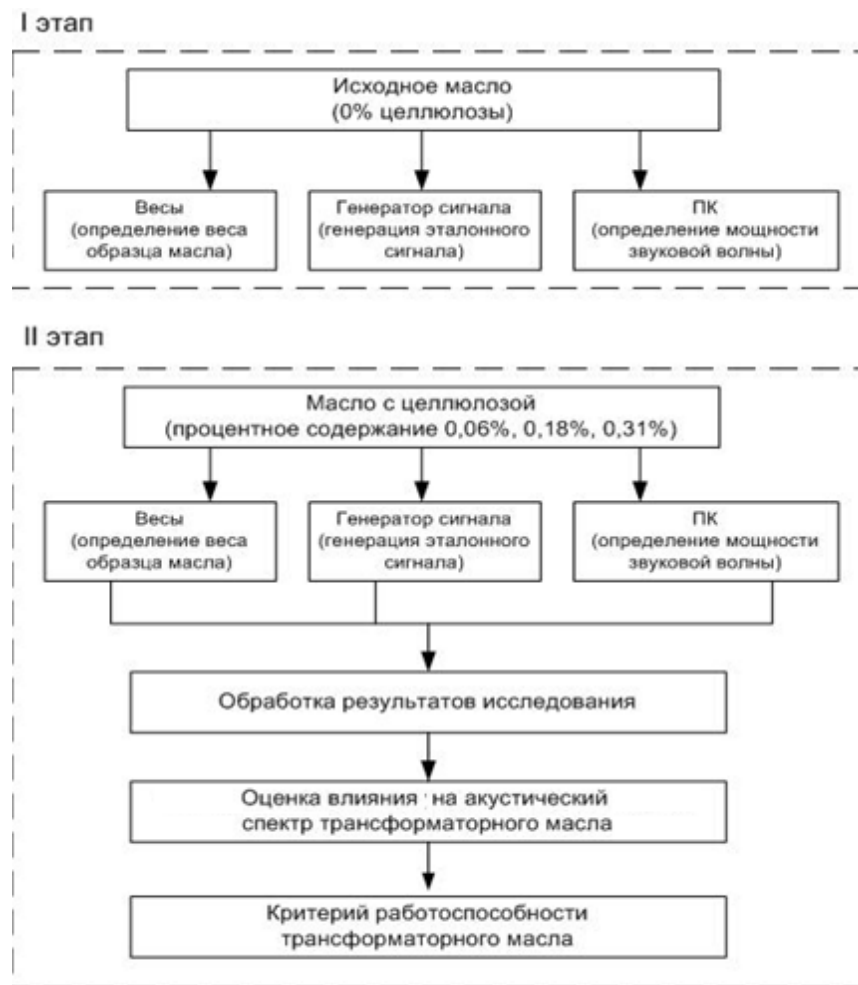
Далее в образец масла добавлялась влага, полученная смесь взвешивалась, определялась массовая доля влаги и мощность звуковой волны, прошедшей через образец. Измерения проводились в трех точках процентной шкалы: 0,0994 %; 0,224 %; 0,355 %.

Аналогичным методом в другой образец масла добавлялась целлюлоза. Измерения проводились также в трех точках процентной шкалы: 0,06 %; 0,18 %; 0,31 %. Погрешность измерения составила 0,005 г.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами математической статистики, теории и планирования эксперимента. Методика обработки приведена на рисунке 2.



a



б

Рис. 1 – Блок-схема метода:

a – для исследования влияния увлажненности; *б* – для исследования влияния содержания целлюлозы



Рис. 2 – Методика обработки экспериментальных данных

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований влияния примесей (увлажненности и содержания целлюлозы) на акустический спектр трансформаторного масла.

На первом этапе обработки определялась значимость влияния примесей, находящихся в трансформаторном масле, на его акустический спектр. Исследовались образцы эталонного (товарного с 0 % примесей) и отработанного трансформаторного масла (срок эксплуатации 10 лет). Сравнительная визуализация приведена на рис. 3.

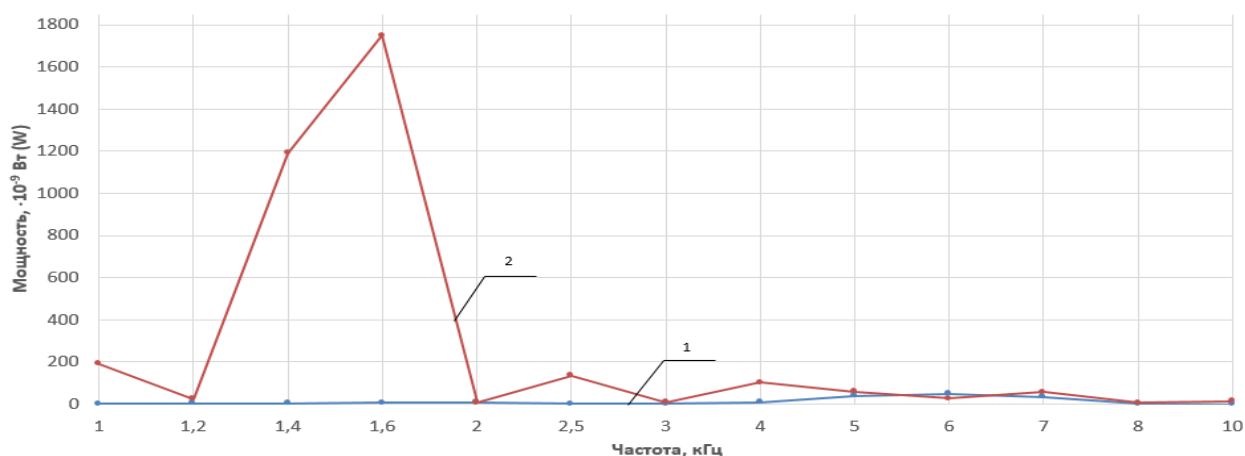


Рис. 3 – Акустические спектры эталонного и отработанного трансформаторных масел, полученные в опыте № 1: 1 – эталонное масло; 2 – отработанное масло

Из рис. 3 следует, что спектры значительно различаются. На основании этого была выдвинута гипотеза о том, что примеси, находящиеся в трансформаторном масле, влияют на изменение его акустического спектра. Проверка гипотезы осуществлялась согласно критерию Стьюдента. Полученные эмпирические значения критерия t_e больше критического $t_{кр}$, следовательно, с вероятностью 95 % примеси, находящиеся в трансформаторном масле, влияют на его акустический спектр.

На втором этапе обработки устанавливалась значимость влияния увлажнения и содержания целлюлозы на акустический спектр трансформаторного масла. Полученные эмпирические и критические значения критерия Стьюдента приведены рис. 4 и 5.

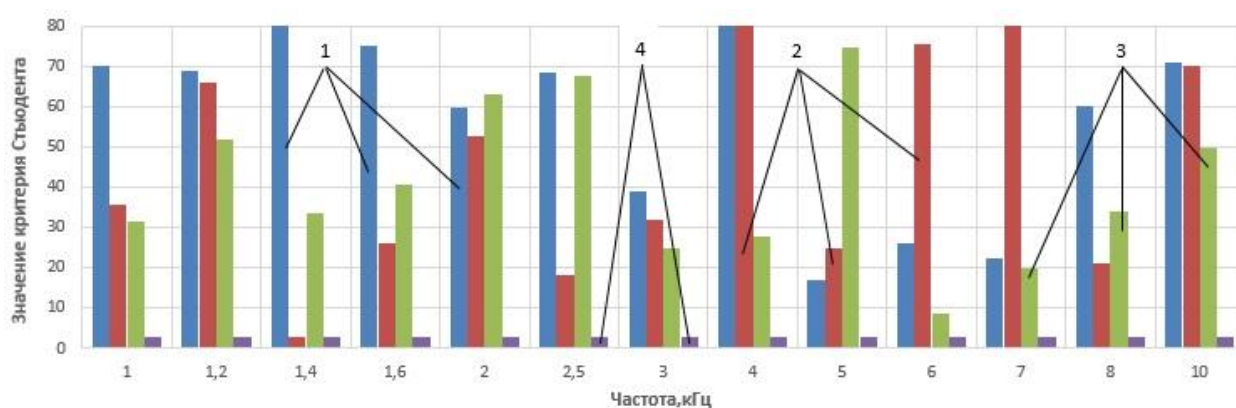


Рис. 4 – Значения критерия Стьюдента для исследования значимости влияния влаги на акустический спектр трансформаторного масла:
 1 – t_e при 0 и 0,0994 % влаги; 2 – t_e при 0 и 0,224 % влаги; 3 – t_e при 0 и 0,355 % влаги; 4 – $t_{кр}$

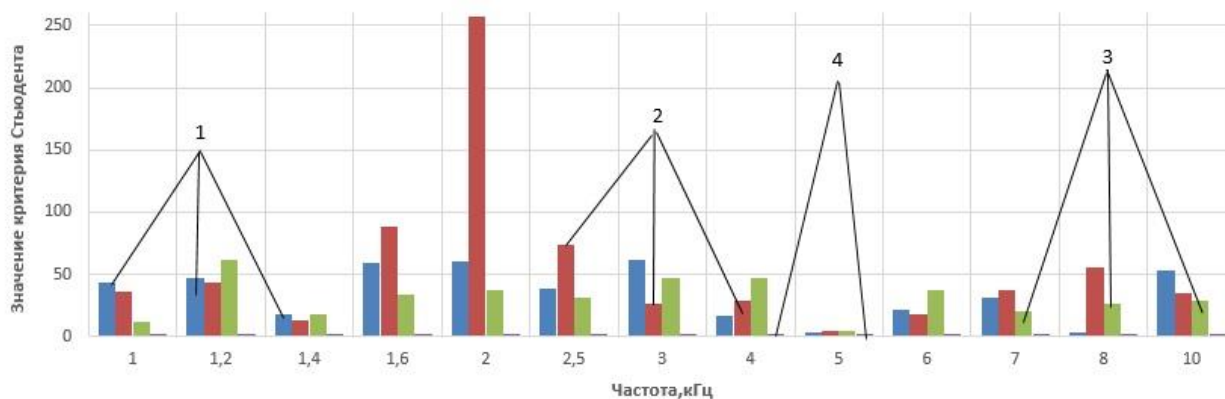


Рис. 5 – Значения критерия Стьюдента для исследования значимости влияния содержания целлюлозы на акустический спектр трансформаторного масла:
 1 – t_e при 0 и 0,06 % целлюлозы; 2 – t_e при 0 и 0,18 % целлюлозы;
 3 – t_e при 0 и 0,31 % целлюлозы; 4 – $t_{кр}$

Из рис. 4, 5 следует, что эмпирические значения t_e значительно превышают критическое значение $t_{кр}$, следовательно, и влага, и целлюлоза являются значимыми факторами и влияют на акустический спектр трансформаторного масла.

На третьем этапе обработки для выявления несущих частот, ответственных за содержание примесей, и вида зависимости между содержанием примесей и мощностью звуковой волны определялись коэффициенты корреляции. Полученные значения коэффициентов корреляции для исследования влияния влаги представлены на рис. 6.

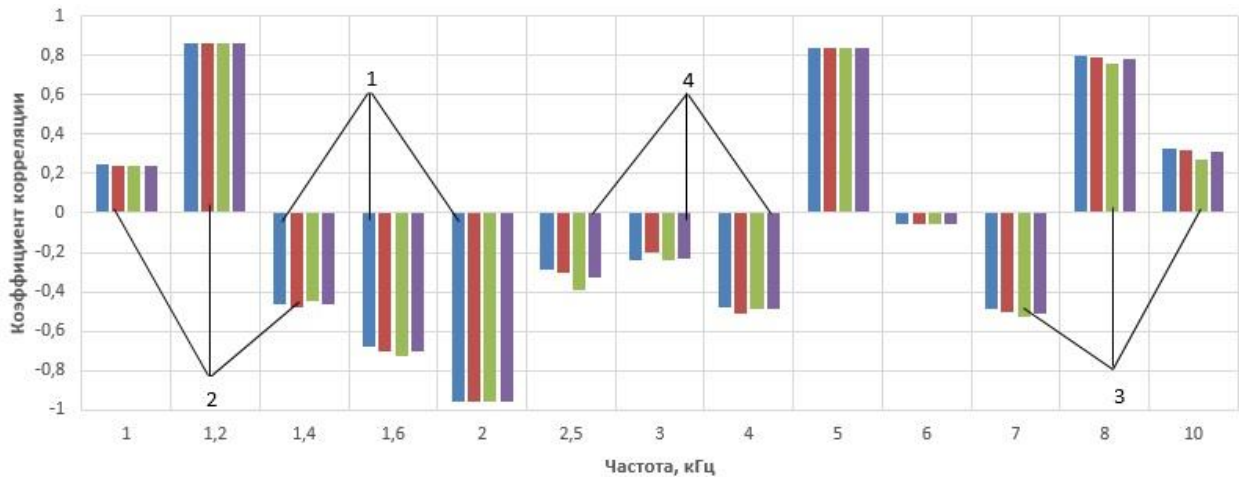


Рис. 6 – Коэффициенты корреляции экспериментов при отсутствии и в присутствии влаги: 1 – опыт 1; 2 – опыт 2; 3 – опыт 3; 4 – средний

На рис. 6 видно, что наиболее высокое значение коэффициента корреляции ($-0,96$) на частоте 2 кГц. Так как значение коэффициента корреляции стремится к единице, значит, зависимость мощности звуковой волны от концентрации влаги в трансформаторном масле является линейной, а саму частоту 2 кГц можно считать несущей. На частотах 1,2 и 5 кГц коэффициенты корреляции 0,86 и 0,84 соответственно, что означает стремление зависимости к линейному виду.

Полученные значения коэффициентов корреляции для исследования влияния содержания целлюлозы представлены на рис. 7.

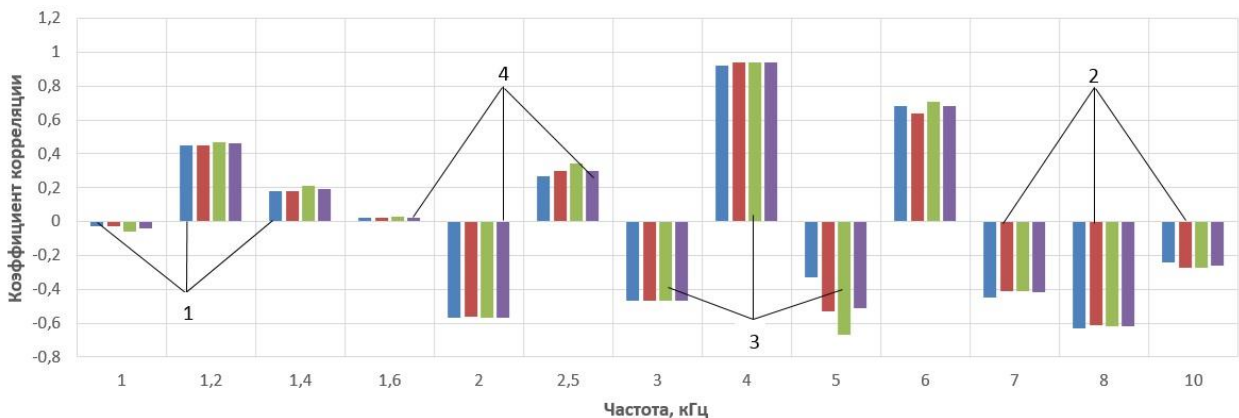


Рис. 7 – Коэффициенты корреляции экспериментов пр отсутствии и в присутствии целлюлозы: 1 – опыт 1; 2 – опыт 2; 3 – опыт 3; 4 – средний

На рис. 7 видно, что наиболее высокое значение коэффициента корреляции (0,94) на частоте 4 кГц, которую можно считать несущей для

характеристики влияния целлюлозы на акустический спектр трансформаторного масла. В качестве вспомогательных частот были выбраны 1,6 и 2,5 кГц.

Для несущих и вспомогательных частот был проведен регрессионный анализ и составлены соответствующие уравнения регрессии (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты регрессионного анализа

Влага		Целлюлоза	
Частота, кГц	Уравнения линейной регрессии	Частота, кГц	Уравнения линейной регрессии
1,2	$Y_{1,2} = 2,49 \cdot 10^{-9} + 5,66 \cdot 10^{-8} \cdot X$	4	$Y_4 = 5,99 \cdot 10^{-9} + 3,22 \cdot 10^{-8} \cdot X$
2	$Y_2 = 10,1 \cdot 10^{-9} - 2,83 \cdot 10^{-8} \cdot X$	1,6	$Y_{1,6} = 8,93 \cdot 10^{-9} + 8,12 \cdot 10^{-7} \cdot X - 2,58 \cdot 10^{-6} \cdot X^2$
5	$Y_5 = -4,07 \cdot 10^{-8} + 1,23 \cdot 10^{-6} \cdot X$	2,5	$Y_{2,5} = 1,15 \cdot 10^{-9} + 5,91 \cdot 10^{-8} \cdot X - 1,74 \cdot 10^{-7} \cdot X^2$

На рис. 8 и 9 приведены полученные эмпирические и теоретические регрессионные зависимости мощности звуковой волны от влаги и содержания целлюлозы на несущих и вспомогательных частотах.

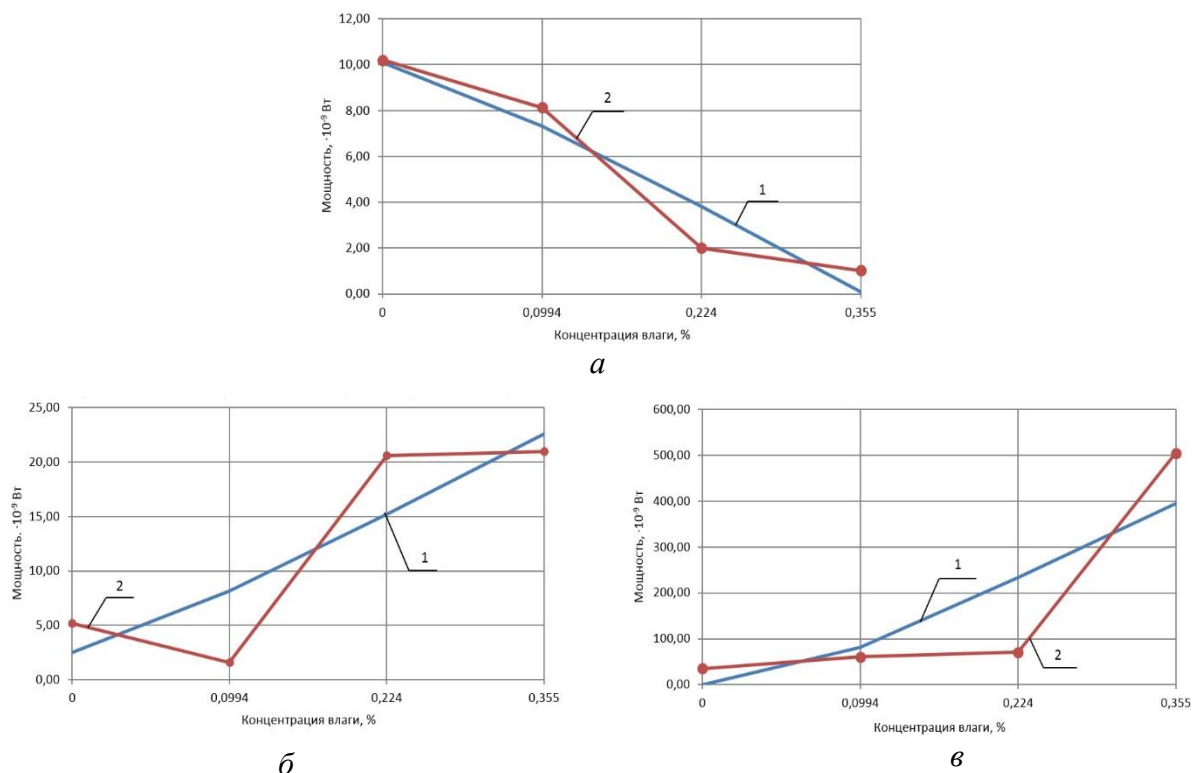


Рис. 8 – Теоретические и расчетные зависимости мощности звуковой волны от содержания влаги на частотах, кГц: *a* – 2; *б* – 1,2; *в* – 5, где *1* – теоретическая зависимость; *2* – экспериментальная зависимость

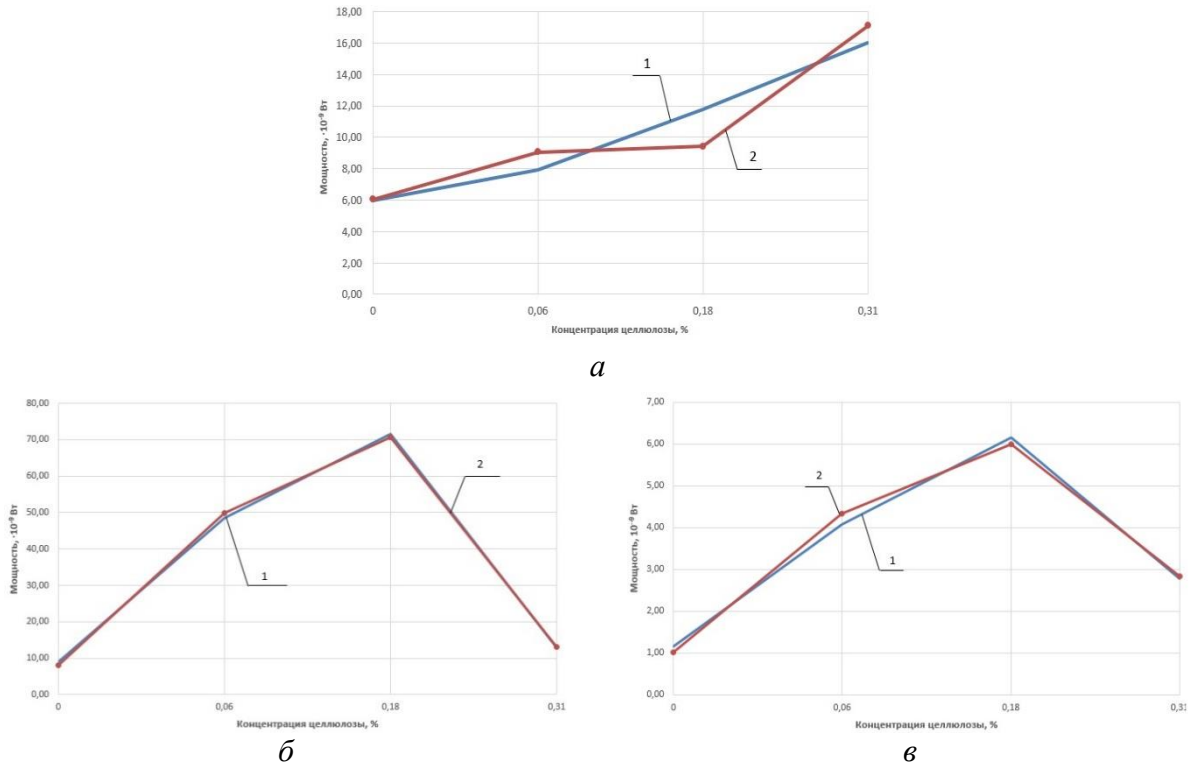


Рис. 9 – Теоретические и расчетные зависимости мощности звуковой волны от содержания целлюлозы на частотах, кГц: *а* – 4; *б* – 1,6; *в* – 2,5, где 1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

На последнем этапе обработки экспериментальных данных была проведена проверка адекватности полученных моделей по критерию Фишера. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты проверки адекватности моделей

Характеристики	Влага			Целлюлоза
	2 кГц	1,2 кГц	5 кГц	4 кГц
Расчетное значение F – отношения Снекодера - Фишера	0,31	1,06	1,18	0,49
Табличное значение F – отношения Снекодера – Фишера	7,71			
Дисперсия ошибки	$2,35 \cdot 10^{-18}$	$4,09 \cdot 10^{-17}$	$2,25 \cdot 10^{-14}$	$4,07 \cdot 10^{-18}$
Коэффициент детерминации	0,92	0,74	0,7	0,88

Расчетные значения ниже табличных, следовательно, все линейные модели являются адекватными экспериментальным данным и могут быть использованы для контроля качества трансформаторного масла.

Четвертая глава посвящена обоснованию коэффициента демпфирования средой в качестве критерия работоспособности трансформаторного масла. На несущих частотах 2 и 4 кГц были определены линейные зависимости между коэффициентом демпфирования средой и

концентрацией примесей. Полученные модели прошли проверку на адекватность и могут быть использованы в качестве тарифовочной кривой для оценки качества трансформаторного масла, где по определенному прибором значению коэффициента демпфирования средой выявляется количество содержащихся в образце трансформаторного масла влаги и целлюлозы. Полученные кривые представлены на рис. 10.

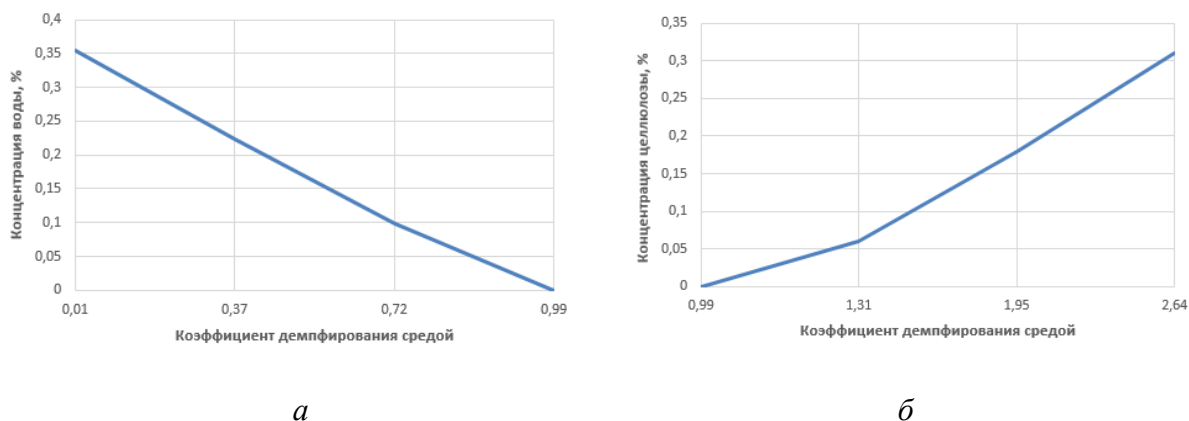


Рис. 10 – Тарифовочные кривые зависимости:
а – концентрации влаги от коэффициента демпфирования средой;
б – концентрации целлюлозы от коэффициента демпфирования средой

Также представлены практические рекомендации по применению предложенного метода для контроля эксплуатационных характеристик трансформаторного масла, в технологическом процессе его производства, при летучем контроле качества, при хранении, перевозке и реализации трансформаторных масел, а также в ходе производства и контроля углеводородов и их сырья. Разработанные рекомендации внедрены на АО «КрасЭКо» и в учебный процесс кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством» Политехнического института ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные научные и практические результаты работы:

1. Проведено теоретическое исследование современной системы контроля и диагностики силовых трансформаторов и существующих методов контроля качества трансформаторного масла и определено, что важные эксплуатационные показатели его качества – увлажненность и содержание целлюлозы, а перспективным методом контроля является акустический метод.

2. Разработан метод акустического контроля эксплуатационных показателей качества трансформаторных масел, в том числе экспериментальная установка, методика проведения экспериментов и

методика обработки полученных данных по исследованию влияния примесей на акустический спектр трансформаторного масла.

3. Подтверждена значимость влияния влаги и целлюлозы на акустический спектр трансформаторного масла с вероятностью 95 %.

4. Выбраны несущие частоты, на которых зависимость между мощностью звуковой волны и содержанием примесей является линейной: частота 2 кГц, отвечает за содержание влаги в трансформаторном масле, частота 4 кГц – за содержание целлюлозы.

5. Предложен критерий работоспособности трансформаторного масла, составлены соответствующие уравнения линейной регрессии, которые являются адекватными экспериментальным данным.

6. Разработаны практические рекомендации по применению предложенного метода для повышения надежности работы и безопасности эксплуатации силовых трансформаторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

а) статьи базы данных SCOPUS:

1. Anastasiya Tyuryumina, Andrey Batrak and Victor Sekackiy. Determination of transformer oil quality by the acoustic method // MATEC Web of Conferences. – 2017. – 113 p.

б) статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

2. Батрак А.П., Тюрюмина А.В., Никитина А.В. Сравнение качественных характеристик трансформаторных масел // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 41–44.

3. Акустический анализ свойств трансформаторных масел / А.П. Батрак, Т.М. Чупак, А.В. Тюрюмина, А.В. Никитина // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 4–5. – С. 45–46.

4. Anastasiia V. Krekhova, Yuriy N. Bezborodov and Andrey P. Batrak. Acoustic Control Method of Quality Characteristics of New Transformer Oil // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies – 2019. – 12(6). – 746 – 752 p.

в) участие в конференциях и работы в других изданиях:

5. Батрак А.П., Тюрюмина А.В., Никитина А.В. Акустический способ экспресс диагностики маслonaполненного энергооборудования // Интеллект и наука: тр. XIII Междунар. молодеж. науч. конф. / отв. ред. А.В. Хныкин; Железногор. филиал СФУ. – Железногорск, 2013. – 318 с.

6. Батрак А.П., Тюрюмина А.В., Никитина А.В. Акустическая диагностика как показатель качества свойств трансформаторных масел // Интеллект и наука: тр. XIV Всерос. молодеж. науч. конф. с междунар.

участием / отв. ред. А.В. Хныкин; Железногорск. филиал СФУ. – Железногорск, 2014. – 276 с.

7. Батрак А.П., Тюрюмина А.В., Никитина А.В. Факторный анализ качественных характеристик трансформаторного масла в 3 т. Т. 3 // Молодежь и XXI век – 2015: материалы V Междунар. молодеж. науч. конф. (26–27 февраля 2015 г.), Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга». – Курск, 2015. – 259 с.

8. Tyuryumina A.V. Importance of transformer condition evaluation [Электронный ресурс] // Проспект Свободный – 2016: материалы науч. конф., посвященной Году образования в Содружестве Независимых Государств (15–25 апреля 2016 г.) / отв. ред. А.Н. Тамаровская. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 47–48. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26505679>.

9. Тюрюмина А.В., Секацкий В.С., Батрак А.П. Диагностика состояния силового трансформатора в критических условиях эксплуатации. Сложные системы в экстремальных условиях: тез. докл. XVIII Всерос. симп. с междунар. участием; отв. ред. Р.Г. Хлебопрос, В.Г. Суховольский, О.В. Крюкова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 87. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26662042>.

10. Тюрюмина А.В., Секацкий В.С., Батрак А.П. Применение метода акустической эмиссии для диагностики силовых трансформаторов // Завалишинские чтения – 17: сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2017. – 351 с.

11. Тюрюмина А.В., Секацкий В.С., Батрак А.П. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 245–250.

12. Тюрюмина А.В., Батрак А.П., Секацкий В.С. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов в зарубежных странах // Молодой ученый. – 2016. – № 8 (112). – С. 321–325.

13. Тюрюмина А.В., Батрак А.П. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов. Проблемы теории и практики современной науки // Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (18 января 2016 г.): сб. науч. тр. / науч. ред. С.В. Галичева. – М.: Изд-во «Перо», 2016. – 156 с.

14. Тюрюмина А.В., Батрак А.П., Секацкий В.С. Анализ применения метода акустической эмиссии для диагностики силового оборудования в России и за рубежом // Молодой ученый. – 2016. – № 28 (132). – С. 194–197.