

*На правах рукописи*

**Коношенко Александр Владимирович**

**АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ,  
КАК СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск

2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Безопасность жизнедеятельности».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
**Лукьянов М.М.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**И. М. Кирпичникова**  
доктор технических наук, профессор  
**М. Г. Баширов**

Ведущее предприятие – государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина)

Защита состоится 25 февраля в 12.00 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ 20 ” января 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351)267-90-65, e-mail: a.konoshenko@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Значительная часть электрооборудования энергосистемы была введена в эксплуатацию в 60–70-х годах прошлого века с расчетом на 25–30 лет службы. Прогнозировалось, что после выработки ресурса данного электрооборудования произойдет его замена. Прогнозы не оправдались. Темпы демонтажа и списания производственных основных фондов в 3,5–4 раза отстают от нормативных темпов списания электрооборудования из-за износа. Финансирование воспроизводства и обновления электрооборудования отстает от темпов его старения. Как следствие – повышаются риски аварийных ситуаций для обслуживающего персонала.

Надежность работы силовых электротехнических комплексов во многом определяется работой элементов, составляющих их, и в первую очередь, силовых трансформаторов, обеспечивающих согласование комплекса с системой и преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые величины для дальнейшего ее использования, причем до 70% парка высоковольтных трансформаторов являются маслонаполненными. Высокая степень износа маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО) имеет потенциальную опасность для обслуживающего персонала. Негативными факторами производственной среды при работе неисправных МВВЭО, воздействующими на работников, являются: шум, вибрация, электромагнитное поле, электрический ток, в случае аварийных ситуаций – огонь, механические части разрушенного оборудования.

Вследствие частичных разрядов, внутренних коротких замыканий в МВВЭО проявляются и другие неблагоприятные факторы для обслуживающего персонала. Под действием электрической дуги нагреваются и разлагаются жидкие диэлектрики, выделяются газообразные токсичные вещества.

Существующие на сегодня способы контроля безопасного состояния внутренней изоляции МВВЭО в основном обнаруживают развивающиеся или существующие дефекты изоляции, а не их причину.

Решением этой непростой задачи: повышения надёжности работы МВВЭО, улучшения условий труда и безопасности обслуживающего персонала - является разработка и внедрение новых методов диагностирования и дистанционного мониторинга.

**Цель работы:** Повышение уровня безопасности при эксплуатации маслонаполненного электрооборудования путем анализа результатов измерений акустических характеристик жидкой изоляции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ повреждаемости МВВЭО и причин опасного состояния жидкой изоляции.

2. Теоретически обоснована взаимосвязь между скоростью распространения ультразвука в трансформаторном масле и его температуры в различных условиях эксплуатации.

3. Разработана и создана модельная установка для исследования акустических свойств жидкой изоляции (трансформаторного масла).

4. Разработана математическая модель эффективного нелинейного акустического параметра трансформаторного масла с микровключениями.

5. Разработана экспериментальная методика определения нелинейных акустических свойств жидкой изоляции для безопасной её эксплуатации.

**Идея работы** состоит в использовании нелинейного параметрического взаимодействия акустических колебаний.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Безопасное состояние жидкой изоляции (трансформаторного масла) может быть определено на основании изучения её акустических свойств.

2. Распространение скорости звука в жидкой изоляции (трансформаторном масле) зависит от степени её старения.

3. Нелинейный акустический параметр трансформаторного масла зависит от температуры и дефектной области с микровключениями.

4. Методика определения нелинейных акустических свойств жидкой изоляции для её безопасной эксплуатации.

**Научное значение работы:**

– впервые выявлено изменение акустической нелинейности и скорости звука в трансформаторном масле, выражающееся в усилении указанных характеристик с увеличением температуры масла;

– установлена температурная зависимость нелинейного акустического параметра, скорости звука от концентрации газовых микропузырьков (неоднородностей) в трансформаторном масле и на этой основе разработана экспериментальная методика;

– определена нелинейная связь параметра нелинейности и скорости звука в трансформаторном масле от концентрации газовых включений и температуры в трансформаторном масле как признака его безопасной эксплуатации.

**Практическое значение работы заключается в следующем:**

– получены экспериментальные результаты, расширяющие научное знание об акустических свойствах трансформаторного масла при наличии в нём газовых микровключений при различных температурах;

– разработана экспериментально-расчётная методика и средства для исследования нелинейного акустического параметра трансформаторного масла с газовыми микровключениями в зависимости от температуры;

– разработана и апробирована модельная акустическая установка для исследования газовых микровключений трансформаторного масла в натуральных условиях.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ акустики, удовлетворительным совпадением результатов исследований акустических свойств трансформаторного масла с результатами математического моделированного процесса.

### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Научные положения, выводы и рекомендации переданы в филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Урала, а также используются Южно-Уральским государственным университетом в лекционном курсе по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и при обучении студентов электротехнических специальностей в курсе «Безопасность жизнедеятельности».

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы доложены, рассмотрены и одобрены:

- на II и III Всероссийских научно-практических конференциях «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2003–2006);
- на XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Электроснабжение промышленных предприятий» (Новочеркасск, 2007);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технологии – экология» (Киров, 2008);
- на Международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна» (Комсомольск-на-Амуре, 2008);
- на VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (Чита, 2009);
- на IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2009).

**Публикации.** По материалам диссертации имеется 20 публикаций, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа изложена на 107 с. машинописного текста, иллюстрируется 34 рисунками и 13 таблицами. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы (130 наименований).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель, идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы.

Большой вклад в изучении механизма старения масляной изоляции и в том числе трансформаторного масла внесли российские ученые Р.А. Липштейн, С.М. Коробейников, Ю.Н. Львов, Л.А. Дарьян, в изучение нелинейных акустических свойств жидкости О. В. Руденко, С. И. Солуян, Л. К. Зарембо, В. А. Красильников и другие. Однако до настоящего времени проблема влияния газовых микровключений на жидкую изоляцию и их выявление в диэлектрике в полной мере не изучена.

Анализом статистики повреждений МВВЭО за период с 2006 по 2009 гг. на объектах филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Урала выявлено, что порядка

70% выходов из строя высоковольтных трансформаторов связано с повреждением их внутренней изоляции табл 1.

Таблица 1

Повреждаемость изоляции МВВЭО в филиале ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Урала

Причина	Количество повреждений по годам				Итого	%
	2006	2007	2008	2009 (полугодие)		
Старение (ухудшение свойств) изоляции	11	4	3	2	20	35,71
Перекрытие изоляции на корпус в результате атмосферного перенапряжения	5	2	1	0	8	14,29
Межвитковое замыкание	2	6	3	2	13	23,21
Заводские дефекты, некачественный ремонт	1	3	1	0	5	8,93
Внешние КЗ, перенапряжения в результате однофазных замыканий на землю	2	1	0	1	4	7,14
Неправильная эксплуатация, ошибки персонала	1	2	1	0	4	7,14
Снижение уровня масла, неисправность газовой защиты	0	1	0	1	2	3,57
Итого:	22	19	9	6	56	100

Основными в группах повреждений являются межвитковые замыкания, перекрытие изоляции в результате атмосферных перенапряжений, старение изоляции и напрямую связаны с техническим состоянием трансформаторного масла.

Существующие методы, определяющие состояние трансформаторного масла, основаны на физическом заборе проб (оптический, хроматографический, спектральный) и их лабораторном исследовании, что требует вывода из рабочего процесса силового трансформатора на продолжительное время и сопряжено с повышенной опасностью для обслуживающего персонала. Применяемые для диагностирования функциональные методы: тепловизионный, электромагнитный и электрический измерения интенсивности ЧР, не дают полной картины развития повреждений и лишь косвенно констатируют состояние жидкой изоляции.

Основными причинами деградации трансформаторного масла являются частичные разряды (ЧР), механические примеси, увлажнение. Под частичными разрядами понимают пробой сколь угодно малой части изоляционного промежутка, не приводящий одновременно к пробое всей изоляции. При возникновении ЧР в месте его образования выделяется энергия, приводящая к разрушению диэлектрика и образованию газовых включений. По литературным данным, при

ЧР в газовом включении до 25% энергии тратится на излучение, 3–5% - на ионизацию, около 30% - на расширение канала разряда и порядка 20% - на разрушение диэлектрика частицами. Вследствие большой частоты следования ЧР в жидкой изоляции происходит лавинный рост газовых включений и пробой изоляции.

Основными причинами образования газовых включений в трансформаторном масле являются:

1) перегревы – когда тепловой механизм образования пузырьков связан с локальным тепловыделением в жидкости за счёт её нагрева;

2) гидродинамическая кавитация – образование пузырьков вследствие движения перемешивания трансформаторного масла;

3) электродинамическая кавитация (электрострикция) – образование газовых пузырьков под действием электродинамических сил в сильном электромагнитном поле;

4) акустическая кавитация – образование газовых пузырьков под действием акустической ударной волны, вызванной колебанием конструкцией трансформатора;

5) адсорбция – образование газовых пузырьков на твёрдых частицах (шламе), присутствующих в трансформаторном масле.

Исследуя причинно-следственную связь образования газовых микровключений в жидкой изоляции и развитие в них частичных разрядов под действием сильного электромагнитного поля, влияния данных процессов на деградацию трансформаторного масла, приходим к выводу: резонансные свойства газового пузырька и нелинейность среды жидкого диэлектрика позволяют исследовать новые акустические свойства трансформаторного масла для определения его новых критериев состояния.

Парогазовые микровключения, обладая выраженными резонансными свойствами, отличаются от других микронеоднородностей более существенным влиянием на свойства изолирующих жидкостей, особенно вблизи точек фазовых переходов (высокая температура кипения) и существенно влияют на работу МВВЭО. Их присутствие резко увеличивает нелинейные свойства жидкости.

Характеристикой нелинейности среды является нелинейный акустический параметр

$$\varepsilon = \frac{1}{X_p \cdot K \cdot M}, \quad (1)$$

где  $K$  – волновое число звука,  $M$  – число маха ( $M = \frac{v}{C_0}$ ),  $X_p$  – расстояние разрыва,  $v$  – колебательная скорость,  $C_0$  – скорость звука

$$X_p = \frac{1}{\varepsilon \cdot K \cdot M} = \frac{C^2}{\varepsilon \cdot \omega_0 \cdot v}, \quad (2)$$

где  $X_p$  определяет физический смысл параметра акустической нелинейности  $\varepsilon$  и определяется экспериментально.

Нелинейный акустический параметр  $\varepsilon$  в жидкости с пузырьками необходимо рассматривать как сумму  $\varepsilon_{\text{эф}}$ , где один член определяет нелинейность диэлектрической жидкости (трансформаторного масла) без газовых включений, а другой  $\varepsilon_{\text{вкл}}$  определяет их влияние:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \varepsilon + \varepsilon_{\text{вкл}} \quad (3)$$

Для изучения нелинейных акустических характеристик трансформаторного масла и разработки методов контроля состояния изоляции с использованием параметрической излучающей антенны (ПИА), для которых усредненные значения акустических параметров изоляции вносят определенную погрешность, (т.к. при эксплуатации электроустановок температура маслонаполненных электроаппаратов изменяется в широких пределах в зависимости от режима работы), необходимо установить зависимость изменения скорости распространения звука от значения температуры трансформаторной жидкости, меняющейся с течением времени в соответствии с режимом эксплуатации МВВЭО.

Для проведения экспериментальных исследований с трансформаторным маслом и выявления в нем нелинейных акустических характеристик определен состав приборных средств и собрана модельная измерительная установка (рис. 1). Она включает в себя: 1 – двухканальный генератор гармонических сигналов; 2 – усилители и детектор; 3 – пьезоизлучатели; 4 – гидрофон; 5 – датчик температуры; 6 – прибор управления установкой формирования пузырей и нагревания; 7 – осциллограф - спектроанализатор; 8 – компьютер; 9 – металлический бак с трансформаторным маслом.

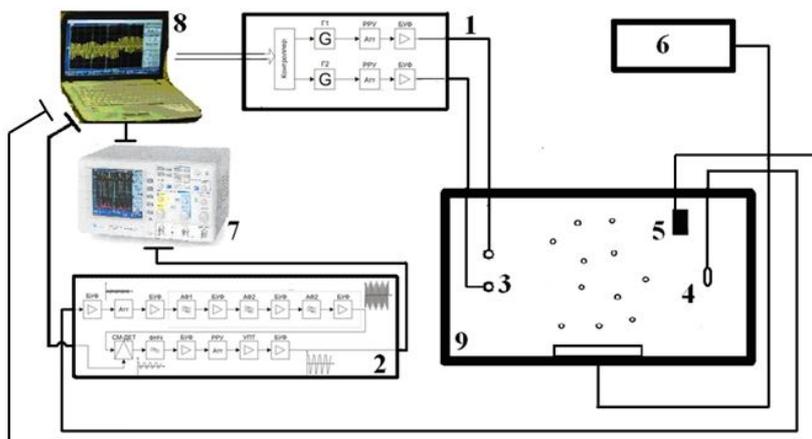


Рис. 1. Функциональная схема модельной установки

Для приема сигналов был разработан узкополосный тракт приема ультразвуковых волн. Тракт приема и обработки сигналов выполнен по многокаскадной схеме усиления и фильтрации сигналов с учетом возможности работы на прием и детектирование слабых сигналов комбинационных частот в случае режима нелинейного акустического излучения.

Функциональная схема системы излучения, приема и преобразования акустических сигналов показана на рис. 2.

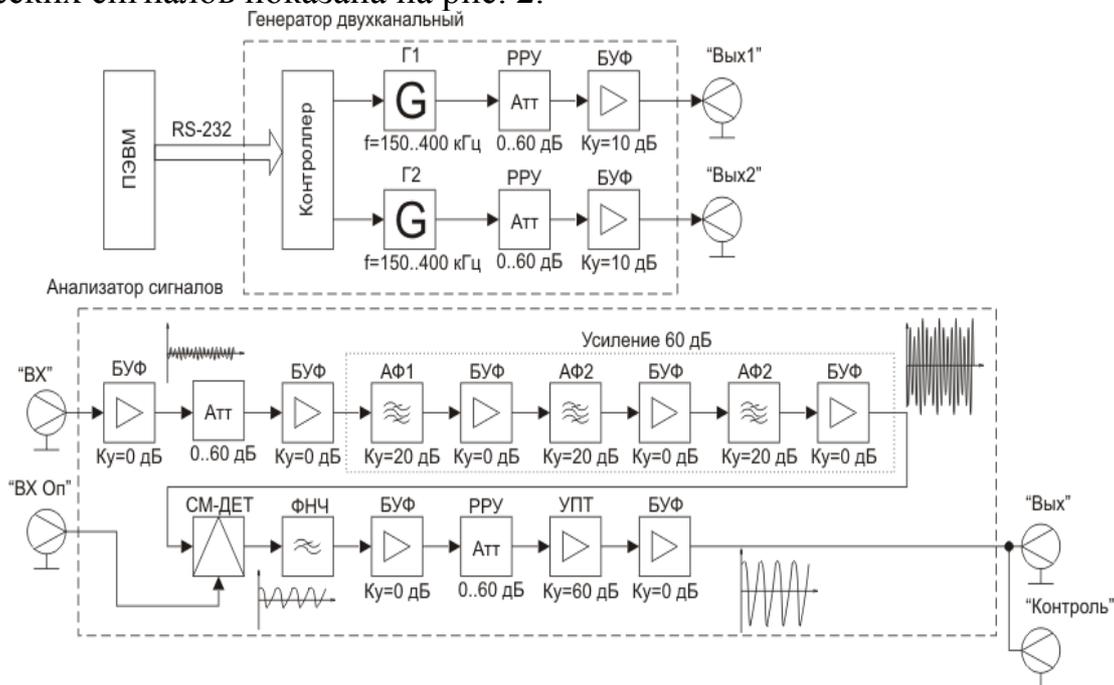


Рис.2. Функциональная схема излучающего и приемного тракта

При обработке данных в компьютере используется пакет прикладных программ для обработки акустических сигналов, их визуализации и построения графиков. Возможен вывод сигналов на осциллограф.

Для повышения эффективности и совершенствования акустических средств контроля состояния трансформаторного масла с микровключениями рассмотрена и определена акустическая характеристика жидкой изоляции – нелинейный акустический параметр.

В первой серии опытов были исследованы температурные зависимости нелинейности без генерации микропузырьков в трансформаторном масле при частоте накачки моноволны  $f=150$  кГц. Расстояние разрыва  $X_p$  определяется, как расстояние от точки излучения до точки на оси излучателя, где амплитуда волны максимально спадает. Выявлено, что расстояние разрыва волны  $X_p$  практически не меняется и слабо зависит от изменения температуры среды. Во второй серии опытов при генерации газовых микропузырьков  $\varnothing$  от 1 мкм до 1 мм диспергатором в трансформаторное масло обнаружено, что с повышением температуры трансформаторного масла уменьшается расстояние разрыва ультразвуковой моноволны, что приводит к росту нелинейного акустического параметра.

Среднее значение расстояния разрыва для волны с частотой 150 кГц

Наличие пузырьков	Расстояние разрыва, см					
	20° С	30° С	40° С	50° С	60° С	70° С
без пузырьков	29,1	27,6	27,5	25,3	24,2	23,9
с пузырьками	17,4	16	15	13,8	12,5	12,5

Характер изменения кривой зависимости нелинейного акустического параметра (НАП) от температуры показывает, что нелинейные эффекты резко возрастают при температуре около 50°С, что, по всей видимости, связано с фазовыми переходами в пузырьках, а частицы воды превращаются в пар, который конкурирует с газами, содержащимися в масле.

Из этого можно сделать заключение о том, что с ростом акустической нелинейности среды сигнал накачки подвержен сильному рассеянию на неоднородностях в ней и поглощению.

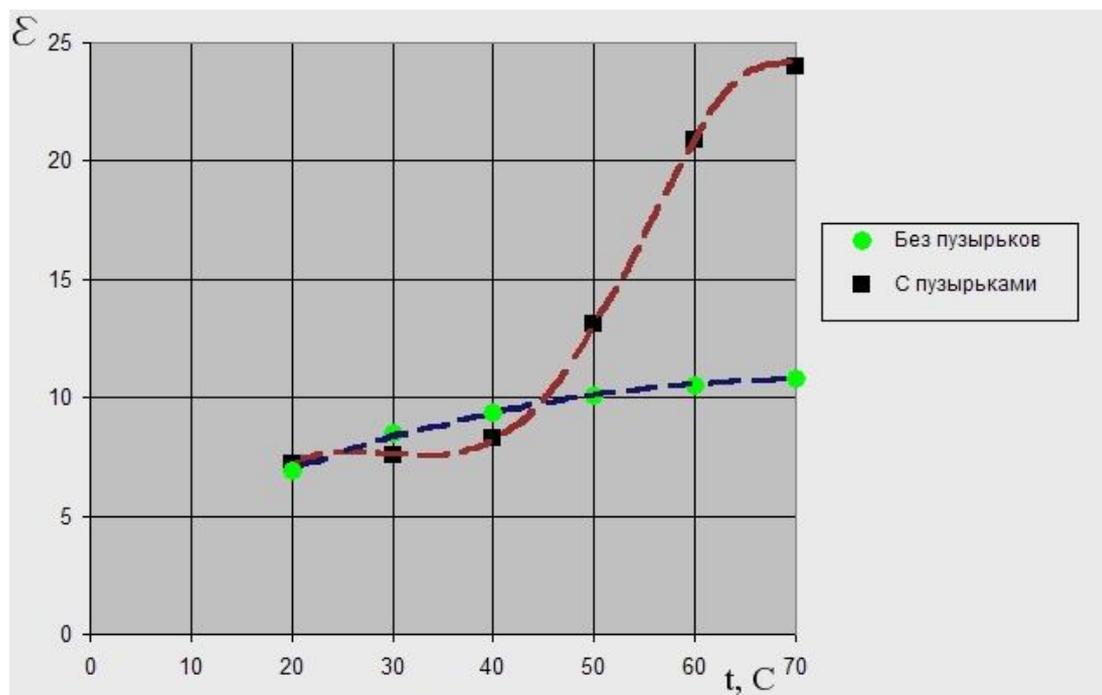


Рис. 3. Зависимость НАП от температуры трансформаторного масла

Для уточнения результатов первой и второй серии экспериментов были проведены опыты по изучению акустической нелинейности трансформаторного масла с использованием параметрической излучающей антенны.

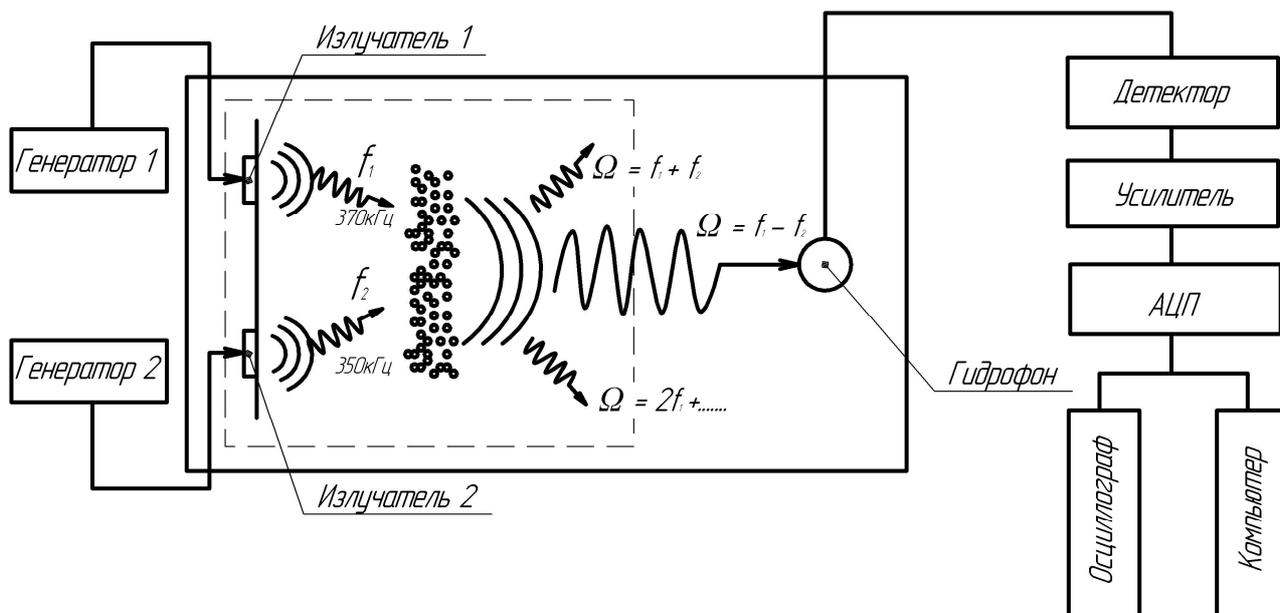


Рис.4. Схема модельной установки с использованием параметрического акустического излучателя

Для этого в трансформаторное масло с пузырьками излучалось два сигнала накачки на частотах  $\omega_1 = 350$  кГц и  $\omega_2 = 370$  кГц. В жидкой среде с пузырьками результатом взаимодействия этих волн будет являться генерирование волн комбинационных частот: вторых гармоник, волн суммарной ( $\omega_1 + \omega_2$ ) и разностной ( $\omega_1 - \omega_2$ ) частот. Вследствие значительного поглощения все волны за исключением волны разностной частоты (ВРЧ)  $\Omega = \omega_1 - \omega_2$  будут подвержены сильному затуханию. Это явление приводит к тому, что за пределами области взаимодействия будут в основном существовать лишь волны разностной частоты.

Полученные данные экспериментов повторили характер тренда зависимости нелинейного акустического параметра от температуры.

Установленная взаимосвязь акустических и температурных параметров трансформаторного масла позволяет получить в ходе эксперимента результаты для использования в диагностировании дефектной области жидкой изоляции со структурной неоднородностью – газовыми микровключениями.

Исходя из требований, предъявляемых к решению и имеющихся в наличии ресурсов, наиболее эффективным методом численной оценки акустических характеристик жидкой изоляции предлагается метод последовательных приближений.

Вычислительный процесс основан на пакете прикладных программ VIS-SIM. Блок схема вычислительного эксперимента на предложенных моделях представлена на рис. 6.

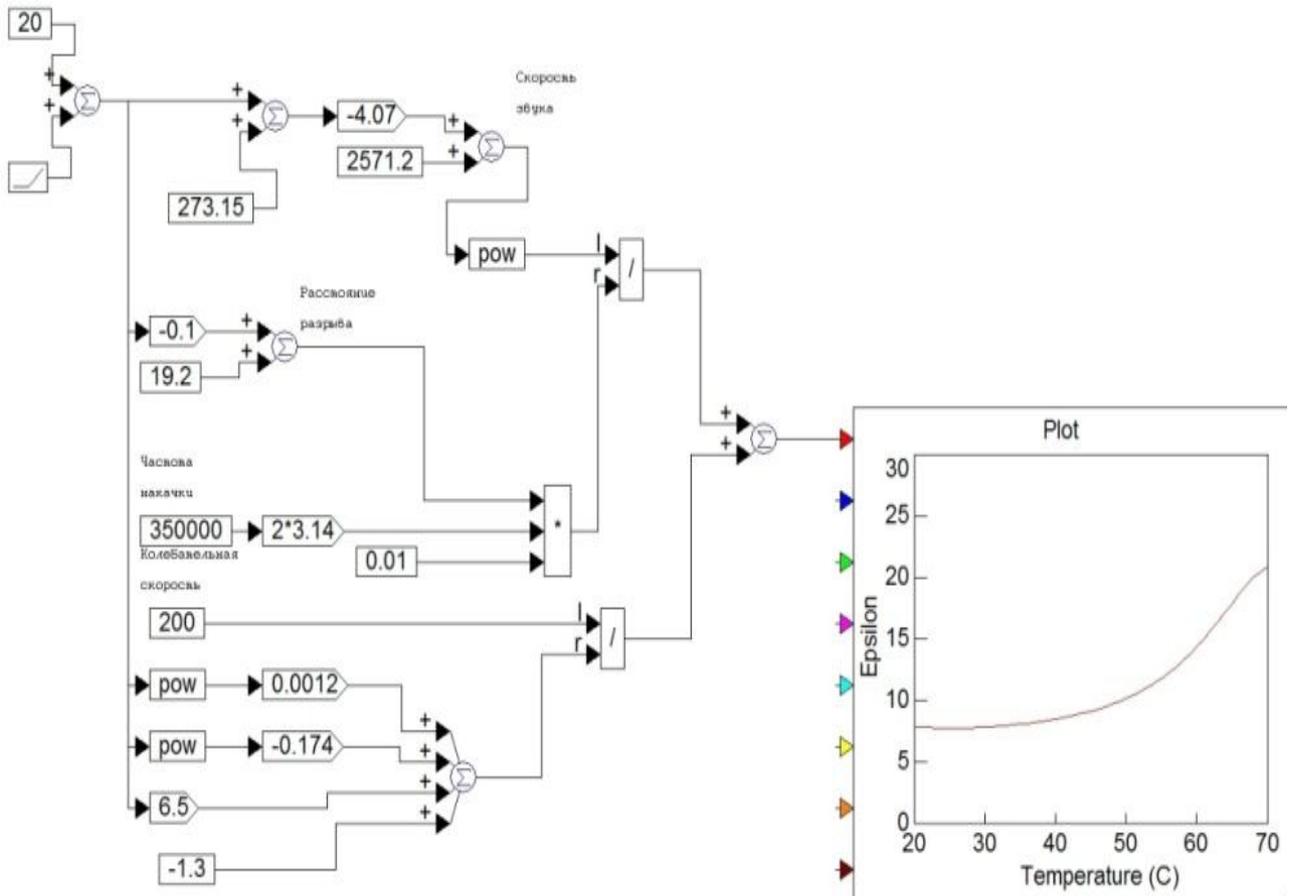


Рис. 5. Блок схема вычислительного эксперимента модели НАП в трансформаторном масле с микровключениями

В результате проведенных исследований математической модели НАП трансформаторного масла с микропузырьками при различных температурах его эксплуатации установлена его зависимость от температуры среды, которая определяется аналитической формулой

$$\varepsilon_{\text{вкл}} = \frac{200}{0,0012 \cdot t^3 - 0,174 \cdot t^2 + 6,5 \cdot t - 1,3}, \quad (4)$$

где  $t$  – температура трансформаторного масла с микропузырьками малой концентрации.

Графики зависимости нелинейного акустического параметра трансформаторного масла, полученные на модельной установке и в ходе численного математического эксперимента, приведены на рис. 6.

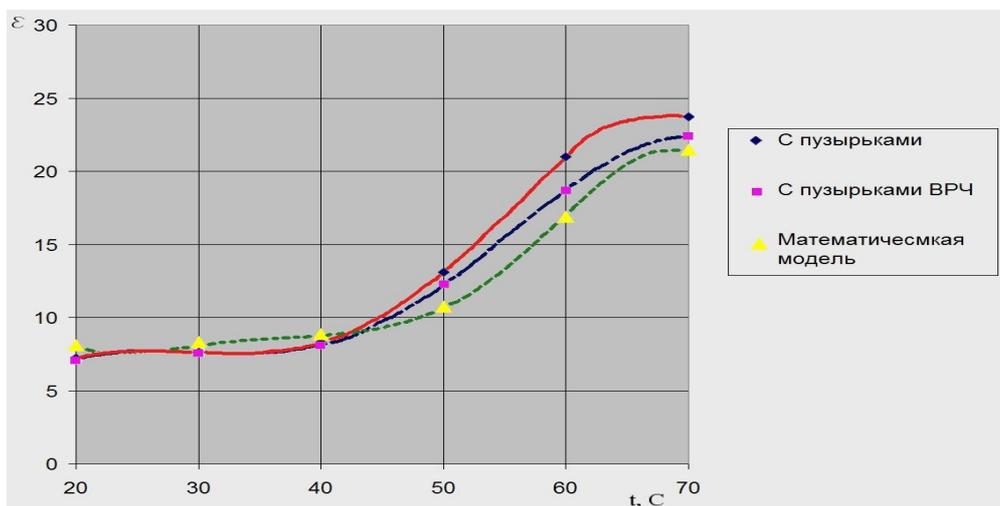


Рис. 6. Графики зависимости НАП от температуры трансформаторного масла с пузырьками при натурном и математическом экспериментах

Таким образом, в ходе вычислительного эксперимента установлена зависимость нелинейного акустического параметра трансформаторного масла с микровключениями от изменения его температуры в процессе эксплуатации. Составлена математическая модель нелинейного акустического параметра трансформаторного масла.

В основу способа положены принципы измерения расстояния разрыва по сигналам ультразвуковой волны и сигналу волны разностной частоты параметрической излучающей антенны, возникающей при облучении области с газовыми микровключениями, двумя ультразвуковыми сигналами накачки  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

Базовый измерительный участок задается в объеме бассейна модельной установки между двумя точками, в которых располагаются источники и приёмник ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые колебания распространяются от источников к приемнику в виде «акустического луча».

Для производства измерений нелинейного акустического параметра  $\varepsilon$  была разработана и практически апробирована следующая методика:

- трансформаторное масло, подготовленное к испытаниям, устанавливается в кювете;
- точки измерений располагаются на измерительной линии так, чтобы расстояние между соседними точками не превышало 2 см. Общее число точек должно быть не менее десяти;
- проводится калибровка измерительной модельной установки при помощи специального источника звукового давления и вольтметра;
- проводится измерение расстояния разрыва волны накачки при различных температурах жидкой изоляции с микровключениями;
- проводится расчет нелинейного акустического параметра, строится его зависимость от температуры трансформаторного масла;
- фиксируются значения давления, влажности, температуры в начале и в конце измерений.

Таким образом, разработанная методика исследования акустических характеристик жидкой изоляции позволит получить информативные параметры технического состояния изоляции и характеристики преддефектного ее состояния, обнаружения в ней микропузырьков, как предвестников частичных разрядов. Для получения объективных данных о параметрах волн разностной частоты (ВРЧ) и нелинейной характеристики среды в экспериментах применяется спектральный анализ огибающей сигналов ВРЧ. Эксперименты проводились на модельной измерительной установке.

Для исследования периодических процессов ВРЧ и выявления в них отдельных компонент, имеющих характерные частоты, тракт обработки сигналов включает: многокаскадный усилитель с фильтрацией сигналов, микровольтметр, амплитудный детектор, спектроанализатор и компьютер с пакетом прикладных программ. Для создания в трансформаторном масле нелинейной среды в него генерируются пузырьки.

С выхода двухканального генератора генерировались два сигнала 370 кГц и 350 кГц гармонической формы.

Проходя через среду с пузырьками, волны частично рассеиваются на неоднородностях и частично взаимодействуют друг с другом. В результате среда генерирует волну разностной частоты  $\Omega = 20$  кГц.

Для приема относительно слабых сигналов несущей ВРЧ в приемном тракте производится усиление, детектирование и выделение огибающей узкополосного спектра на спектроанализаторе.

Анализ звуоряда спектра огибающей сигнала ВРЧ производится на ПК в пакете audio Tester V2.2. На спектрограмме (рис. 7) выделяется дискретная составляющая (ДС) звуоряда на частоте 20 кГц – волна разностной частоты.

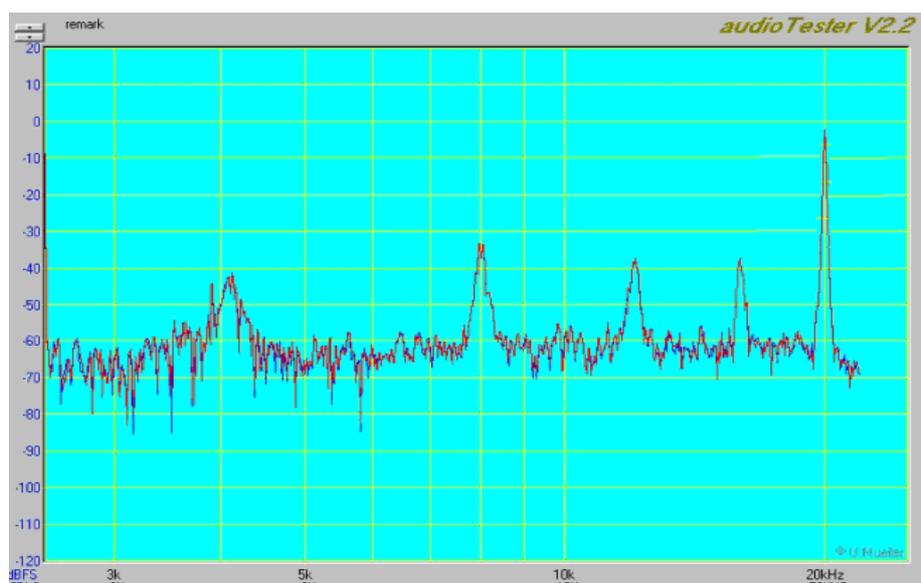


Рис. 7. Звуоряд огибающей сигнала ВРЧ с ДС волны разностной частоты и гармониками, генерируемыми пузырьками

Для спектрального анализа огибающей необходимо последовательно выделить из сигнала составляющую ВРЧ в нужной полосе частот, сформировать её огибающую и выполнить спектральный анализ сформированного сигнала.

Формирование огибающей выделенной части сигнала осуществляется электронным устройством в виде линейного детектора и фильтра низких частот.

Выявление ДС осуществляется в спектре огибающей волны разностной частоты следующим образом:

1) проводится дистанционная спектроскопия рассеивателей звука с целью определения их акустических характеристик и выбора оптимальных параметров сигналов накачки с точки зрения наибольшей эффективности преобразования энергии акустических волн накачки;

2) с помощью спектроанализатора измеряется спектр сигнала комбинационных частот;

3) в спектре выявляются дискретные составляющие, имеющие превышение над максимальным уровнем флюктуаций спектральных отсчетов не менее 6 дБ;

4) детектируется сигнал волны разностной частоты;

5) с помощью спектроанализатора измеряются спектры огибающей сигнала комбинационных частот на выходе параметрического канала;

6) в полученном спектре выявляются дискретные составляющие;

7) строится звукоуряд выявленных дискретных составляющих;

8) повторяются действия по пп. 7 и 6. При отсутствии в спектре огибающей ДС последний пункт не выполняется.

Таким образом, в результате использования спектрального анализа огибающей сигнала ВРЧ были установлены характеристики сигналов комбинационных частот и акустические параметры трансформаторного масла с газовыми микровключениями.

### **Заключение**

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по исследованию новых акустических характеристик жидкой изоляции как средства обеспечения безопасной эксплуатации МВВЭО. Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты:

1. Проведен анализ причин старения жидкой изоляции и выявлен кавитационный механизм образования газовых микровключений в жидкой изоляции.

2. Получены и аппроксимированы экспериментальные зависимости скорости звука от температуры для различных состояний трансформаторного масла (регенерированное, свежее, эксплуатационное, отработанное). Данные зависимости могут являться критерием принадлежности жидкой изоляции к какому-либо классу состояний (пригодному или не пригодному к эксплуатации).

3. Разработана и апробирована измерительная модельная установка для исследования акустических характеристик жидкой изоляции. Разработана функциональная схема системы измерения и преобразования акустических

сигналов нелинейной параметрической антенны. Данная установка позволяет с достаточной точностью исследовать нелинейные акустические свойства трансформаторного масла.

4. Разработаны алгоритм и методика проведения исследования нелинейного акустического параметра  $\epsilon$  трансформаторного масла.

5. В результате экспериментального исследования пространственно-временных и спектральных характеристик нелинейных акустических процессов в трансформаторном масле определен нелинейный акустический параметр  $\epsilon$ , его зависимость от наличия газовых микровключений в масле и температуры.

6. Решена вычислительная задача для составления математической модели НАП в пакете прикладных программ VISSIM. Получены аналитические зависимости состояния нелинейного акустического параметра  $\epsilon$  от температуры жидкой изоляции.

7. Результаты исследований переданы в филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Урала для создания опытной установки контроля акустических параметров трансформаторного масла в эксплуатационном режиме, используются в Южно-Уральском государственном университете в лекционном курсе по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», а также при обучении студентов электротехнических специальностей в курсе «Безопасность жизнедеятельности».

#### **Научные публикации по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Лукьянов М. М. Анализ повреждаемости и классификации дефектов высоковольтного маслонаполненного электрооборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // Теоретический научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2006. – № 3-4. – С. 24–38.

2. Лукьянов М. М. О выборе математической модели способа диагностирования маслонаполненного оборудования на основе нелинейного параметрического взаимодействия колебаний [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // Научно-технический и учебно-образовательный журнал «Электромеханика». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007. – С. 27–29.

3. Лукьянов М. М. К вопросу о диагностировании высоковольтного оборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // Научно-технический и учебно-образовательный журнал «Электромеханика». Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007. – С. 29–30.

4. Лукьянов М. М. К вопросу об образовании газовых включений в масляной изоляции [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // Научно-технический и учебно-образовательный журнал «Электромеханика». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007. – С. 30–32.

## Другие научные публикации по теме диссертации

5. Лукьянов М. М. Развитие способов диагностики высоковольтного оборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Челябинск, 2006. – С. 20-29.
6. Лукьянов М. М. К вопросу об образовании газовых пузырьков в главной изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2007. – № 1. – С. 16–23.
7. Лукьянов М. М. Влияние газовых микровключений на состояние жидкой изоляции маслонаполненного электрооборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2007. – № 2-3. – С. 50–61.
8. Лукьянов, М.М. Анализ пожаров промышленного маслонаполненного электрооборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, Е.В. Шведова, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2007. – № 2-3. – С. 61–65.
9. Лукьянов М. М. К вопросу о диагностировании высоковольтного оборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007.
10. Лукьянов М. М. К вопросу об образовании газовых включений в масляной изоляции [Текст] / М.М. Лукьянов, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // «Электроснабжение промышленных предприятий»: Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007.
11. Лукьянов М. М. О выборе математической модели способом диагностирования маслонаполненного оборудования на основе нелинейного параметрического взаимодействия колебаний [Текст] / М.М. Лукьянов, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // «Электроснабжение промышленных предприятий»: Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007.
12. Лукьянов М. М. К вопросу об идентификации опасности в электроэнергетическом производстве [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2008. – № 2-3. – С. 55–60.
13. Лукьянов М. М. Способ оценки состояния маслонаполненного электрооборудования по скорости распространения звука в изоляционной жидкости [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2008. – № 4. – С. 8–13.

14. Лукьянов М. М. Экспериментальные исследования акустических свойств жидкого диэлектрика высоковольтного оборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Наука – производство – технологии – экология: Всерос. науч.-техн. конф.: сб. материалов. – Киров: Издательство ВятГУ, 2008. – Т.3 – С. 119–121.
15. Лукьянов М. М. Математическое моделирование обнаружения газовых включений в жидкой изоляции [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Дальневосточная весна: Материалы международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2008. – С.88–89.
16. Лукьянов М. М. Кавитационный механизм износа жидкой изоляции маслonaполненного высоковольтного электрооборудования и метод его диагностирования [Текст] / М. М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Наука – производство – технологии – экология: Всерос. науч. - техн. конф.: сб. материалов. – Киров: Издательство ВятГУ, 2008. – Т.3 – С. 119–121.
17. Лукьянов М. М. Методика определения нелинейного акустического параметра трансформаторного масла [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Энергетика в современном мире: VI Всероссийская науч.-практич. конф.: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. –Ч. I. – С. 158–161.
18. Лукьянов М. М. Методика обнаружения газовых включений дефектной области масляной изоляции [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Энергетика в современном мире: VI Всероссийская науч.-практич. конф.: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. –Ч. I. – С. 135–142.
19. Коношенко А. В. Экспериментальные исследования акустических свойств трансформаторной жидкости для безопасной её эксплуатации [Текст] / А.В. Коношенко // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.1. – С. 153-155.
20. Лукьянов М. М. Метод обнаружения опасного состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного электрооборудования [Текст] / М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко, А.Б. Святых // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.1. – С. 217-219.

Коношенко Александр Владимирович

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ,  
КАК СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
*кандидата технических наук*