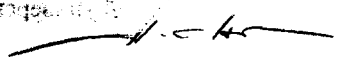


0.04.02
С 259

На правах рукописи



Святых Андрей Борисович

**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЖИДКОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.09.02 – «Электротехнические материалы и изделия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЮФРГУ

Москва
2011

Работа выполнена на кафедре «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) филиал в г. Златоусте.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Лукьянов Михаил Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Ларин Юрий Тимофеевич

кандидат технических наук, доцент
Боев Андрей Михайлович

Ведущая организация: ООО «Инженерно-техническая компания «ЭнергоСоюз», г. Челябинск

Защита состоится « 20 » января 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.15 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 13, ауд. Е-205

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского университета «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского университета «МЭИ».

Автореферат разослан « 11 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.15
к.т.н.



Боровкова А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежная и безопасная эксплуатация электроустановок невозможна без работоспособного высоковольтного электрооборудования и качественного функционирования электрических сетей, которые являются завершающим звеном в системе обеспечения потребителей электрической энергией. При этом работоспособность электротехнических комплексов определяется работой их главных компонентов, в первую очередь, высоковольтных силовых трансформаторов, обеспечивающих согласование и преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые величины для дальнейшего ее использования, причем до 70% парка высоковольтных трансформаторов являются маслонаполненными.

Физический износ, старение и, как следствие, отказ в работе и аварийность маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО) снижают эффективность и надежность функционирования электротехнического комплекса, приводят к ухудшению условий производственной среды, к появлению опасных факторов в рабочей зоне электротехнического персонала. Отказы в работе МВВЭО часто приводят к прекращению подачи электрической энергии на значительной территории, ярким примером такой аварии является взрыв маслонаполненного трансформатора тока на подстанции «Чагино», который привел к нарушению работы центральной части энергосистемы, в результате чего без электрической энергии продолжительное время оставались потребители I и II категорий.

Для поддержания в работоспособном состоянии МВВЭО и безаварийной работы электрических сетей в практике их технической эксплуатации используются методы контроля и диагностирования, основанные на обнаружении протекания тока в местах образования дефектов. Поэтому для предупреждения отказов главных элементов электротехнических комплексов, для обеспечения безопасности электротехнического персонала необходимо развивать способы контроля технического состояния изоляции МВВЭО, позволяющие обеспечить раннее обнаружение дефектной области жидкой изоляции с микровключеннями, в которых развиваются физические процессы, приводящие к отказам изоляции, и, в дальнейшем, к технологическим нарушениям в работе электрооборудования и, в целом электротехнических комплексов.

Таким образом, контроль технического состояния действующего МВВЭО в процессе его производственной эксплуатации является актуальным.

Цель работы: обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации МВВЭО путём обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования для контроля её технического состояния.

Для достижения заявленной цели поставлены следующие задачи:

1. Исследование и анализ функционирования высоковольтных компонентов энергосистем уральского региона, работоспособности

маслонаполненного высоковольтного электрооборудования и состояния его изоляции.

2. Имитационное моделирование теплового процесса кавитации и установление закономерностей развития микровключений в жидкой изоляции.

3. Установление критерия безопасного состояния жидкой изоляции с микровключениями.

4. Исследование волновой модели жидкой изоляции с микровключениями и структурно-чувствительного параметра – эффективного нелинейного акустического параметра.

5. Исследование характеристик средства обнаружения микровключений в трансформаторном масле и определения его параметров.

6. Разработка методики обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции и контроля технического состояния жидкой изоляции по напряжению пробы при принятии решений в процессе производственной эксплуатации маслаполненного высоковольтного электрооборудования.

Объект исследования — маслаполненное высоковольтное электрооборудование в системах электроснабжения.

Предмет исследования – закономерности между газовыми включениями в жидкой изоляции и её техническим состоянием.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточным объемом статистических данных (проанализировано 5778 актов расследования технологических нарушений в работе электрооборудования), корректным применением основ физики и гидродинамической акустики, использованием современных методов математической статистики, применением аналитического и графоаналитического методов, положительными результатами натуральных экспериментов с результатами численного моделирования.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Установлена закономерность развития микровключений при тепловом механизме кавитации в жидкой изоляции и определен новый критерий оценки ее технического состояния.

2. Исследован новый структурно-чувствительный параметр жидкого диэлектрика (эффективный нелинейный акустический параметр), характеризующий структурную неоднородность дефектной области изоляции.

3. Исследована волновая модель состояния жидкой изоляции с микровключениями в диапазоне рабочих температур МВВЭО с учётом структурной нелинейности изоляционной среды.

4. Впервые разработана методика контроля технического состояния жидкой изоляции, основанная на обнаружении газовых микровключений и определении их размеров как критерия технического состояния трансформаторного масла.

Практическая значимость работы и ее реализация:

1. Обоснованы параметры средства обнаружения микропузырьковой структуры жидкой изоляции и определена структура средства технического

контроля и сигнализации об опасном состоянии изоляции электротехнических комплексов.

2. Разработана и апробирована натурная установка измерительного комплекса для обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции и контроля её технического состояния.

3. Научные положения, выводы и рекомендации переданы в филиал ООО «Газпром ТрансГаз Югорск», ОАО «Златоустовский металлургический завод», ООО «Сетевая компания Златмаш», ООО «Областная электросетевая компания» г. Челябинск.

4. Результаты исследований используются в учебном процессе филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» в курсе «Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий».

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы доложены, рассмотрены и одобрены на международной научно-технической конференции молодых специалистов г. Магнитогорск, 2003г.; на III и IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», г. Челябинск, 2006г., 2009г.; на XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика электрических систем» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий», г. Новочеркасск, ЮРГТУ, 2007г.; на Всероссийской научно-технической конференции «Наука-производство-технологии-экология», г. Киров, 2008г.; на 8 и 10-ой Международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна», г. Комсомольск-на-Амуре, 2008г., 2010г.; на VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире», г. Чита, 2009г.; на XLIX Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству», г. Челябинск, 2010г.; на 62-й и 63-й научной конференции профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ, г. Челябинск, 2010г., 2011г.; на XL Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи (с международным участием) «ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2010», Москва, МЭИ (ТУ), 2010г. Материалы работы рассмотрены и одобрены Российским Союзом научных и инженерных общественных организаций в ходе проведения Всероссийского конкурса «Инженер года – 2010».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 6 — в периодических изданиях, рекомендованных ВАК. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (163 литературных источника), 4 приложений. Содержит 133 страницы основного текста, в том числе 48 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы: сформулированы цель и задачи исследования; изложена научная новизна и практическая ценность работы; определены объект и предмет исследования; приведены основные положения работы, выносимые автором на защиту; отражены вопросы реализации и апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу состояния исследуемого вопроса и обоснованию задач исследования.

В настоящий момент контроль технического состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования является одной из наиболее актуальных задач электроэнергетики. В первую очередь, это связано с тем, что степень износа основных фондов электрических сетей Российской Федерации составляет более 40%, в том числе подстанционного оборудования около 60%.

Анализ причин технологических нарушений в работе силовых трансформаторов за период с 2002 по 2008 гг. на объектах ОАО «МРСК Урала»–«Челябэнерго», выявил, что более 70% неисправности МВВЭО связано с повреждением изоляции, в том числе более 30 % - с повреждением жидкой изоляции.

Основными в группах повреждений являются: старение изоляции, межвитковые замыкания, перекрытие изоляции в результате атмосферных перенапряжений.

Большой вклад в изучение механизма старения и износа изолирующей жидкости, 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.

Применяемые для контроля технического состояния функциональные методы (тепловизионный, электромагнитный и электрический измерения интенсивности частичных разрядов), обнаруживают развитие повреждений, когда через место дефекта уже протекает ток и не позволяют обнаруживать первопричину до начала развития дефекта.

В процессе эксплуатации трансформаторного масла происходит его старение и оно претерпевает ряд физико-химических изменений. Старение изоляционного масла снижает надёжность всей изоляционной конструкции, т.к. повышенная кислотность способствует старению твёрдой изоляции и снижению её механической прочности, а осаждение шлама увеличивает диэлектрические потери и ухудшает отвод тепла. Влага из масла, переходя в твёрдую изоляцию, усиливает в ней процессы разрушения. При этом выделяются продукты разложения, в том числе газы.

Электрическая прочность газовых микровключений жидкой изоляции значительно меньше электрической прочности трансформаторного масла, в связи с чем, в нём возникают частичные разряды, при этом происходит рост газового пузырька с увеличением интенсивности частичного разряда, что, в

конечном итоге, может привести к пробое изоляции. Таким образом, центрами возникновения и развития частичных разрядов в жидкой изоляции являются газовые микровключения. Определены зависимости напряжения пробоя от размеров газовых микровключений, представленные на рис. 1.

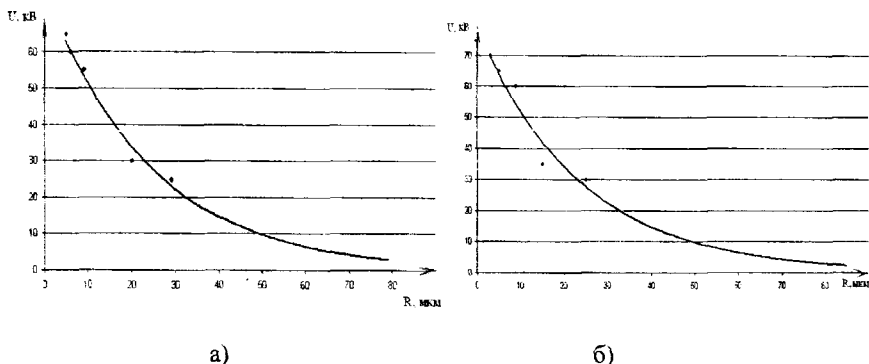


Рис. 1 Зависимость напряжения пробоя трансформаторного масла от размеров газовых микровключений:

а) после заливки в оборудование б) предназначенного для заливки

Критерием оценки технического состояния жидкой изоляции МВВЭО в процессе его производственной эксплуатации могут служить размеры газовых включений, радиус которых, определяет значение пробивного напряжения внутри действующего МВВЭО в зависимости от категории электрооборудования.

В ходе работы установлены критерии опасного состояния жидкой изоляции и определены допустимые значения размеров газовых микровключений в жидкой изоляции с микровключениями, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые размеры газовых микровключений в жидкой изоляции

Категория электрооборудования	Предельно допустимые параметры после заливки масла в электрооборудование			Предельно допустимые параметры предназначенного к заливке в электрооборудование		
	Пробивное напряжения трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм	Пробивное напряжения трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм
До 15 кВ включительно	25	10	29	30	12	25
До 35 кВ включительно	30	12	20	35	14	15
От 60 до 150 кВ включительно	55	22	9	60	24	9

Категория электрооборудования	Предельно допустимые параметры после заливки масла в электрооборудование			Предельно допустимые параметры предназначенного к заливке в электрооборудование		
	Пробивное напряжение трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм	Пробивное напряжение трансформаторного масла, кВ	Напряженность пробоя, кВ/мм	радиус газового включения в жидкой изоляции, мкм
От 220 до 500 кВ включительно	60	24	6	65	26	5
750 кВ	65	26	5	70	28	3

Во второй главе выполнено исследование процессов тепловой кавитации и установлены закономерности в распределении газовых микровключений в жидкой изоляции.

Известно, что основными причинами образования газовых включений в трансформаторном масле являются: 1) перегревы; 2) гидродинамическая кавитация; 3) электродинамическая кавитация (электрострикция); 4) акустическая кавитация; 5) адсорбция.

Экспериментальные наблюдения производились с помощью оптико-телевизионной системы при различных увеличениях исследуемого объекта. Наблюдение за возникновением и развитием газовых микровключений позволило установить закономерности в распределении газовых микровключений.

Оптико-телевизионная система представленная на рис. 2 состоит из: исследуемого объекта 1, устройства нагрева трансформаторного масла 2, блока осветителей 3, микроскопа 4, телекамеры 5, датчика температуры 6, компьютера 7 с блоком специализированных интерфейсов, калибровочного элемента 8.

При работе системы исследуемый образец устанавливается в рабочую зону, блоком осветителей формируется требуемая подсветка объекта. Оптическое изображение преобразуется телекамерой в телевизионное изображение и передается в компьютер для записи в блоке специализированных интерфейсов. В заключении проводится анализ полученного изображения и измерения газовых микровключений.

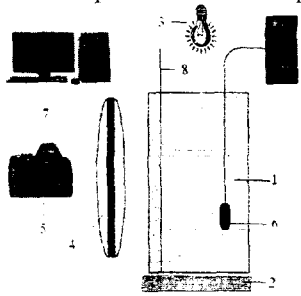


Рис. 2. Оптико-телевизионная система имитационного моделирования процессов тепловой кавитации

В результате обработки измерений установлены закономерности в распределении газовых микровключений в жидкой изоляции, описываемые нормальным законом распределения:

Аналитическая функция распределения плотности вероятности среднего радиуса газовых включений в жидкой изоляции имеет вид:

$$f_{\sigma}(R) = \frac{1}{384.005} \cdot e^{-\frac{(R-214.095)^2}{306.392}} \quad (1)$$

Аналитическая функция распределения газовых микровключений в жидкой изоляции по размерам при тепловом механизме кавитации имеет вид:

$$f(R) = \frac{1}{123.252 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(R-165.721)^2}{2123.252^2}} \quad (2)$$

Исследованы физико-механические свойства жидкой изоляции с микровключениями. Предложен и исследован структурно-чувствительный параметр качества жидкой изоляции с микровключениями – эффективный нелинейный акустический параметр, изменяющийся от единиц до нескольких десятков при температуре 20^oC -70^oC.

Разработана математическая модель эффективного нелинейного акустического параметра жидкой изоляции от температуры в рабочем режиме МВВЭО, при объемном газосодержании 10⁻⁴:

$$\alpha_{\psi} = \left[-70 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 0,0098 \cdot t^2 - 0,3203 \cdot t + 10,6 \right] + \left[69 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 0,0114 \cdot t^2 - 0,5786 \cdot t + 7,224 \right] \quad (3),$$

где t – температура жидкой изоляции, ^oC.

Выражение в первой квадратной скобке определяет температурную зависимость нелинейного акустического параметра изолирующей жидкости (трансформаторного масла) без пузырьков, выражение во второй квадратной скобке представляет влияние структурной нелинейности обусловленную наличием газовых микровключений в жидкой изоляции при изменении температуры в процессе эксплуатации МВВЭО. Исследование структурно-чувствительного эффективного нелинейного акустического параметра трансформаторного масла позволяет разработать способ обнаружения дефектной области жидкой изоляции с микровключениями в МВВЭО под рабочим напряжением

В **третьей** главе исследована волновая модель жидкой изоляции с микровключениями и теоретически обоснованы параметры средства контроля технического состояния жидкой изоляции. Проведено математическое и компьютерное моделирование акустических процессов в жидкой изоляции.

Свойства реальных жидкостей существенно отличаются от свойств идеальной жидкости из-за присутствия в них различных микро неоднородностей.

Среди микро неоднородностей можно выделить газовые и парогазовые пузырьки. Их присутствие резко увеличивает нелинейные свойства трансформаторного масла и позволяет применять нелинейные акустические методы спектроскопии.

Волновая модель жидкой изоляции описывается уравнением движения, уравнением непрерывности и уравнением состояния:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4).$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5).$$

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (6).$$

В процессе технической эксплуатации маслонаполненного электрооборудования в жидкой изоляции возникают газовые микровключения.

Объем газового микровключения определяется по выражению (7), а объемное газосодержание выражением (8).

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \quad (7); \quad \varphi = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot n \cdot R^3 \quad (8).$$

Акустические методы исследования газовых включений в жидкой изоляции основываются на возможности раскочки низкочастотных радиальных колебаний стенок пузырька акустической волной, что позволяет применить акустическую спектроскопию включений.

Обнаружение газовых микровключений в жидкой изоляции происходит с помощью параметрической излучающей антенны (ПИА), схема которой представлена на рис. 3.

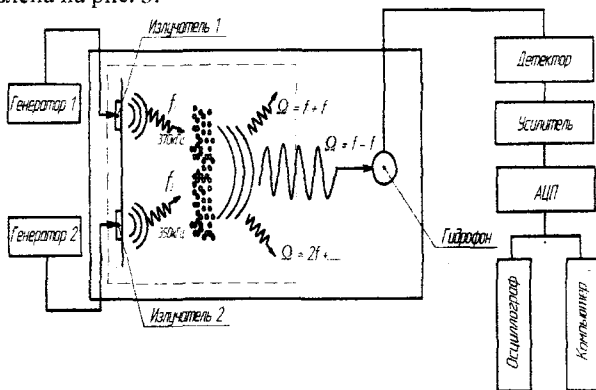


Рис. 3. Структурная схема принципа параметрической излучающей антенны

Акустические колебания, частотой f_1 и f_2 , называемые волнами накачки, воздействующие на газовый пузырек в жидком диэлектрике описываются уравнением:

$$P_{вн} = A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + A_2 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \quad (9),$$

где A_1 и A_2 — амплитуды акустических сигналов, Па;

ω_1 и ω_2 — циклические частоты акустических сигналов, c^{-1} ,

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \quad \omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2$$

В пределах дефектной области жидкой изоляции с микровключениями происходит нелинейное взаимодействие волн накачек (ω_1 и ω_2), при этом пузырек будет совершать радиальные колебания, описываемые уравнением Рэлея:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} R + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho} (P_2 - P_{\text{вн}}) \quad (10)$$

Результатом данного взаимодействия будет являться генерирование волн комбинационных частот, в том числе разностной ($\omega_1 - \omega_2$) частоты.

Акустическое давление волны разностной частоты (ВРЧ) в нелинейной среде можно определить по формуле:

$$P_{\Omega} = \frac{\Omega^2 \cdot \rho \cdot \Delta V}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (11),$$

где Ω — разностная частота, с^{-1} ; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; r — расстояние до пузырька, м; ΔV — изменение объема при колебаниях пузырька, м.

Уравнение изменения объема газового включения при воздействии акустических колебаний описываемых уравнением (9), с учётом структурно-чувствительного эффективного нелинейного акустического параметра примет вид:

$$\Delta V = \frac{\left[\left[-70 \cdot 10^{-4} \cdot r^3 + 0.0098 \cdot r^2 - 0.3203 \cdot r + 10.6 \right] + \left[69 \cdot 10^{-4} \cdot r^3 + 0.0114 \cdot r^2 - 0.5786 \cdot r + 7.224 \right] \cdot \left[\beta - \beta \cdot (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_1 \cdot \omega_2) \right] \cdot (A, A_2) \right]}{\sqrt{(\omega_{\text{вн}}^2 - \omega^2)^2 + \omega^4 \cdot \delta^2} \cdot \left\{ (\omega_{\text{вн}}^2 - \omega^2)^2 + \omega^4 \cdot \delta^2 \right\} \cdot \left[(\omega_{\text{вн}}^2 - \Omega^2)^2 - \Omega^4 \cdot \delta^2 \right]} \quad (12).$$

В результате математического моделирования в программном комплексе MathCad определены зависимости амплитуды ВРЧ от радиуса обнаруживаемых газовых включений при различных значениях частот сигналов накачек. Установлено, что при изменении значений частоты ВРЧ происходит лишь изменение амплитуды ВРЧ, а изменение радиуса обнаруживаемого пузырька происходит при изменении частот сигналов накачек.

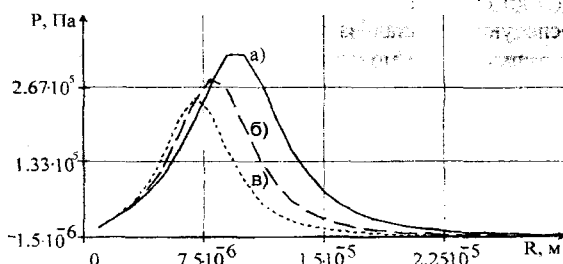


Рис. 4. Зависимость амплитуды ВРЧ от радиуса обнаруживаемых пузырьков при различных частотах накачки:

а) 400 кГц и 380 кГц; б) 350 кГц и 330 кГц; в) 300 кГц и 280 кГц

Для определения значений частот накачки необходимых для обнаружения газовых включений различного размера построены зависимости амплитуды давления ВРЧ от радиуса при различных частотах

накачки и построена зависимость радиуса обнаруживаемых пузырьков от частоты накачки при ВРЧ=20кГц, представленная на рис. 6.

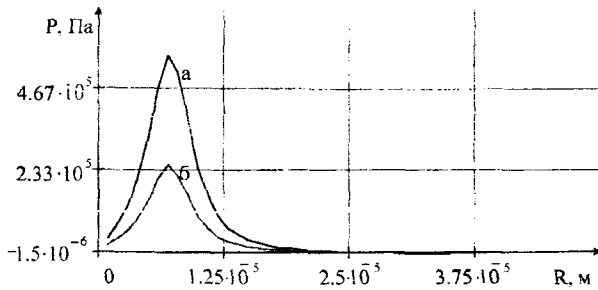


Рис. 5. Зависимость амплитуды ВРЧ от радиуса обнаруживаемых пузырьков при различных значениях частоты ВРЧ

а) $\Omega=20\text{кГц}$ б) $\Omega=10\text{кГц}$

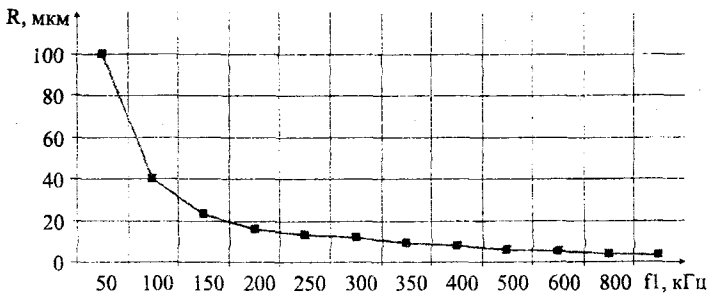


Рис. 6. Зависимость радиуса обнаруживаемых микровключений от частоты сигналов накачки

Таким образом, исследованы акустические характеристики ПИА, определен частотный диапазон сигналов накачки от 400 кГц до 30 кГц, и частота сигнала ВРЧ 20 кГц, обеспечивающие возможность акустической спектроскопии трансформаторного масла и обнаружения газовых включений размером от 7 до 110 мкм.

Для последующего анализа акустических процессов в жидкой изоляции проведено компьютерное моделирование акустических процессов в жидкой изоляции в программном комплексе Vissim.

В разработанной компьютерной модели проведена визуализация акустических процессов в жидкой изоляции и получены теоретические зависимости давления ВРЧ при разных значениях сигналов накачек, радиуса обнаруживаемых пузырьков (R), а также эффективного нелинейного акустического параметра ($\alpha_{эф}$).

Анализ спектра огибающей полученного сигнала, представленной на рис. 7, позволяет сделать заключение об уровне давления ВРЧ, а следовательно, о наличии или отсутствии газовых включений в жидкой изоляции.

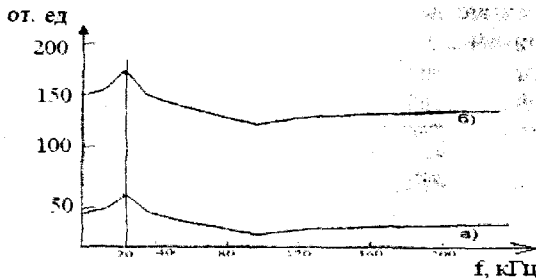


Рис. 7. Спектр огибающей модулированного сигнала:

а) при отсутствии газовых пузырьков в жидкой изоляции ($\alpha=8$)

б) при наличии газовых пузырьков в жидкой изоляции ($\alpha=25$)

Анализ зависимостей, представленных на рис. 7, показывает, что давление ВРЧ значительно превосходит уровень звукового давления волн других частот. Значительное увеличение эффективного нелинейного акустического параметра среды при наличии в жидком диэлектрике газовых микровключений вызывает увеличение взаимодействия сигналов накачки, что приводит к увеличению уровня давления ВРЧ в несколько раз.

В четвертой главе разработана структура средства обнаружения газовых микровключений и методика оценки технического состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования по напряжению пробоя, позволяющая получить информацию о состоянии жидкой изоляции электрооборудования без вывода его из работы в режиме «реального времени». Получены экспериментальные данные амплитуды ВРЧ. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями амплитуды ВРЧ составило не более 22%, что позволяет идентифицировать газовые микровключения в жидкой изоляции действующего оборудования.

Структурная схема натурной установки средства обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции представлена на рис. 8.

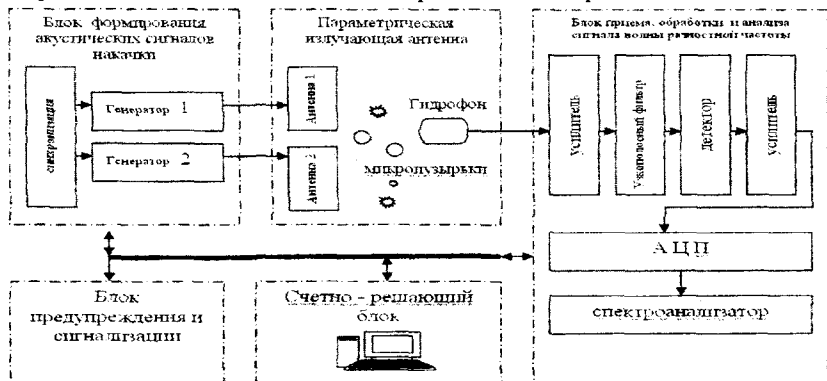


Рис. 8. Структурная схема натурной установки средства обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции

Предложено разделение системы контроля жидкой изоляции, представленное на рис. 9 на два блока: блока осуществляющего управление и обработку сигналов и блока антенн, что обеспечивает безопасность электротехнического персонала предприятий электрических сетей одновременно обеспечивая непрерывный контроль за состоянием жидкой изоляции действующего МВВЭО.

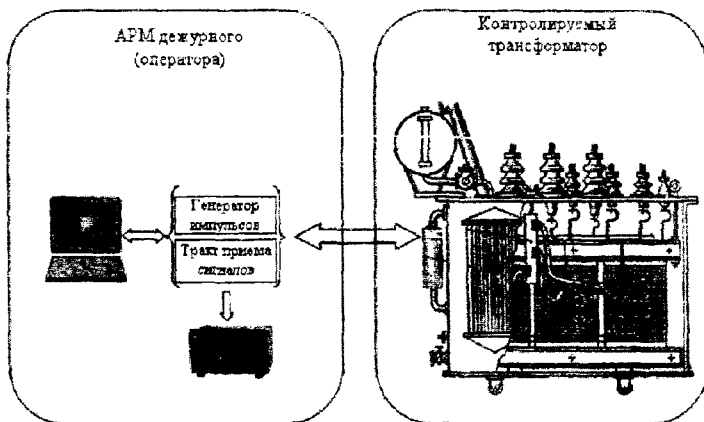


Рис. 9. Функциональная схема системы контроля технического состояния жидкой изоляции МВВЭО

Блок антенн предлагается разместить в радиаторных трубах силового трансформатора перед термосифонным фильтром, как показано на рис. 10.

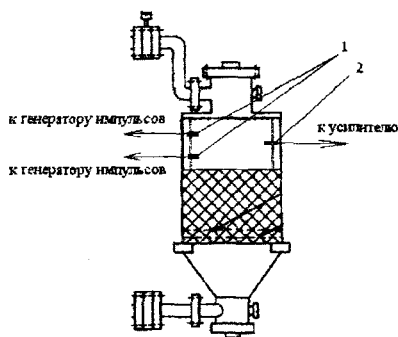


Рис.10. Размещение блока антенн в термосифонном фильтре

1 — ультразвуковые излучатели; 2 — гидрофон

Сопоставление расчётных и экспериментальных результатов амплитуды ВРЧ при наличии в жидкой изоляции микровключений радиусом 50 мкм представлены в табл. 2 и на рис. 11.

Разработана методика обнаружения газовых микровключений и контроля технического состояния жидкой изоляции, а также даны рекомендации по применению способа: 1) определяется температура жидкой изоляции; 2) вычисляется скорость звука в среде и нелинейный акустический параметр; 3) производится калибровка системы; 4) осуществляется накачка

акустическими сигналами близкой частоты; 5) приёмным трактом установки обнаруживаются и обрабатываются акустические сигналы; 6) на спектроанализаторе измеряются спектры шумов и сигналов; 7) в обоих спектрах выявляются дискретные составляющие, идентифицируются сигналы накачек; 8) детектируется сигнал и выделяется его амплитудная огибающая (ВРЧ); 9) измеряется спектр амплитудной огибающей сигналов; 10) в спектре ВРЧ выявляются дискретные составляющие сигналов; 11) осуществляется построение звукоряда из дискретных составляющих; 12) определяется дискретная составляющая сигнала ВРЧ и её амплитуда; 13) делается заключение о наличии или отсутствии микровключений в жидкой изоляции; 14) определяется размер газовых микровключений по уровню амплитуды ВРЧ, для чего применяется формула;

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot P_0}{\Omega^2 \cdot \rho} = \frac{\alpha_{\psi}^2 \left[3 \cdot \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot R_0^3} (\gamma + 1) \left(\frac{3 \cdot \gamma \cdot P_0}{\rho \cdot R_0^2} \right) - \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot R_0^3} (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_1 \cdot \omega_2) \right] \cdot (A_1 A_2)}{\sqrt{\left[\left(\frac{3 \cdot \gamma \cdot P_0}{\rho \cdot R_0^2} - \omega_1^2 \right)^2 + \omega_1^4 \cdot \delta^2 \right] \left[\left(\frac{3 \cdot \gamma \cdot P_0}{\rho \cdot R_0^2} - \omega_2^2 \right)^2 + \omega_2^4 \cdot \delta^2 \right] \left[\left(\frac{3 \cdot \gamma \cdot P_0}{\rho \cdot R_0^2} - \Omega^2 \right)^2 + \Omega^4 \cdot \delta^2 \right]}} \quad (13)$$

решение данного уравнения в программной среде Math Cad позволяет рассчитать размеры газовых микровключений жидкой изоляции и получить зависимость $R_0 = f(P_0, \omega_1, \omega_2)$ на основании информации о заданных частотах накачки и измеренного значения амплитуды ВРЧ возникающей в результате нелинейного акустического взаимодействия акустических колебаний в жидкой изоляции с газовыми микровключениями; 15) для обнаружения пузырьков других размеров, производится изменение частот сигналов накачки и повторение п.3-14; 16) графо-аналитическим методом определяется пробивное напряжение дефектной области жидкой изоляции с микровключениями на основании зависимостей представленных на рис.1; 17) сопоставляются расчетные значения пробивного напряжения с предельно допустимыми значениями, представленными в табл. 1; 18) делается заключение о техническом состоянии жидкой изоляции и возможности безопасной эксплуатации электрооборудования.

Таблица 2

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных об амплитуде ВРЧ

№ п/п	t, °С	Экспериментальные данные, 10^5Па	Расчетные данные, 10^5Па	Отклонение, 10^5Па	Отклонение, %
1	20	1,1	0,9	0,2	22
2	30	1,21	1,13	0,08	7
3	40	1,79	1,62	0,17	10
4	50	4,48	3,92	0,56	14
5	60	9,44	8,8	0,64	7
6	70	13,73	11,5	2,23	19

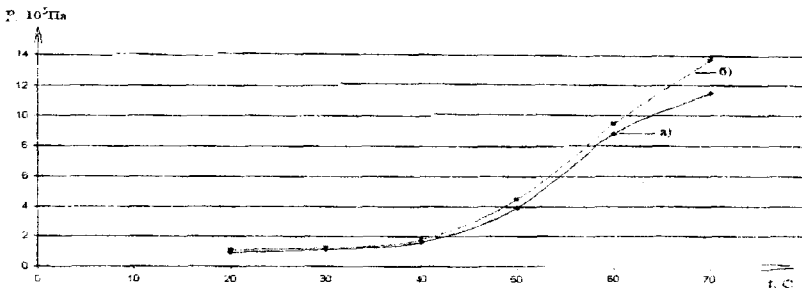


Рис. 11 Расчетная и экспериментальная зависимость амплитуды ВРЧ от температуры жидкого диэлектрика с микровключениями
 а) расчетная зависимость б) экспериментальная зависимость

Рекомендации относятся к контролю технического состояния маслонаполненного высоковольтного электрооборудования. Безаварийная работа электрооборудования в значительной степени зависит от своевременности решения задач контроля технического состояния МВВЭО, которые можно разбить на три этапа. На первом этапе осуществляется получение достоверных характеристик (наличие и размеры газовых микровключений) контролируемой подсистемы, в данном случае - трансформаторного масла. На втором этапе осуществляется анализ полученных данных и оценка технического состояния жидкой изоляции по структурно-чувствительным акустическим характеристикам (эффективный нелинейный акустический параметр) изоляции. На третьем осуществляется принятие решений в процессе производственной эксплуатации. В случае обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции и отнесения их размеров к опасным, возникает необходимость комплексного контроля технического состояния силового трансформатора с целью определения дефекта и степени его развития, до момента технологического нарушения в работе электрооборудования.

Таким образом, создание трех ступенчатой автоматизированной системы контроля основанной на нелинейном параметрическом взаимодействии колебаний позволит осуществлять контроль технического состояния электрооборудования в работе и предотвратить развитие дефекта в силовом трансформаторе а разработанный способ контроля технического состояния жидкой изоляции действующего МВВЭО позволит обеспечить его эффективную и безопасную и эксплуатацию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по контролю технического состояния жидкой изоляции МВВЭО для обеспечения его эффективной и безопасной эксплуатации путём обнаружения в ней газовых микровключений, и определения напряжения пробоя этой дефектной области жидкой изоляции на основании размеров газовых микровключений. Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты:

1. При анализе функционирования высоковольтных компонентов энергосистем уральского региона и работоспособности маслonaполненного высоковольтного электрооборудования установлено, что 18,83% технологических нарушений в системах электроснабжения связано с откатами МВВЭО, значительная часть которых - 30 % связана с ухудшением свойств жидкой изоляции.

2. Имитационное моделирование теплового процесса кавитации и установление закономерностей развития микровключений в жидкой изоляции позволили определить средний радиус микровключений 214 мкм и их закон распределения по размерам с максимальной концентрацией пузырьков радиусом 165 мкм.

3. Установлен критерий безопасного состояния жидкой изоляции с газовыми микровключениями для категорий высоковольтного маслonaполненного электрооборудования: среднего напряжения (6-35 кВ) – предельно допустимый радиус газовых микровключений – 20-29 мкм, высокого напряжения (60-500 кВ) предельно допустимый радиус газовых микровключений – 6-9 мкм и сверхвысокого напряжения предельно допустимый радиус газовых микровключений – 5 мкм.

4. Исследована волновая модель жидкой изоляции с микровключениями и структурно-чувствительным параметром. Установлены значения эффективного нелинейного акустического параметра в пределах от 8 до 25, для рабочего диапазона температур МВВЭО от 20⁰С до 70⁰С, при объемном газосодержании 10⁻⁴...10⁻³.

5. Определены структура устройства контроля состояния жидкой изоляции и характеристики частотного диапазона работы от 30 до 400 кГц, соответствующие размерам микровключений.

6. Разработана методика обнаружения газовых микровключений в жидкой изоляции и контроля технического состояния жидкой изоляции действующего МВВЭО. Даны рекомендации по применению способа в энергосистеме.

7. Результаты исследований переданы в филиал ООО «Газпром Транс Газ Югорск», ОАО «Златоустовский металлургический завод», ООО «Сетевая компания Златмащ», ООО «Областная электросетевая компания» г. Челябинск для возможности контроля технического состояния маслonaполненного высоковольтного электрооборудования и используются в учебном процессе филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте по специальности 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» и при обучении студентов электротехнических специальностей в дисциплине «Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий».

Основные научные положения и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1 Лукьянов, М.М Новые методы диагностики маслonaполненного оборудования / Лукьянов М.М., Харисов Э.А., Святых А.Б., Огурцов И. В // Вестник № 11 ЮУрГУ. Серия энергетика. Вып. 3. 2003. С-90 – 98

2. Лукьянов, М.М. Новые диагностические технологии на службе безопасности и надежности энергетического оборудования / Лукьянов М.М., Харисов Э.А., Святых А.Б., Огурцов И.В. // Теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность», № 4. 2001. С. 20-35
3. Лукьянов, М.М. Анализ повреждаемости и классификации дефектов высоковольтного маслонаполненного электрооборудования / М.М. Лукьянов, В.Б.Иванченко, А.В.Коношенко, А.Б.Святых //Теоретический научно-практический журнал «Электробезопасность».–2006.–№3-4.–С.24–38.
4. Лукьянов, М.М. О выборе математической модели способа диагностирования маслонаполненного оборудования на основе нелинейного параметрического взаимодействия колебаний / 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.
5. Лукьянов, М.М. К вопросу о диагностировании высоковольтного оборудования / 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.
6. Лукьянов, М. М. К вопросу об образовании газовых включений в масляной изоляции / 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.
7. Лукьянов, М.М. Развитие способов диагностики высоковольтного оборудования / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, 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.
8. Лукьянов, М.М. К вопросу об образовании газовых пузырьков в главной изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко, В.Б. Иванченко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2007. – № 1. – С. 16–23.
9. Лукьянов, М.М. Влияние газовых микровключений на состояние жидкой изоляции маслонаполненного электрооборудования / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2007. – № 2-3. – С. 50–61.
10. Лукьянов, М.М. К вопросу о диагностировании высоковольтного оборудования / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика» по тематике «Электроснабжение промышленных предприятий». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007.
11. Лукьянов, М.М. К вопросу об образовании газовых включений в масляной изоляции / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко //«Электроснабжение промышленных предприятий»: Материалы XXIX сессии

12. Лукьянов, М.М. О выборе математической модели способом диагностирования маслonaполненного оборудования на основе нелинейного параметрического взаимодействия колебаний [Текст] / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, В.Б. Иванченко, А.В. Коношенко // «Электроснабжение промышленных предприятий»: Материалы XXIX сессии Всероссийского семинара Академии наук РФ «Кибернетика». – Новочеркасск: Издательство ЮРГТУ. – 2007.

13. Лукьянов, М.М. Экспериментальные исследования акустических свойств жидкого диэлектрика высоковольтного оборудования / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Наука – производство – технологии – экология: Всерос. науч.-техн. конф.: сб. материалов. – Киров: Издательство ВятГУ, 2008. – Т.3 – С. 119–121.

14. Лукьянов, М.М. Математическое моделирование обнаружения газовых включений в жидкой изоляции / 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.

15. Лукьянов, М.М. Кавитационный механизм износа жидкой изоляции маслonaполненного высоковольтного электрооборудования и метод его диагностирования / М. М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Наука – производство – технологии – экология: Всерос. науч. - техн. конф.: сб. материалов. – Киров: Издательство ВятГУ, 2008. – Т.3 – С. 119–121.

16. Лукьянов, М.М. Методика определения нелинейного акустического параметра трансформаторного масла / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых, А.В. Коношенко // Энергетика в современном мире: VI Всероссийская науч.-практич. конф.: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. – Ч. I. – С. 158–161.

17. Лукьянов, М.М. Методика обнаружения газовых включений дефектной области масляной изоляции / М.М. Лукьянов, А.Б. Святых А.В. Коношенко // Энергетика в современном мире: VI Всероссийская науч.-практич. конф.: сб. материалов. – Чита: ЧитГУ, 2009. – Ч. I. – С. 135–142.

18. Лукьянов, М.М. Метод обнаружения опасного состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного электрооборудования / 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.

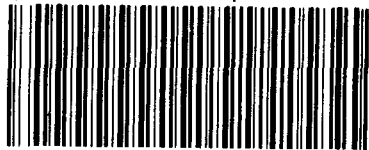
19. Святых, А.Б. Анализ повреждаемости маслonaполненного оборудования / А.Б. Святых // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.1. – С. 267–270

20. Святых, А.Б. Обнаружение дефектной области жидкой изоляции с газовыми включениями / 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. 270–275

21. Святых, А.Б. Численное моделирование обнаружения микровключений в жидкой изоляции при изменении температуры её эксплуатации / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов // Материалы XLIX-й международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Часть 3. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2010, стр.142-145
22. Святых, А.Б. Численное моделирование обнаружения дефектной области жидкой изоляции с газовыми включениями / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – 2009. – № 1. – С. 3–9.
23. Святых, А.Б. Экспериментальное исследование механизма тепловой кавитации жидкой изоляции и распределения микровключений по размерам / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – Челябинск: ЮУрГУ, ТОО «Алла». – 2009. – № 4. – С. 16 – 21
24. Святых, А.Б. Численное моделирование способа обнаружения газовых включений в жидкой изоляции при различной температуре эксплуатации электрооборудования / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов // Наука ЮУрГУ: материалы 62 научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010.-Т3, стр. 239-243
25. Святых, А.Б. Маслонаполненное высоковольтное оборудование как источник повышенной опасности / А.Б. Святых, И.Б. Морозов, В.И. Павлов // Материалы 10-ой международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2010. – С.82–86
26. Святых, А.Б. Экспериментальное исследование механизма тепловой кавитации жидкой изоляции и распределения микровключений по размерам / А.Б. Святых // ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2010 XI Всероссийская научно-практическая конференция (международным участием) / Под общ. Ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Магюниной. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010 - С. 95-97
27. Святых, А.Б. Физическая модель установки контроля микровключений в жидкой изоляции и предупреждения об ее опасном состоянии [текст] / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов, А.В. Коношенко // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – Челябинск: ЮУрГУ, ТОО «Алла». – 2010. – № 1. – С. 16 – 21
28. Святых, А.Б. Закономерности в распределении газовых микровключений в жидкой изоляции при тепловом механизме кавитации [текст] / А.Б. Святых // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – Челябинск: ЮУрГУ, ТОО «Алла». – 2011. – № 1. – С. 3 – 12.
29. Святых, А.Б. Экспериментальное определение размеров газовых включений в жидкой изоляции / А.Б. Святых, М.М. Лукьянов // Наука ЮУрГУ: материалы 63 научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011.-Т3, стр. (принято к печати).
30. Святых, А.Б. Развитие газовых включений в жидкой изоляции и распределение их по размерам / А.Б. Святых // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». – Челябинск: ЮУрГУ, ТОО «Алла». – 2011. – № 1. – С. 3 – 12.

Подписано в печать 3.10.15. Зак. 15
Полиграфический центр МЭИ(ТУ)
Красноказарменная ул., д.13

Научная библиотека ЮУрГУ г. Челябинск



1000001

0906320