

На правах рукописи

ПУЛИКОВ Петр Георгиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ
НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ВЫСШИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Научный руководитель - кандидат технических наук,
Монастырский Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Андреев Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Голенко Олег Викторович

Ведущая организация: ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Северо-Запада».

Защита состоится «__» _____ 2012 г. в __ час. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электроэнергетическое оборудование средних и высших классов напряжения является одним из наиболее дорогостоящих и ответственных видов оборудования, применяемого на этапе производства, распределения и потребления электроэнергии. В последние годы появился ряд новых проблем, главной из которых является существенное старение парка эксплуатируемого оборудования. Действительно, ещё в начале 2000-х в сетях МРСК ФСК около 60% трансформаторов класса напряжения 110 кВ и выше уже отработали свой нормативный ресурс в 25 – 30 лет, но при этом большая их часть имела удовлетворительное состояние твердой изоляции (основной фактор, определяющий реальный срок службы трансформатора). Поэтому замена таких трансформаторов представляется нецелесообразной.

Также известно, что количество трансформаторов, "доживающих" до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции (естественный износый отказ), составляет по разным источникам от 7 до 20%. Это доказывает неэффективность нормативной системы периодического контроля и ставит задачу раннего выявления появляющихся дефектов, что позволит не только избежать аварий, но и существенно продлить срок эксплуатации оборудования сверх нормативных значений. Решение этой задачи с проведением комплексных обследований, при условии применения современных методов диагностики, позволяет определить состояние обследуемого оборудования с надёжностью, достигающей 98%. Однако, такие обследования не могут проводиться часто из-за их высокой стоимости. В связи с этим особую актуальность приобретает задача **широкого** внедрения недорогих систем **непрерывного** контроля состояния трансформаторного оборудования. Это продиктовано, тем обстоятельством, что для трансформаторов, отработавших свой нормативный (но не физический) ресурс число быстро развивающихся и внезапных отказов доходит до 60%. Развитие дефектов, приводящих к таким отказам невозможно контролировать нормативными периодическими измерениями.

Системы непрерывного контроля активно развиваются для всех основных видов электрооборудования, и в особенности для трансформаторов, в течение последних 20 лет как у нас в стране, так и за рубежом. Однако широкому внедрению подобных систем мешает их большая стоимость – 300-800 тыс. евро. Кроме того, ни в одной из систем для трансформаторов нет полного контроля изоляции, экономические убытки, от отказов которой доходят до 98%. Для выявления проблем, развивающихся в изоляции трансформаторов, достаточно контролировать всего три параметра: растворенные в масле газы, электрическую прочность масла ($U_{пр}$) и характеристики частичных разрядов (ЧР).

Разработка и внедрение систем непрерывного контроля позволит решить две насущные проблемы энергетики – продление срока эксплуатации и обслуживание по реальному состоянию трансформатора, а также ряд других проблем.

Объектом исследования в данной работе является изоляция силовых трансформаторов высших классов напряжения. **Предметом исследования** – методы непрерывного контроля силовых трансформаторов высших классов напряжения.

Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов в трансформаторном оборудовании является анализ растворенных в масле газов. Измерение концентрации водорода и углеводородных газов (метан, этан, этилен, ацетилен) позволяет выявлять дефекты, появляющиеся и развивающиеся в трансформаторах. Этот метод сейчас эффективно применяется для выявления дефектов в трансформаторном оборудовании, однако основная измерительная методика – газовая хроматография – достаточно дорогая и трудно реализуема в системах непрерывного контроля. Для непрерывного контроля могут использоваться датчики растворенных в масле газов. На сегодняшний день уже есть разработанные газовые датчики зарубежных фирм – *General Electric*, *Morgan Schaffer* и *MTE*, однако их высокая стоимость не позволяет применять их в системах непрерывного контроля состояния трансформаторов, предназначенных для широкого внедрения.

Напрямую прочность масла контролировать достаточно сложно, поэтому ее можно контролировать по косвенным характеристикам – состоянию влаги в масле и механическим примесям. Прочность масла существенно снижается при появлении эмульгированной влаги в масле. Из литературы известно, что при влажности твердой изоляции в пределах 2% появление эмульгированной влаги в масле в диапазоне эксплуатационных температур практически исключено, а до 4% маловероятно. Поэтому оценить вероятность появления эмульгированной влаги и, как следствие, снижение электрической прочности масла можно путем контроля влажности твердой изоляции W_t . Помимо влаги на электрическую прочность масла сильное влияние оказывают механические примеси в масле, которые можно контролировать в непрерывном режиме. Однако разработанных датчиков механических примесей для применения их в системах непрерывного контроля нет.

Вышеизложенное формирует **цель работы**: разработка элементов систем непрерывного контроля состояния изоляции трансформаторов высших классов напряжения, таких как датчик растворенных в масле газов, датчик влажности твердой изоляции и датчик механических примесей, предназначенных для **широкого** внедрения на трансформаторы мощностью от 25 000 кВА. Так как стоимость таких систем не должна превышать 1-3% от стоимости оборудования, состояние которого оно контролирует, то стоимость разрабатываемой системы в целом должна лежать в пределах 300-800 тыс. руб. Стоимость газового датчика не должна превышать 100 тыс. руб.

Достижение поставленной цели связывается в данной диссертационной работе с **решением следующих задач**:

- оценка эффективности традиционных методов контроля технического состояния силовых трансформаторов, обзор дефектов, возникающих в силовых

трансформаторах высших классов напряжения, определение наиболее опасных из них;

- обзор эффективных методов ранней диагностики, применимых в системах непрерывного контроля;

- исследование методов выделения газов из масла и измерения их концентрации с помощью газовых сенсоров;

- исследование процессов миграции влаги в системе масло-твердая изоляция, определение зависимостей физических величин от влагосодержания, позволяющих определять влажность твердой изоляции, разработка методов определения влагосодержания твердой изоляции;

- исследование процессов светорассеяния и светопоглощения на механических примесях в масле и разработка методики измерения их концентрации;

- оценка эффективности применения разработанных компонентов в системах непрерывного мониторинга силовых трансформаторов.

При решении поставленных задач использовались следующие **методы научного исследования**: анализ статистических данных по отказам трансформаторов, создание испытательных стендов для исследования контролируемых процессов, создание опытных образцов датчиков и их апробация в реальных условиях; компьютерное моделирование.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, и **основные положения, выносимые на защиту**:

1. Исследованы методы выделения газов из масла, которые могут использоваться в системах непрерывного контроля, и выбраны наиболее эффективные из них.

2. Исследованы процессы диффузии газов через полимерные мембраны, получены значения коэффициентов диффузии и постоянных времени диффузии газов из масла в газовую полость через различные полимерные материалы и выбраны наиболее перспективные из них.

3. Исследованы изменения диэлектрических характеристик пропитанных маслом образцов различных целлюлозных материалов в зависимости от влажности, температуры, частоты приложенного напряжения, выведены уравнения для этих зависимостей, показано, что для определения влажности наиболее удобным параметром является диэлектрическая проницаемость, поскольку она в наибольшей степени зависит от влажности и слабо зависит от остальных факторов.

4. Исследованы механизмы температурной миграции влаги в системе масло-целлюлоза для разных образцов целлюлозных материалов, определены скорости диффузии влаги для различных материалов и выбраны наиболее удобные для использования в датчиках влажности твердой изоляции.

5. Исследованы процессы светорассеяния на механических примесях в потоке масла, получены зависимости изменения светового потока на фотоприемнике от размеров примесей, на основании которых получено значение передаточного коэффициента.

Прикладная ценность полученных результатов.

На основании проведенных исследований разработаны датчики растворенных в масле диагностических газов, влажности твердой изоляции и механических примесей, которые в составе комплексов непрерывного контроля состояния трансформаторного оборудования установлены в промышленную эксплуатацию на реальных энергетических объектах.

Реализация результатов.

Разработанные датчики растворенных в масле диагностических газов, влажности твердой изоляции и механических примесей используются в составе комплексов непрерывного контроля состояния трансформаторного оборудования, конструктивно объединенных в единый блок – блок встроенных датчиков (БВД). БВД в составе комплексов установлены на следующих энергетических объектах:

- Сургутская ГРЭС-2, на двух трансформатора ТНЦ-1000000/500;
- г. Казань, п/ст «Киндери», ТатЭнерго на трех однофазных трансформаторах АОДЦТН-167000/500/220;
- г. Великий Новгород, п/ст Районная 110/6кВ, МРСК «Северозапада», на трансформаторе ТДН-40000/110;
- п/ст «Соломбальская», АрхЭнерго, на двух трансформаторах ТДТН-40000/110У1;
- ЦРП7, Лукойл, Волгограднефтепереработка, на двух трансформаторах ТРДНФ-25000/40000/110У5;
- п/ст Кудрово, Ленэнерго, на двух трансформаторах ТРДН-63000/110У1;
- Нижнекамская ГЭС, на четырех блочных трансформаторах ТЦ-400000/500.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Пятой Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010» (Санкт-Петербург, 2010); на постоянно действующем семинаре ПЭИПК "Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования" по теме Современные проблемы производства, эксплуатации и ремонта трансформаторного оборудования 2006г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано пять работ, из них три работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа выполнена на 148 страницах основного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, 80 рисунков, 26 таблиц, списка использованных источников, который содержит 94 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет, цель, задачи и методы исследования, раскрыты

научная новизна и практическая ценность результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, дан краткий обзор диссертации по главам.

В первой главе произведен обзор дефектов, возникающих в основных элементах конструкции трансформаторов (обмотках, изоляции, магнитопроводе, устройствах РПН, системе охлаждения, высоковольтных вводах и др). Описаны и оценены нормативные методы диагностики состояния изоляции трансформаторов. Произведен выбор эффективных методов ранней диагностики, которые могут быть применены в системах непрерывного контроля состояния трансформаторов. Дан краткий обзор существующих систем непрерывного контроля состояния трансформаторов, зарубежных фирм *Alstom (MS3000)*, *Siemens (SITRAM)*, Стерлинг Групп Украина и отечественных фирм Димрус (ТДМ), АСУ-ВЭИ (СУМТО). Сделан вывод о том, что ни одна из существующих систем не охватывает всего комплекса необходимых параметров для выявления любого вида дефекта, появляющегося или развивающегося в изоляции трансформатора. Произведен обзор разработанных газовых датчиков, таких фирм как *General Electric*, *Morgan Schaffer* и *MTE*. Сделан вывод о невозможности их широкого внедрения ввиду их высокой стоимости. Сформулирована цель работы.

Вторая глава посвящена разработке датчика газов, растворенных в масле. Для этого были решены следующие задачи:

1. Определен необходимый и достаточный состав газов, которые надо контролировать для выявления любых типов дефектов, зарождающихся в трансформаторе: нарастание в масле водорода, суммы углеводородных газов и оксида углерода.

2. Выбран способ выделения данных газов из масла. Сравниваются два основных принципа газовыделения – через полупроницаемую полимерную мембрану и выделение газа из тонкого слоя масла. Датчики с использованием полупроницаемой полимерной мембраны имеют сравнительно большое время установления равновесного газосодержания (50-80 часов), зато они просты по конструкции, имеют меньшую стоимость и более высокую эксплуатационную надежность. Датчик с выделением газа из тонкого слоя масла имеет более сложную конструкцию, масляный насос с движущимися частями, что обуславливает снижение эксплуатационной надежности, зато обеспечивает очень малое время установления равновесного газосодержания (1 час).

3. Выбраны типы газовых сенсоров, способных количественно определять концентрацию определенных газов в газовой смеси. Для измерения малых концентраций водорода, углеводородных газов и оксида углерода в газовой полости лучше всего подходят два основных типа сенсоров: электрохимические и полупроводниковые. Рассмотрены принципы работы этих сенсоров. Показано, что в полупроводниковых газовых сенсорах от концентрации измеряемого газа изменяется его сопротивление, причем изменение линейно в логарифмических координатах. Полупроводниковые сенсоры чувствительны к любому из выбранных нами диагностических газов,

поэтому используется в качестве определения суммы газов. В качестве полупроводниковых газовых сенсоров для определения суммы газов использовались сенсоры типа *TGS813* и *SOK*. Электрохимические газовые сенсоры изменяют выходной сигнал пропорционально концентрации измеряемого газа и обладают достаточной селективностью. Для измерения концентрации водорода применялся датчик МН2-8, а для окиси углерода - МФС-81.

Проведена градуировка выбранных газовых сенсоров по водороду, результаты которой приведены в табл.1. Для электрохимических сенсоров градуировочная кривая строилась по формуле:

$$C_{H_2} = k_{элхим} * U,$$

где U – выходной сигнал сенсора, В;

$k_{элхим}$ – градуировочный коэффициент, ppm/В.

Для полупроводниковых сенсоров градуировочная кривая строилась по формуле:

$$C_{H_2} = \left(\frac{Rs}{A_g} \right)^{\frac{1}{b_g}},$$

где A_g, b_g – постоянные коэффициенты;

Rs – сопротивление сенсора.

Табл.1. Градуировочные коэффициенты для газовых сенсоров.

Электрохимические сенсоры		Полупроводниковые сенсоры		
Тип	$k_{элхим}, ppm/V$	Тип	$A_g, k\Omega$	b_g
МН2-8 №2	861	<i>TGS813</i> №1	466	0,394
МН2-8 №1	232	<i>TGS813</i> №2	570	0,415
МН2-8 №65	647	SOK №80	140	0,182
МН2-8 №67	1015	SOK №75	348	0,466
МН2-8 №63	853	SOK №90	2000	0,688
МН2-8 №68	559	SOK №76	340	0,328
МФС-81 №33	786			
МФС-81 №32	1010			
МФС-81 №9	1177			
МФС-81 №12	1892			
МФС-81 №13	2746			
МФС-81 №11	1155			

4. Разработаны две конструкции датчиков, основанных на двух типах газовой выделения - через полупроницаемую полимерную мембрану и выделение газа из тонкого слоя масла. Конструкция газового датчика, основанная на выделении растворенных газов через полупроницаемую мембрану, представлена в виде испытательной ячейки К-260, изображенной на рис.1 а), где 1 – масляная камера, 2 – газовая камера, 3 – штуцер для отбора пробы газа, 4 – полимерная мембрана, 5 – металлическая подложка. Конструкция газового датчика, основанная на выделении растворенных газов из тонкого слоя масла, представлена в виде испытательной ячейки КП-4, изображенной на рис.1 б), где 1 – поток масла; 2 – газовая камера; 3 – газовый датчик; 4 – поплавков, 5 – трансформаторное масло; 6 – масляный насос; 7- штуцер для отбора пробы газа.

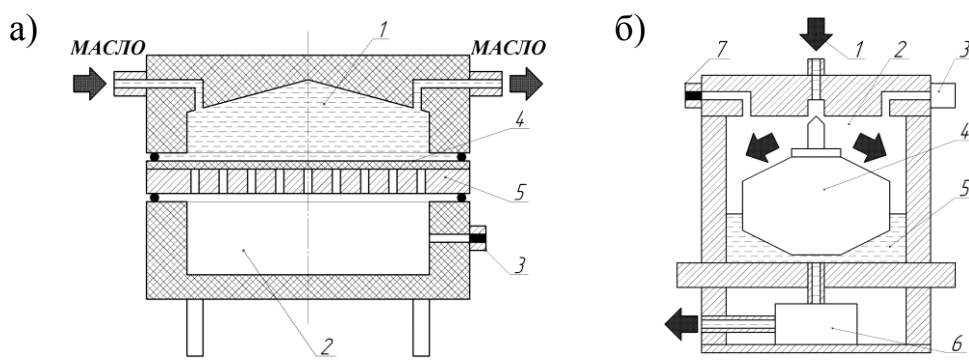


Рис.1. Схема испытательных ячеек: а) К-260, б) КП-4.

5. Проведено исследование диффузионных характеристик, как мембранного датчика, так датчика с выделением газа из тонкого слоя масла. Для исследования процессов диффузии был сконструирован специальный испытательный стенд с тремя ячейками К-260, показанный на рис.2.



Рис.2. Общий вид испытательного стенда (а) и ячейки К-260 (б).

Выбран материал полимерной мембраны по результатам скорости диффузии водорода через такие материалы как фторопласты, полипропилен, полистирол, полиэтилентерефталат (рис.3), где первая цифра – толщина пленки в мкм, вторая – площадь мембраны в см². Выбран материал с наибольшим коэффициентом диффузии – фторопласт.

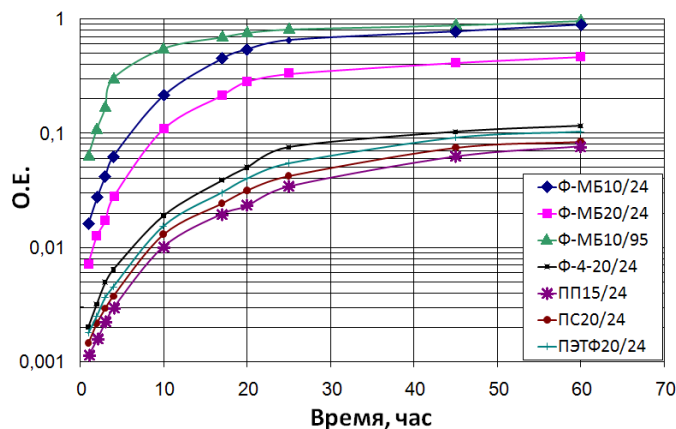


Рис.3. Зависимость скорости диффузии водорода от материала полупроницаемой мембраны в системе газ-газ.

Для выбранного материала был проведен эксперимент по определению коэффициента диффузии в рабочем диапазоне температур. Коэффициент диффузии рассчитывался по выведенной в диссертации формуле:

$$D = \frac{\left(c_{КП}(0) \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} - c_{К260}(0) \right) \cdot V_{К260} \cdot d_{mb}}{(c_{КП}(0) - c_{К260}(0)) \cdot S_{mb} \cdot \tau},$$

где $c_{K260}(0)$ – концентрация водорода в газовой камере ячейки К-260 в начальный момент времени [ppm];

$c_{КП}(0)$ – концентрация водорода в газовой камере ячейки подготовки КП-9 в начальный момент времени [ppm];

$S_{mb} = 0.0095 \text{ м}^2$ – площадь фторопластовой мембраны;

$d_{mb} = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – толщина фторопластовой мембраны;

$V_{K260} = 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – объем газовой камеры ячейки К-260;

τ – постоянная времени накопления водорода [с];

C_1 – эквивалентный газовый объем водорода до мембраны [мл];

C_2 – эквивалентный газовый объем водорода после мембраны [мл].

Результаты эксперимента и зависимость коэффициента диффузии приведены в табл.2 и на рис.4.

Табл.2. Результаты расчета коэффициентов диффузии.

$T_{\text{масла}}, ^\circ\text{C}$	Пост.врем. τ , час	Коэф. дифф. $D, 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$
30	81.1	2.08
50	45.2	3.73
60	34.6	4.87
70	22.5	7.48

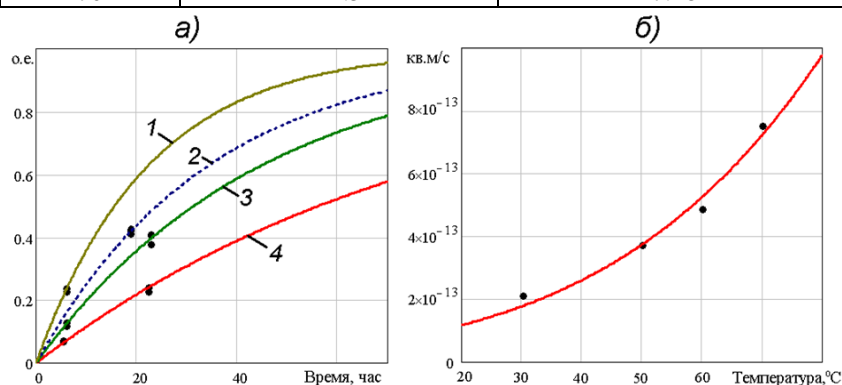


Рис.4. Зависимость концентрации водорода в К-260 от времени (а) при температуре масла: 1 – 70°C, 2 – 60°C, 3 – 50°C, 4 – 30°C и зависимость коэффициента диффузии от температуры масла (б).

В соответствии с активационной моделью процесса диффузии были вычислены предэкспоненциальный множитель $D_0 = 3.02 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и энергия активации $E = 30.3 \text{ кДж/моль}$ с использованием наименьших квадратов по формуле:

$$D = D_0 e^{-E/RT}.$$

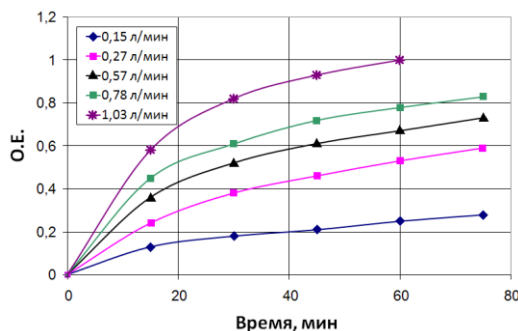


Рис.5. Зависимость скорости изменения концентрации газов в газовой полости от производительности насоса маслопленочного датчика.

Также были исследованы диффузионные свойства газового датчика на основе выделения газа из тонкого слоя масла (КП-4), результаты которого приведены на рис.5.

6. Модернизирован и отградуирован по водороду хроматограф Газохром-3101. Модернизация заключалась в расширении динамического диапазона измерений путем применения четырехканального усилителя сигнала в связке с низкоразрядным АЦП, а также реализация режима автоматического измерения и передачи данных на компьютер путем внедрения микроконтроллера и написания соответствующих микрокодов программ. Результаты градуировки на модернизированном хроматографе приведены на рис.6.

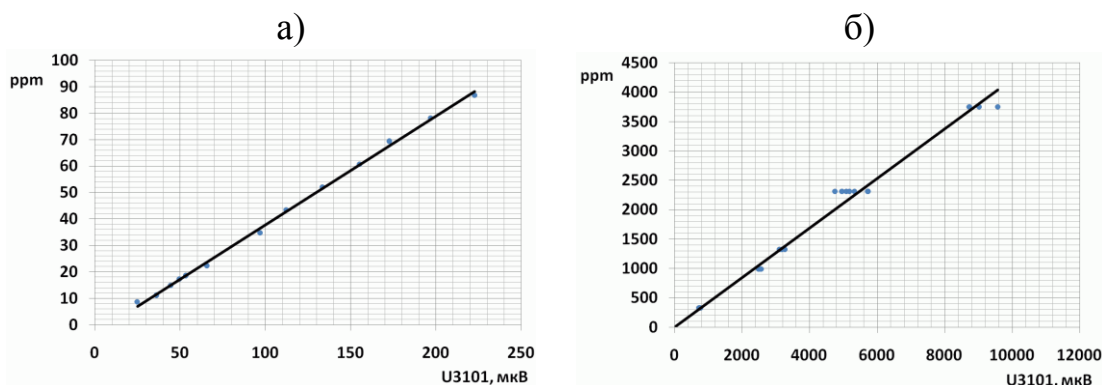


Рис.6. Градуировочная прямая хроматографа Газохром-3101 по водороду в диапазоне от 0 до 300 ppm а) и от 300 до 5000 ppm . Объем пробы – 2 мл; скорость газа-носителя - 30 мл/сек.

Третья глава посвящена разработке датчика влажности твердой изоляции. Для этого были решены следующие задачи:

1. Исследована зависимость электрофизических характеристик – удельного электрического сопротивления ρ_v , диэлектрической проницаемости ϵ и $\text{tg}\delta$ - пропитанного картона от его влагосодержания и температуры.

Зависимость удельного объемного сопротивления ρ_v электрокартона толщиной 0,5 мм от влагосодержания Wt и от температуры T приведена на рис.7.

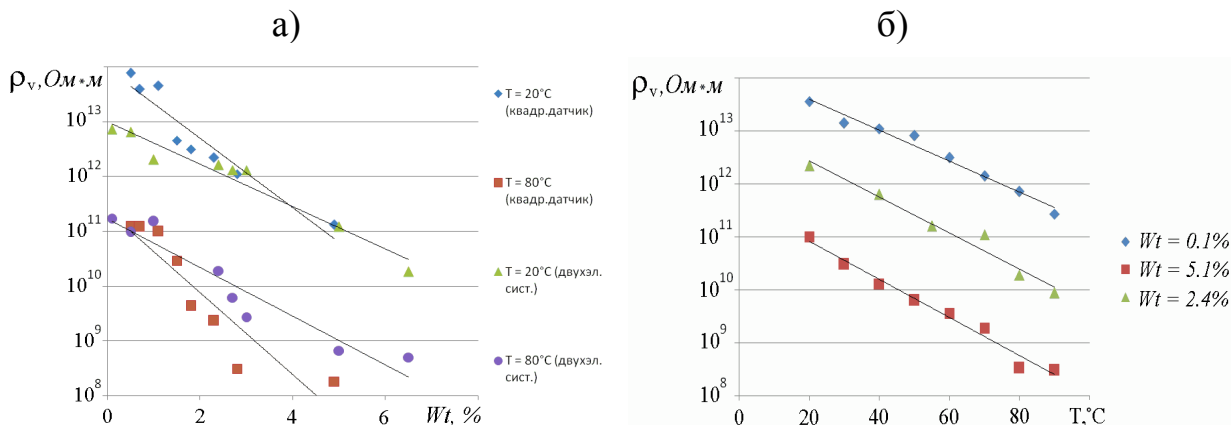


Рис.7. Зависимость удельного объемного сопротивления ρ_v электрокартона толщиной 0,5 мм: а) от влагосодержания Wt ; б) от температуры T .

Зависимость диэлектрических характеристик $tg\delta$ и ϵ от влагосодержания картона и температуры приведены на рис.8, рис.9.

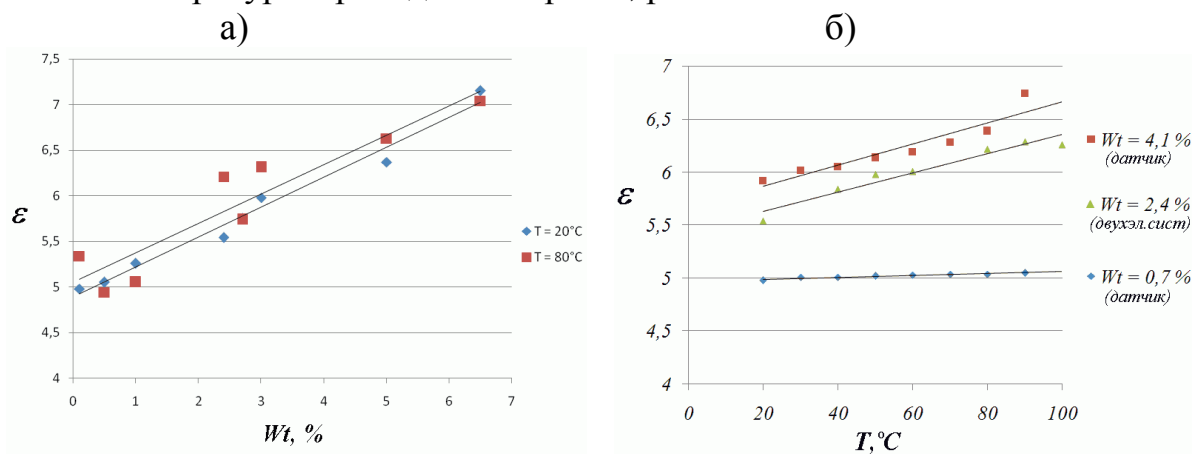


Рис.8. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ электрокартона толщиной 0,5 мм: а) от влагосодержания Wt ; б) от температуры T .

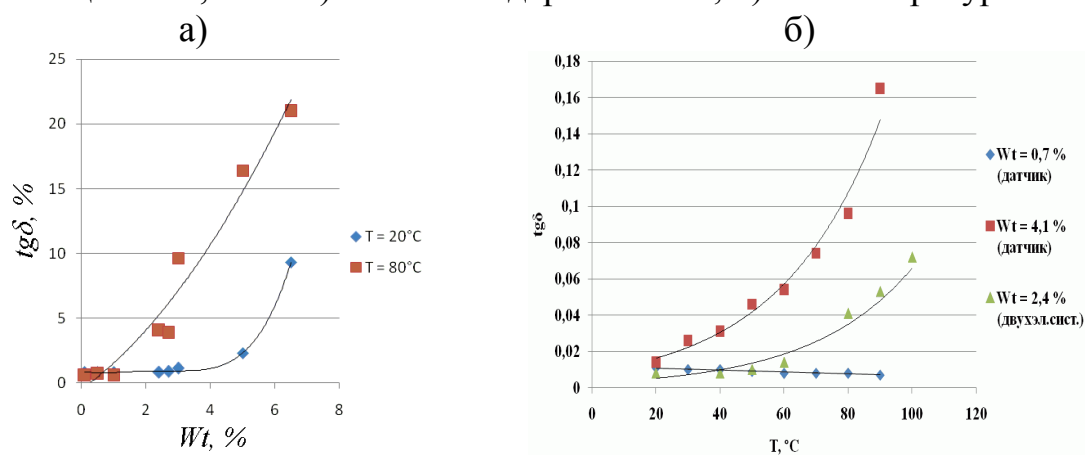


Рис.9. Зависимость $tg\delta$ электрокартона толщиной 0,5 мм: а) от влагосодержания Wt ; б) от температуры T .

Также получена зависимость ϵ и $tg\delta$ пропитанного электрокартона толщиной 0,5 мм от частоты f , приведенная на рис.10.

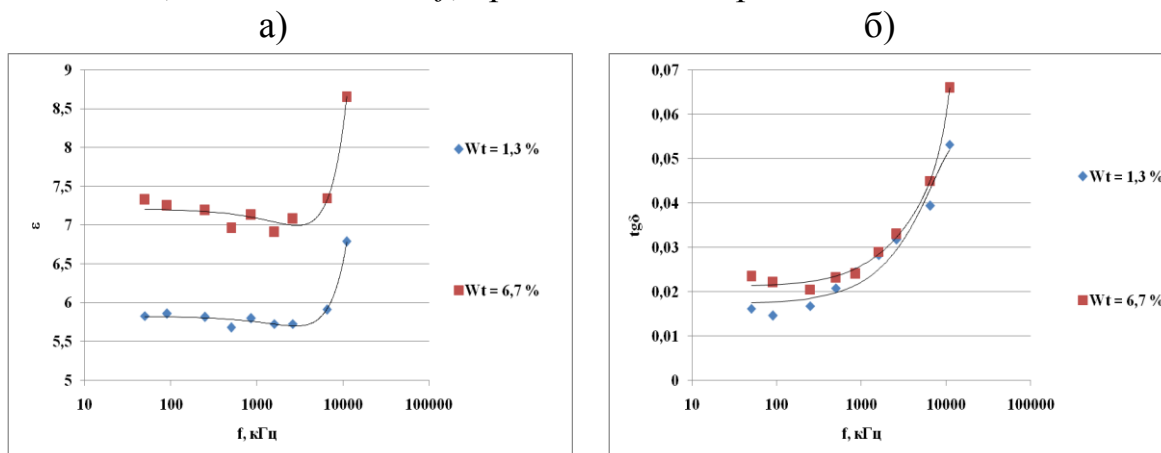


Рис.10. Зависимость а) ϵ и б) $tg\delta$ электрокартона толщиной 0,5 мм от частоты при различном влагосодержании Wt .

В основу реализации датчика влажности твердой изоляции положена зависимость диэлектрической проницаемости от влагосодержания целлюлозного материала по следующим соображениям:

- зависимость ϵ от влагосодержания Wt имеет линейный характер, что упрощает обработку получаемой информации;
- слабая температурная зависимость позволяет не вводить температурную поправку, что также упрощает обработку получаемых данных;
- простота схемотехнической реализации.

По методу наименьших квадратов составлена формула расчета диэлектрической проницаемости от влагосодержания картона:

$$\epsilon = 4,89 + 0,327Wt, \text{ при } T = 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\epsilon = 5,06 + 0,322Wt, \text{ при } T = 80 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. Разработана конструкция влагочувствительного элемента, представляющего собой многосекционный конденсатор. Эскиз влагочувствительного элемента приведен на рис.11, где 1 – верхняя щетка из текстолита; 2 – нижняя щетка из текстолита; 3 - стяжной болт из текстолита; 4 – электрокартон; 5 – электрод; 6 – шпилька М4; 7 – гайка М4.

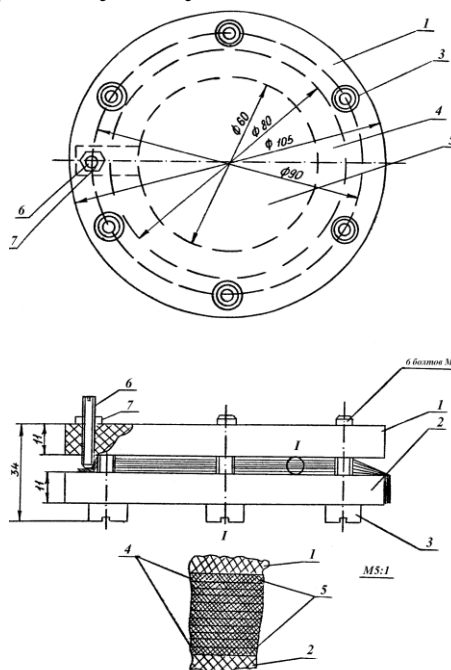


Рис.11. Конструкция влагочувствительного элемента.

3. Исследован процесс миграции влаги в системе целлюлоза-масло-целлюлоза на специально разработанном стенде, схема которого и общий вид приведен на рис.12.

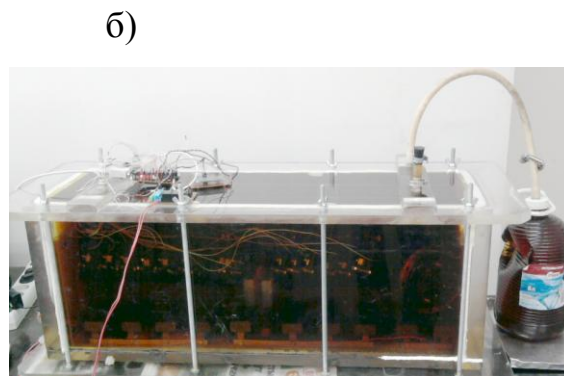
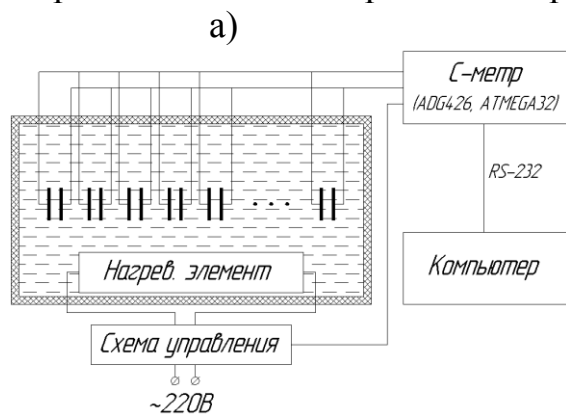


Рис.12. Схема и общий вид стенда для исследования миграции влаги.

Несколько влагочувствительных элементов, различающихся по своей конструкции помещались в герметичную емкость заполненную маслом. Затем в емкость погружался увлажненный картон, известного влагосодержания (5.8%) и включалась система термоциклирования от 35 до 65°С – этим обеспечивалась миграция влаги от погруженного картона к целлюлозным материалам влагочувствительных элементов, таким образом максимально приближаясь к

реальным условиям их работы. Изменения емкости фиксировались специально разработанным для этого цифровым с-метром и передавались на компьютер. Результаты для трех влагочувствительных элементов приведены на рис.13. Аппроксимируя полученные данные по формуле:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m + (\varepsilon_0 - \varepsilon_m) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где, ε_0 – начальная диэлектрическая проницаемость;

ε_m – конечная диэлектрическая проницаемость;

были рассчитаны начальные и конечные диэлектрические проницаемости, а также вычислено установившееся влагосодержание Wt_m при различных температурах (табл.3).

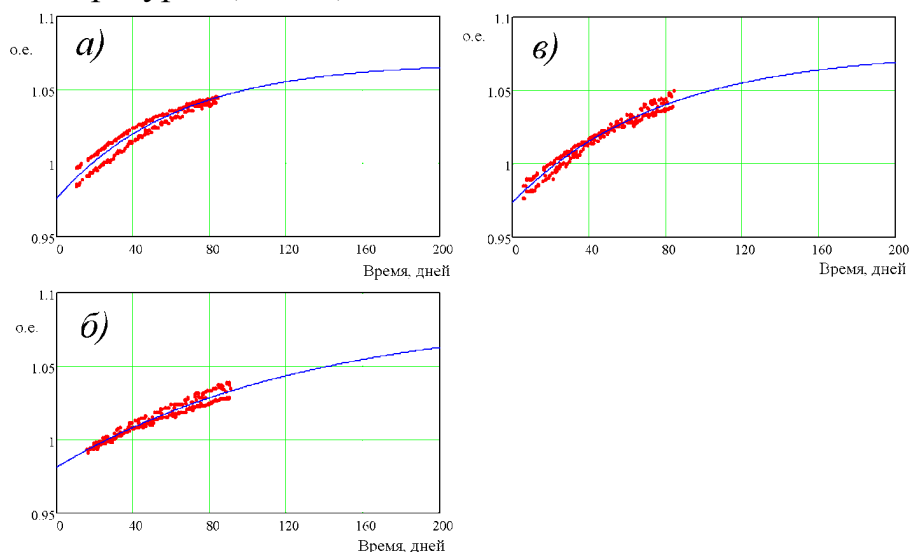


Рис.13. Относительное изменение диэлектрической проницаемости влагочувствительных элементов: а) OA10-0.1/67-2; б) OB1-0.3/67-3; в) OB2-0.2/67-3.

Табл.3. Результаты расчета параметров влагочувствительных элементов.

Тип влагочувств. элемента	ε_0	ε_m	τ , дней	Wt_m , %	
				35°C	35-65°C
OB2-0.2/67-3	3,17	3,51	79	3,2	5,6
OA10-0.1/67-2	2,95	3,21	62	5,3	6,5
OB1-0.3/67-3	3,73	4,16	136	1,8	2,8

По итогам проведенного эксперимента сделан вывод о работоспособности разработанного датчика влажности твердой изоляции.

Четвертая глава посвящена разработке датчика механических примесей. Для этого были решены следующие задачи:

1. Определен принцип работы датчика. В основу работы датчика механических примесей положен фотометрический метод дифференцированного подсчета частиц определенных размерных групп (рис.14 (а), где 1 – источник света; 2 – световой поток; 3 – прозрачный капилляр; 4 - фотодетектор; 5 – масляный насос; 6 – трансформаторное масло).

2. Разработана конструкция датчика механических примесей и испытательный стенд (рис.14 (б)).

3. Разработана электронная схема подсчета механических примесей по размерным группам с применением микроконтроллерной техники.



Рис.14. Принцип работы датчика механических примесей – а), и испытательный стенд – б).

4. Произведена градуировка изготовленного датчика путем снятия на одном и том же масле сначала прибором ФС-112 зависимость $N_T(d)$ – распределение механических примесей по размерным группам, а затем датчиком зависимость $N_T(u)$ – распределение механических примесей по амплитудам импульсов и дальнейшим вычислением градуировочного коэффициента по формуле:

$$k_d = \frac{d(N_T)}{u(N_T)} = \frac{A_d}{A_u} \cdot (N_T)^{b_u - b_d} \approx \frac{A_d}{A_u} = \frac{42}{2,06} = 20 \frac{\text{мкм}}{\text{В}},$$

где A_d – расчетный максимальный размер частицы [мкм];

A_u – расчетная амплитуда от самой большой частицы [В].

Полученные зависимости $N_T(d)$ и $N_T(u)$ приведены на рис.15.

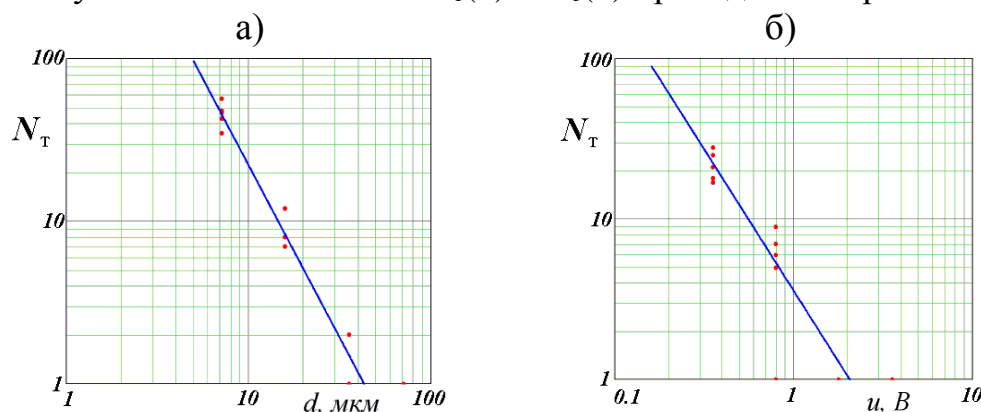


Рис.15. Распределение механических примесей а) по размерным группам б) по амплитудам импульсов с датчика механических примесей.

5. Произведен эксперимент по проверке еще восьми изготовленных датчиков механических примесей, с использованием полученного градуировочного коэффициента на двух приготовленных маслах – одно с максимальным размером частиц 50 мкм, другое - 100 мкм. В первом случае масло было пропущено через сетку с размером ячейки 50 мкм, а во втором – 100 мкм. Через каждый датчик было пропущено по 100 мл масла. Результаты эксперимента приведены на рис.16.

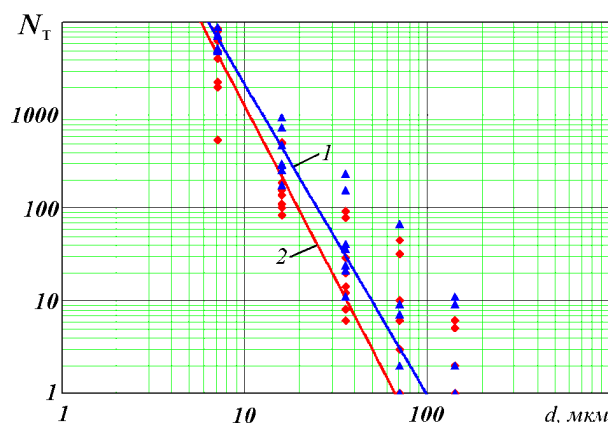


Рис.16. Распределение содержания механических примесей для масла: 1 – 100 мкм; 2 – 50 мкм.

Полученные расчетные значения максимального размера частиц для 100 мкм масла - $A_{d50} = 66,5$ мкм, а для 50 мкм масла - $A_{d100} = 98,1$ мкм. Из полученных данных был сделан вывод об успешной разработке датчика механических примесей.

Пятая глава посвящена апробации разработанных датчиков и их внедрению на действующие трансформаторы российских энергосистем.

Три разработанных датчика – датчик растворенных в масле газов, датчик влажности твердой изоляции и датчик механических примесей были объединены в один конструктивный узел, подключаемый к трансформатору системой труб, по которой циркулирует масло. Данный узел получил название блока встроенных датчиков или сокращенно «БВД», который встраивался в систему непрерывного контроля состояния трансформаторов – СКИТ.

Накоплены данные по работе каждого из трех разработанных датчиков на Сургутской ГРЭС-2, п/ст «Киндери» г. Казань, п/ст Районная 110/6кВ г. Великий Новгород и п/ст «Соломбальская» г. Архангельск. Кроме того датчики установлены еще в ЦРП7, Лукойл, г. Волгоград и на п/ст Кудрово, г. Санкт-Петербург.

В результате проведенной работы по внедрению разработанных датчиков растворенных в масле газов, датчика влажности твердой изоляции и датчика механических примесей и хорошей корреляции результатов их измерений с результатами планово-периодических контрольных измерений, показанных на примере БВД, установленного на Сургутской ГРЭС-2, можно сделать вывод об успешной апробации разработанных датчиков и об эффективности их применения в составе мониторинговых комплексов.

Опытно-промышленная эксплуатация БВД показала надежную его работу. Помех по измерительным цепям оборудования не зафиксировано. БВД дает устойчивые значения параметров трансформатора.

Результаты опытно-промышленной эксплуатации позволяют рекомендовать принятие БВД в промышленную эксплуатацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальное продление реального срока службы и организация безаварийной работы силовых трансформаторов высших классов напряжения – важнейшие задачи современной энергетики. Эффективное выполнение данных задач невозможно без непрерывного мониторинга их состояния.

На сегодняшний день применение систем непрерывного мониторинга является, пожалуй, единственно правильным подходом к обслуживанию трансформаторного парка оборудования, который позволит своевременно выявить дефект в оборудовании, предотвратить его аварийный отказ, принять обоснованное решение о целесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Выполненные в данной диссертационной работе исследования обеспечили решение комплекса научно-технических проблем по разработке и внедрению методов непрерывного контроля электрической прочности масла трансформаторов высших классов напряжения.

Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1) На основании анализа статистики отказов показана необходимость применения систем непрерывного контроля состояния стареющего трансформаторного оборудования.

2) Определены эффективные методы ранней диагностики, применимые в системах непрерывного мониторинга.

3) В рамках разработки и внедрения датчика растворенных в масле газов были получены следующие результаты:

- разработаны испытательный стенд и испытательные ячейки КП-9, КП-4 и К-260 и методика определения коэффициента диффузии полимерной мембраны;

- модернизирован хроматограф Газохром-3101 с применением современной элементной базы, существенным расширением динамического диапазона измерений, с возможностью автоматического определения концентраций входящих в пробу газов и передачу их в компьютер;

- исследованы диффузионные характеристики полимерных мембран по водороду в системе газ-газ, выбран материал - фторопласт с наибольшим коэффициентом диффузии;

- для выбранного материала построена зависимость коэффициента диффузии по водороду в диапазоне эксплуатационных температур. Вычислены предэкспоненциальный множитель $D_0 = 3.02 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и энергия активации диффузии $E = 30.3 \text{ кДж/моль}$;

- исследованы диффузионные характеристики газового датчика, основанного на выделения газа из тонкой пленки масла. Достигнуто время установления равновесного газосодержания в 1 час;

- исследованы характеристики газовых сенсоров: электрохимических и полупроводниковых.

- разработана конструкция газовых датчиков.

4) В рамках разработки и внедрения датчика влажности твердой изоляции были получены следующие результаты:

- исследовано влияние влагосодержания целлюлозной изоляции на ее электрофизические характеристики: диэлектрическую проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и удельное объемное сопротивление, а также их зависимость от температуры;

- разработан стенд для исследования миграции влаги в системе целлюлоза-масло-целлюлоза при термоциклировании;

- в разработанном стенде исследованы временные характеристики выравнивания влажности целлюлозного материала влагочувствительного элемента с влажностью погруженного картона;

- разработана конструкция датчика влажности твердой изоляции.

5) В рамках разработки и внедрения датчика механических примесей были получены следующие результаты:

- разработан стенд для испытания датчика механических примесей;

- проведена градуировка датчика механических примесей по прибору ФС-112 на трансформаторном масле с размерами примесей до 50 мкм. Градуировочный коэффициент $k_d = 20$ мкм/В;

- испытаны восемь датчиков механических примесей *NT1-NT8* на двух маслах с различным распределением механических примесей: одно с максимальным размером частиц до 50 мкм, другое – до 100 мкм. Получено подтверждение полученного градуировочного коэффициента;

- разработана конструкция датчика механических примесей;

- в датчике разработана электронная схема подсчета частиц и автоматического вычисления класса чистоты с применением микропроцессорной техники.

б) Проведено внедрение разработанных датчиков в составе БВД для контроля трансформаторов действующих энергообъектов. На примере БВД, установленного на Сургутской ГРЭС-2 было получено совпадение контролируемого газосодержания масла с периодическими измерениями.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пуликов П.Г. Исследование диффузии водорода через фторопластовую пленку // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2(123) – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 135 - 140.

2. А.Е. Монастырский, П.Г. Пуликов. Контроль концентрации газов в масле силовых трансформаторов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2(78) - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 52 – 57.

3. Пуликов П.Г. Разработка и исследование датчика механических примесей в трансформаторном масле // Энергобезопасность и энергосбережение, №1(43) – М.: Изд-во Московского института энергобезопасности и энергосбережения, 2012.

Публикации в сборниках трудов Международных конференций:

4. Монастырский А.Е., Пуликов П.Г. Методы непрерывного контроля высоковольтной изоляции силовых трансформаторов // Электрическая изоляция – 2010: сборник научных трудов пятой Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 23 – 32.

Публикации в сборниках научных трудов и докладов:

5. Инюшин И.Н., Кузнецов В.А., Монастырский А.Е., Пуликов П.Г. Система мониторинга изоляции силовых трансформаторов СКИТ. СПбГПУ, г. Санкт-Петербург. Сборник «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». Выпуск 30. Под ред. А.И. Таджибаева. – СПб.: ПЭИПК, 2006. с. 145 – 152.