



На правах рукописи

Чебрякова Юлия Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ
И МАНИПУЛЯЦИОННО-ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТОВ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА
ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность 05.02.05 - Роботы, мехатроника и робототехнические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Владимир 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный руководитель: **Шахнин Вадим Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электротехника и электроэнергетика» ФГБОУ
ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Официальные оппоненты: **Филинов Владимир Викторович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электротехника и механика» ФГБОУ ВО
«Московский технологический университет»,
г. Москва

Кузнецова Светлана Владимировна
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Приборостроение» ФГБОУ ВО «Ковровская
государственная технологическая академия
им. В. А. Дегтярева», г. Ковров

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита диссертации состоится « » _____ 2017 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru/index.php?id=174>.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, учёному секретарю диссертационного совета Д212.025.05 Новиковой Е.А.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Е. А. Новикова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Надёжность электроэнергетических систем является государственным приоритетом и одной из основ стабильности развития экономики России. Важную роль в обеспечении надёжного электроснабжения играют системы мониторинга высоковольтного оборудования электрических подстанций.

В настоящее время в электроэнергетике широко применяются стационарные системы мониторинга на основе контактных методов диагностики. Их очевидными недостатками являются: необходимость присутствия оператора в опасных зонах вблизи высоковольтных аппаратов большой мощности, жёсткая заданность количества и мест расположения датчиков; многократное дублирование однотипных систем мониторинга на электроэнергетическом объекте; сложность переналадки систем на диагностику новых видов оборудования. Внедрение дистанционных методов мониторинга, реализуемых на основе мехатронных систем, позволяет в значительной степени устранить перечисленные недостатки. Актуальность темы диссертации определяется одним из аспектов проблемы дистанционного мониторинга: практической востребованностью и отсутствием в настоящее время специализированных манипуляционно – исполнительных компонентов, перемещение которых координируется с текущими результатами мониторинга.

Системные принципы и общие методы создания мехатронных средств и их основных компонентов отражены в основополагающих работах отечественных учёных: О. А. Аверьянова, Б. Н. Белянина, И. Н. Егорова, С. Л. Зенкевича, А. И. Корендясева, В. С. Кулешова, И. М. Макарова, Ю. В. Подураева, Е. И. Юревича, А. С. Ющенко и другие. Формирование и развитие научного направления автоматизации мониторинга высоковольтных аппаратов в нашей стране связано с именами Б. А. Алексева, В. П. Вдовико, В. И. Григорьева, В. В. Ключева, Н. В. Киншта, Г. М. Михеева, В. А. Русова, П. М. Сви, Ю. В. Селезнёва, В. Е. Шатерникова и других. Широко известны в научном мире исследования в названной области зарубежных учёных: А. Simada, A. Browne, B. Bette, D. Yorgen, E. Gulski, F. Ferster, H. Muller, J. Kay, J. Beavans, K. Hasegava, K. Iwata, K. Hermann, L. Lundgaard, M. Vucobratovich, M. Belanger, P. Morshuis, T. Tarn.

Исследования, составляющие основу диссертации, относятся к новому научному направлению автоматизации неразрушающего контроля и технической диагностики «Автоматизация технологических процессов контроля и диагностики на основе мехатронных систем». Тема диссертации соответствует п. 43 «Мехатронные технологии» Перечня критических технологий РФ, утверждённого Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. и «Положению о технической политике ФСК ЕЭС на период 2006 – 2016 г.г.» (раздел «Диагностика и мониторинг оборудования»).

Целью диссертационной работы являются автоматизация мониторинга и снижение присутствия человека в опасных зонах вблизи диагностируемого высоковольтного оборудования без потери информации о его техническом состоянии за счёт применения мехатронных комплексов дистанционного мониторинга (МКДМ).

Объект исследований: манипуляционно-исполнительные и диагностические компоненты мехатронных комплексов, способных обеспечить дистанционный мониторинг крупногабаритных высоковольтных аппаратов при сложной топологии и больших площадях их пространственного размещения на основе электрошумового метода диагностики.

Предметом исследования являются методы синтеза и принципы интеграции манипуляционно-исполнительных и диагностических компонентов мехатронных комплексов дистанционного мониторинга.

Достижение указанной цели требует решения **научной задачи**, формулируемой следующим образом: разработка теоретических основ построения манипуляционно-исполнительных и диагностических компонентов, синергетическая интеграция которых позволяет обеспечить дистанционность и достоверность мониторинга высоковольтного оборудования электрических подстанций. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующее:

- выявить особенности технологического процесса мониторинга высоковольтного оборудования электрических подстанций как объекта автоматизации мехатронными средствами дистанционной интродиагностики;
- выбрать метод интродиагностики, наиболее подходящий в качестве физической основы построения мехатронных средств дистанционного мониторинга;
- разработать математические модели и технические средства реализации выбранного метода, пригодные для осуществления дистанционного мониторинга средствами мехатроники;
- разработать принципы и технические средства интеграции манипуляционно-исполнительных компонентов МКДМ с компонентами, осуществляющими интродиагностику;
- экспериментально подтвердить эффективность построения МКДМ на основе выбранного физического метода интродиагностики и глубокой интеграции основных компонентов.

Методы исследования. Решение научной задачи диссертации требует применения теоретико-экспериментальных методов исследования, важнейшими из которых в данном случае являются методы теории управления движением компонентов мехатронных систем; методы моделирования физических процессов и обработки результатов экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Сформулированы принципы гибкой автоматизации дистанционного мониторинга крупногабаритного высоковольтного оборудования электрических подстанций средствами мехатроники.

2. На основе информационной и аппаратной интеграции манипуляционно-исполнительных и диагностических компонентов разработаны способы адаптивного управления движением сенсорного модуля МКДМ и изменением электрического поля и с учётом текущих результатов мониторинга.

3. Предложена математическая модель спектральной плотности процесса частичных разрядов (ЧР) в изоляции высоковольтных аппаратов, ориентированная на применение в МКДМ, особенностью которой является учёт взаимной корреляции между ЧР, происходящими в разных локальных областях одного бака диагностируемого высоковольтного аппарата.

4. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность дистанционного мониторинга концентрации растворённых газов в масле главной изоляции силовых трансформаторов с помощью мехатронных средств диагностики.

Практическая ценность.

1. На основе модифицированного метода оценочной функции разработан адаптивный интерполятор для управления движением сенсорного модуля МКДМ с учётом текущих результатов мониторинга.

2. Разработаны теоретические основы инженерной методики анализа устойчивости, быстродействия и динамических погрешностей устройств присоединения и вторичного преобразования ЧР, работающих в составе манипуляционно-исполнительных модулей МКДМ.

3. Изготовлены и испытаны опытные образцы манипуляционно-исполнительных и диагностических компонентов МКДМ «ЭЛЕКТРО».

4. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований МКДМ разработаны два способа диагностики высоковольтного оборудования, признанные изобретениями.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются адекватностью поставленных задач и выбранных методов их решения; применением апробированных методик измерений и аттестованных средств измерений; подтверждением теоретических результатов результатами физического и вычислительного экспериментов; работоспособностью и эффективностью диагностических и манипуляционно-исполнительных компонентов МКДМ, разработанных на основе научных положений, рекомендаций и выводов, представленных в диссертационной работе.

Реализация результатов работы и их использование.

Научные и практические результаты диссертационной работы применялись в проектных, производственных и испытательных работах ООО

«МФ-Электро», при выполнении исследований и опытно-конструкторских работ в СКБ «Энергосбережение и энергоэффективность в электроэнергетике» ВлГУ в соответствии с программой «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (подпрограмма 201 - «Производственные технологии»). Разработаны и изготовлены образцы манипуляционно-исполнительных и диагностических модулей МКДМ, проведены их испытания на электрических подстанциях Волго-Окского предприятия магистральных электрических сетей и филиала «Владимирэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья».

Теоретические разделы и технические решения диссертации, включены в учебные материалы для студентов, обучающихся в магистратуре ВлГУ по направлениям подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Апробация результатов работы. Диссертация и отдельные разделы работы докладывались и обсуждались на Международной НТК «XVI Бенардосовские чтения» (ИГЭУ, Иваново, 2011 г.); на Международной НТК «Электрические аппараты, электротехнические комплексы и системы» (Ульяновск, 2012 г.); на III Всероссийской НТК «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники» (Владимир, 2012 г.); на IV Международной НТК «Энергетика и энергоэффективные технологии» (Липецк, 2012 г.); на VII Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (КГЭУ, Казань, 2012 г.) на Всероссийской НТК «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2013 г.); на XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, М., 2014 г.); на VII Международной молодежной НТК «Электроэнергетика глазами молодежи» (КГЭУ, Казань, 2016 г.); на Всероссийской НТК «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (Севастополь, 2016 г.), а также на научно-технических семинарах во Владимирском государственном университете, Ивановском государственном энергетическом университете и Национальном исследовательском университете «МЭИ».

Публикации и изобретения. По результатам исследования опубликовано 19 работ, в числе которых 5 статей в журналах из перечня ВАК по группе специальностей 05.02.00. Изобретения по теме диссертации защищены двумя патентами РФ.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 115 наименований, 5 приложений, 33 рисунка и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность её темы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава диссертации посвящена анализу технологического процесса мониторинга высоковольтного оборудования как объекта гибкой автоматизации средствами мехатроники. Сформулированы принципы автоматизации мониторинга высоковольтного оборудования на основе мехатронного подхода:

– в качестве физической основы гибкой автоматизации целесообразно выбрать многопараметровые методы дистанционного мониторинга;

– в качестве моделей дистанционного мониторинга целесообразно использовать статистические модели многопараметровых косвенных измерений, отражающие интеграционную специфику мехатронных средств;

– в теоретическом аспекте дистанционный мониторинг должен базироваться на решении обратных измерительных задач;

– для объединения модулей в мехатронный комплекс в качестве интеграционной платформы целесообразно применить управление в соответствии с текущими результатами мониторинга;

– аппаратную основу мехатронных средств дистанционного мониторинга должны составить адаптивные и интеллектуальные мехатронные модули, концентрирующие основную часть функциональной нагрузки.

Во второй главе диссертации на базе анализа физических и математических основ электрошумовой интродиагностики определены перспективные направления применения средств мехатроники для дистанционного мониторинга высоковольтного оборудования.

Первый раздел посвящён теоретическому обоснованию возможности дистанционной оценки концентрации растворённых газов в масло-барьерной изоляции силовых трансформаторов и реакторов с номинальными напряжениями от 10 до 1150 кВ с помощью мехатронных средств электрошумовой интродиагностики. Актуальность этих исследований определяется тем, что к настоящему времени разработаны методы мониторинга развивающихся дефектов по характеру изменения концентраций растворённых газов, однако их широкое применение сдерживается контактным способом определения концентраций на основе хроматографии.

Во втором разделе обоснована возможность применения параметров спектрального распределения случайного процесса ЧР в качестве диагностических признаков при дистанционном мониторинге состояния изоляции высоковольтных аппаратов средствами мехатроники. Для реализации этой возможности рассмотрены различные подходы к математическому моделированию взаимосвязи спектрального распределения

$g(\omega)$ с параметрами частичных разрядов в диагностируемом диэлектрике. Наиболее простым подходом является предположение о полной независимости ЧР в диагностируемом аппарате, так что в разрядном процессе частичных разрядов с равной вероятностью участвуют все локальные области диэлектрика. Каждый из ЧР вызывает на выходе датчика импульсный сигнал

$$v_j(t) = a_j F_j(t - \Theta_j),$$

где a_j – амплитуда импульса; F_j – функция, описывающая его форму; Θ_j – момент его возникновения.

Если вероятность появления импульса на временном интервале от t до $t + dt$ зависит только от длительности интервала dt , то вероятность появления n импульсов в интервале времени T дается распределением Пуассона. С учётом этого для наиболее распространённых экспоненциальных ЧР-импульсов

$$F(t) = e^{-\lambda t} \quad (t > 0)$$

получена следующая формула для спектральной плотности

$$g(\omega) = \frac{n_1 \overline{a^2}}{2\pi} \frac{1}{\lambda^2 + \omega^2} \quad (1)$$

где n_1 – среднее число ЧР в единицу времени.

Эксперименты показали, что результаты вычисления спектральной плотности магнитного шума в области плато по формуле (1) совпадают по порядку величины с результатами измерений. Однако эта модель не позволяет объяснить низкочастотный спад спектральной плотности. Было предположено, что это связано с принятой гипотезой о независимости ЧР. На основе экспериментальных исследований для учёта взаимодействия между отдельными ЧР была получена формула для плотности вероятности распределения интервалов времени θ , разделяющих два следующих друг за другом ЧР $\omega(\theta) = 4n_1^2 \theta e^{-2n_1\theta}$. Её подстановка привела к следующему к выражению для спектральной плотности

$$g(\omega) = \frac{n_1 a^2}{2\pi(\lambda^2 + \omega^2)} \left[1 - \frac{1}{2 + \frac{1}{8} \left(\frac{\omega}{n_1} \right)^2} \right] \quad (2)$$

Математическая модель (2) по сравнению с (1) правильнее описывает спектральную плотность ЧР-шумов в диагностируемом высоковольтном оборудовании, т.к. содержит поправочный множитель, обуславливающий некоторый спад спектральной плотности в области низких частот.

В заключительном разделе второй главы рассмотрены вопросы синтеза математических моделей электрошумового мониторинга. Особенностью мониторинга по параметрам ЧР является то, что непосредственно сами результаты измерений не позволяют «проявить» взаимосвязи измеряемых электрошумовых параметров и контролируемых эксплуатационных параметров. Для этого необходимо решение обратных задач мониторинга (ОЗМ). Применительно к мониторингу высоковольтного оборудования можно выделить два типа ОЗМ: *распознавание образа дефекта* и *построение модели взаимосвязи измеряемых и эксплуатационных параметров*. Задачи первого типа, когда объект мониторинга идентифицируется как один из имеющихся в базе данных, относительно просты. Однако в настоящее время соответствующие базы данных отсутствуют даже для отечественного оборудования, находящегося в эксплуатации длительное время. Их создание с учётом широкой номенклатуры оборудования чрезвычайно трудоёмко. Второй тип задач объединяет случаи с незадачным заранее выбором, когда объект мониторинга конструируется «с нуля» в виде математической модели. Таким образом, в качестве теоретической основы электрошумового мониторинга целесообразно выбрать методы решения обратных задач второго типа.

Третья глава диссертации посвящена разработке манипуляционно-исполнительных модулей и их интеграции с диагностическими компонентами в мехатронном комплексе дистанционного мониторинга. Во вступительной части сформулировано определение МКДМ, представлена обобщённая структурная схема, определены функции мехатронных модулей и выявлены отличительные свойства МКДМ. обоснована целесообразность использования в качестве датчиков мехатронного диагностического комплекса направленных СВЧ антенн типа АПП-1.

Во втором разделе рассмотрены вопросы управления движением антенны на основе принципа учёта текущих результатов мониторинга, выбранного в качестве интеграционной платформы МКДМ. На основе анализа наиболее распространённых методов интерполяции траекторных перемещений сделан вывод о том, что для повышения достоверности мониторинга путём изменения параметров движения антенны в соответствии результатами сканирования целесообразно применение модифицированного метода оценочной функции. Его содержание раскрыто на примере исполнительного механизма перемещения антенны МКДМ «ЭЛЕКТРО». Актуатор имеет ортогональную кинематическую схему и осуществляет перемещения антенны в горизонтальном и вертикальном направлениях X и Y . Предлагается корректировать режим работы логического переключающего устройства интерполятора сигналом, который является результатом интегрирования интенсивности ЧР-шума в локальной области изоляции объекта мониторинга. При технической реализации способа интегрируется выходное напряжение вторичного преобразователя ЧР. Форма этого сигнала

близка к прямоугольной, а амплитуда пропорциональна текущим значениям интенсивности ЧР в изоляции объекта мониторинга. Структурная схема адаптивного интерполятора, реализующего предложенный способ управления, представлена на рисунке 1.

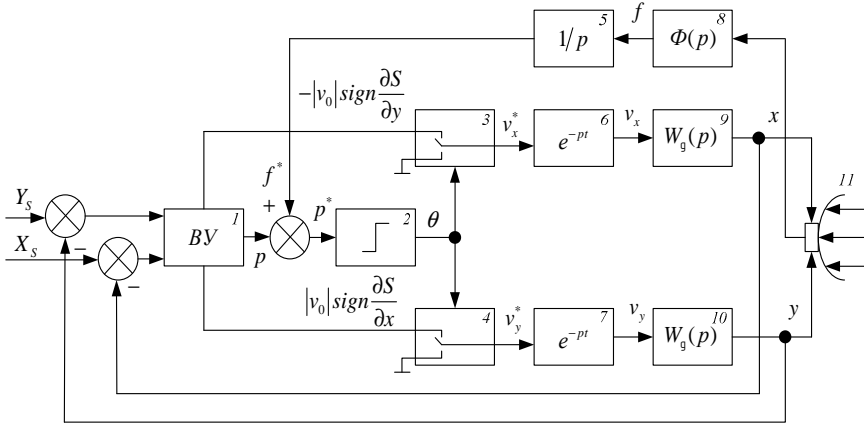


Рисунок 1 - Структурная схема адаптивного интерполятора

В состав интерполятора входят: вычислительное устройство (1); логическое переключающее устройство (ЛПУ), реализуемое на одном релейном элементе (2) и двух переключающих элементах (3, 4); интегратор (5); звенья чистого запаздывания (6, 7); вторичный преобразователь ЧР (8), а также электроприводы (9, 10) и направленная антенна (11), выполняющая роль первичного преобразователя ЧР.

Пусть интерполятор имеет запаздывание τ в переключении компонент вектора управления, а на входе ЛПУ действует сигнал

$$p^*(t) = p(t) + f^*(t),$$

где $p(t) = S \text{sign} \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial S}{\partial y}$; $f^*(t)$ - результат интегрирования текущих значений выходного сигнала вторичного преобразователя сигнала антенны

$f(t)$; S - траектория, по которой в идеале должно происходить перемещение, задаваемая входными сигналами X_s и Y_s . В этом случае система уравнений, соответствующая адаптивному интерполятору, имеет следующий вид:

$$v_x(t) = v_x^*(t - \tau) \qquad v_y(t) = v_y^*(t - \tau)$$

$$v_x^* = F_x(\theta) = \begin{cases} -v_0 \text{sign} \left(\frac{dS}{dy} \right), & \text{если } \theta = 1 \\ 0, & \text{если } \theta = -1 \end{cases}$$

$$v_y^* = F_y(\theta) = \begin{cases} -v_0 \operatorname{sign}\left(\frac{dS}{dx}\right), & \text{если } \theta = -1 \\ 0, & \text{если } \theta = 1 \end{cases}$$

$$\theta = F(p^*) = \begin{cases} 1, & \text{если } p > 0 \\ -1, & \text{если } p < 0 \end{cases} \quad p = S \operatorname{sign} \frac{dS}{dx} \frac{dS}{dy}$$

Предложенный метод адаптации параметров движения антенны реализован системой управления МКДМ «ЭЛЕКТРО», в электроприводах которой использованы высокомоментные бесколлекторные двигатели постоянного тока с полым ротором. В качестве преобразователей движения применены планетарные редукторы и ШВП «HIWIN» с вращающимся винтом. Горизонтальное и вертикальное перемещения антенны осуществляются в диапазонах $3 \cdot 10^3$ мм и $5 \cdot 10^3$ мм, соответственно, по шариковым рельсовым направляющим. При проверке точности позиционирования для 15 положений антенны с использованием лазерного интерферометра XL-80 (Великобритания) получены следующие результаты: точность двухстороннего позиционирования - 640 мкм; повторяемость двухстороннего позиционирования - 410 мкм; средняя зона нечувствительности - 32 мкм. Анализ показал, что достигнутая точность позиционирования обеспечивает возможность мониторинга при нахождении антенны на расстоянии до 50 м от диагностируемого аппарата, т.е. в безопасной для оператора зоне.

Последующие разделы третьей главы посвящены анализу динамики и устойчивости компонент адаптивного интерполятора, обеспечивающих первичное и вторичное преобразование электрошумового сигнала. Предложена методика анализа и минимизации динамических погрешностей тракта первичного преобразования и передачи сигнала. Методика основана на математическом моделировании ЧР в наиболее распространённых локальных неоднородностях в форме сильно сплющенного по направлению действия электрического поля цилиндра, размеры которого значительно меньше расстояний до соседних неоднородностей. В отличие от известных работ по теории ЧР-диагностики учитывается экспериментально установленный факт, что определенная часть границы неоднородности переходит из одного устойчивого состояния в другое по затухающему колебательному закону. Полученные по этой методике соотношения позволили сделать практически важные выводы о характере переходных процессов для амплитуды и фазы, показывающие, что для достижения требуемой точности измерения параметров ЧР необходимо применение автокомпенсационного режима работы модуля вторичного преобразования.

Обобщённая структурная схема автокомпенсационного вторичного преобразователя МКДМ «ЭЛЕКТРО» имеет в прямой цепи согласующий и

избирательный усилители, низкочастотный фильтр и цепь отрицательной обратной связи (ООС) с передаточными функциями $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ и $\beta_1(p)$, соответственно. Запас устойчивости вторичного преобразователь должен обеспечивать его работоспособность даже при возникновении значительных флюктуаций сигнала ЧР, например, при переходе на новый объект мониторинга. Анализ динамических характеристик основных звеньев показывает, что для реальных значений параметров спектра и кажущегося заряда ЧР в масле главной изоляции силовых трансформаторов этот модуль может рассматриваться в замкнутом состоянии как линейная система с передаточной функцией

$$\Phi(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{W(p)}{1 + \beta W(p)} = \frac{W(p)}{1 + G(p)} \quad (3)$$

где $W(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)$.

При использовании в избирательном усилителе полосового фильтра (ПФ), имеющего резонансных n LC-контуров, передаточная функция разомкнутой системы приобретает вид

$$G(p) = \frac{\beta K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)^n}$$

где βK - коэффициент усиления разомкнутой системы, T_1 и T_2 - постоянные времени фильтра низких частот (ФНЧ) и полосового фильтра избирательного усилителя, соответственно. Для анализа устойчивости применяли формулу для комплексной частотной характеристики, которая является результатом преобразования Фурье импульсной характеристики системы

$$G(j\Omega) = \frac{\beta K \sin \varphi_1 (\sin \varphi_2)^n}{\Omega T_1 (\Omega T_2)^n} e^{-j(\varphi_1 + n\varphi_2)} \quad (4)$$

где $\varphi_1 = \arctg \Omega T_1$, $\varphi_2 = \arctg \Omega T_2$.

На рис. 2 представлены типовые логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики модуля вторичного преобразования, построенные в соответствии с формулой (4) при использовании в полосовом фильтре избирательного усилителя одного, двух и трёх резонансных контуров ($n=1, 2, 3$). Видно, что частота среза Ω_c находится в полосе пропускания полосового избирательного усилителя ($\Omega_c > \Omega_2$), поэтому фазовый сдвиг, вносимый ПФ на частотах $\Omega \leq \Omega_c$, может оказаться значительным и стать причиной неустойчивости. На основе анализа, представленного в третьей главе диссертации, получены практически важные формулы, положенные в основу инженерной методики обеспечения устойчивости модуля вторичного преобразования. Формула

$$\varphi_2(\Omega_c) = \arctg \Omega_c T_2 < \pi / 2n$$

определяет необходимые для обеспечения устойчивости значения фазового сдвига, вносимого полосовым фильтром, а формула

$$\beta K_{\max} = \frac{T_1 \operatorname{tg}(\pi / 2n)}{T_2 (\cos \pi / 2n)^n}$$

позволяет рассчитать значение предельного петлевого усиления, при котором система ещё устойчива. Анализ устойчивости модулей вторичного преобразования с более сложными ПФ типа k и m проводится по методике, аналогичной вышеизложенной.

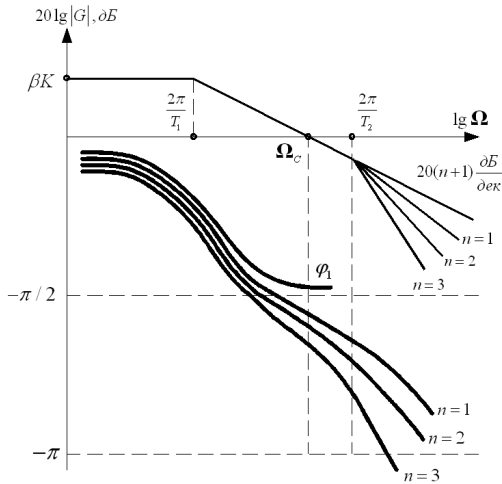


Рисунок 2 - Типовые ЛАЧХ и ЛФЧХ вторичного преобразователя

При разработке инженерной методики для получения аналитической связи между качеством переходных процессов и параметрами первичного преобразователя ЧР был применён метод аппроксимации передаточной функции преобразователя с многоконтурным ПФ передаточной функцией системы второго порядка, имеющей эквивалентные динамические характеристики. Быстродействие оценивалось по временному интервалу от момента приложения входного воздействия до момента установления выходного сигнала с погрешностью δ , не превышающей значения основной погрешности первичного преобразователя. С использованием этих приёмов были получены формулы

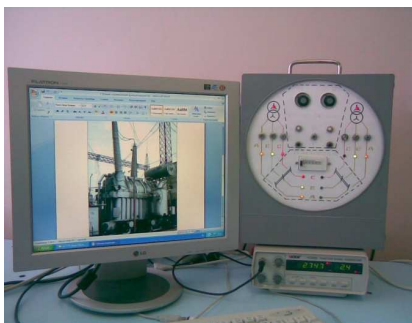
$$t_y = \frac{T_1}{1 + \beta K} \ln \frac{1}{\delta} \quad \text{и} \quad t_y \approx \frac{2T_1 T_2}{T_1 + T_2} \ln \frac{1}{\delta}.$$

для инженерного расчёта времени установления при аperiodическом и колебательном переходных процессах, а также формула для расчёта динамической погрешности в критическом режиме, т.е. при максимальном быстродействии

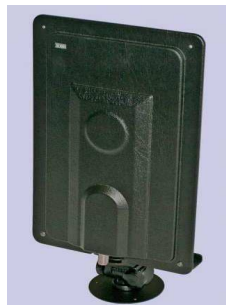
$$\delta = e^{-\frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right)}$$

где $T = \sqrt{T_1 T_2} / (1 + \beta K)$

Четвёртая глава диссертации посвящена исследованию возможностей МКДМ «ЭЛЕКТРО» (рисунок 3) для решения практических задач диагностики высоковольтного оборудования. Эксперименты проводились в процессе плановых комплексных обследований состояния трансформаторного оборудования для 58 трансформаторов электрических подстанций (ПС) предприятий магистральных электрических сетей (МЭС) Центра в период с 2009 г. по 2015 г.



а)



б)

Рисунок 3 - Компоненты МКДМ «ЭЛЕКТРО»: а – диагностический модуль; б – манипуляционно-исполнительный модуль с антенной

К числу важнейших практических задач, без решения которых невозможно эффективное применение МКДМ, относится задача формирования обучающих массивов диагностического модуля. Для её решения были разработаны и включены в состав диагностического модуля МКДМ «ЭЛЕКТРО» устройства для определения спектральных характеристик и текущих средних значений параметров ЧР, возможности которых представлены в первом и втором разделах главы. Для определения текущих средних значений параметров ЧР было разработано и применялось устройство, отличающееся от известных тем, что при формировании законов изменения напряжённости электрического поля реализуется принцип управления на основе учёта текущих значений того или иного параметра ЧР, т.е. принцип выбранный в качестве интеграционной платформы мехатронного комплекса. Устройство может работать в двух режимах: со стабилизацией текущего среднего значения частоты следования ЧР и со стабилизацией текущего среднего значения кажущегося заряда ЧР.

Для иллюстрации возможностей устройства на рисунке 4 представлены типичные графики зависимостей текущих средних значений длительности ЧР

от приложенного напряжения: $\tau_{cp} = f(U)$, полученные в режиме со стабилизацией текущего значения кажущегося заряда ЧР на лабораторном высоковольтном трансформаторе с низким качеством изоляции близким к критическому.

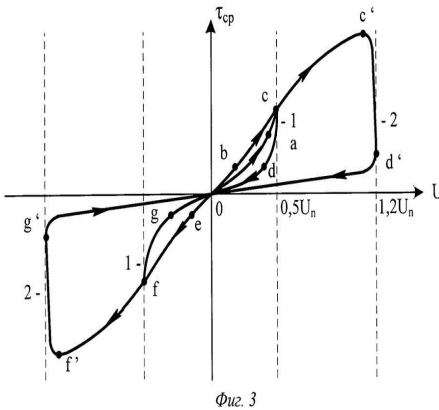


Рисунок 4 - Типичные графики зависимостей $\tau_{cp} = f(U)$

Амплитуда испытательного напряжения для кривой 1 равна 50%, а для кривой 2 – 120% от номинальной рабочей амплитуды. Диагностическими параметрами, для которых могут быть сформированы обучающие массивы, являются следующие: площадь, ограниченная кривыми; максимальное значение τ_{cp} и соответствующее ему напряжение (координаты точки c'); значение τ_{cp} , соответствующее амплитуде напряжения (координаты точки d'), а также наклоны касательных, проведённых к кривым в характерных точках (начальный, максимальный и др.).

Третий раздел четвёртой главы посвящён экспериментальному подтверждению возможности дистанционного мониторинга концентрации растворённых газов в масле главной изоляции силовых трансформаторов с помощью МКДМ «ЭЛЕКТРО». Теоретическое обоснование такой возможности дано во второй главе. Эксперименты были направлены на поиск устойчивых статистических зависимостей между параметрами ЧР и концентрациями растворённых газов. Для построения статистических моделей мониторинга применялась методика, изложенная в третьем разделе второй главы диссертации. Исследовались 18 аппаратов, в том числе, пять автотрансформаторов АОДЦТН-417000/750/500-У1, шесть автотрансформаторов АТДЦТН-250000/500/110/10 и семь трансформаторов ТДТН-31500/110. Эти трансформаторы установлены на ПС Московского, Валдайского и Волго-Окского предприятий магистральных электрических сетей.

Результаты экспериментов позволили сделать следующие выводы:

-дистанционный электрошумовой мониторинг концентраций четырёх растворённых газов (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 и H_2), являющихся ключевыми либо характерными для большинства развивающихся дефектов электрического и термического характера, возможен на основе универсальных моделей, устойчивых к вариациям марок масла, типов трансформаторов и их нагрузки; приведенная погрешность восстановления концентраций не превышает 17%.

-дистанционный электрошумовой мониторинг концентраций оксида и диоксида углерода, являющихся ключевыми газами для развивающихся дефектов твёрдой изоляции, возможен лишь на основе моделей, полученных для трансформаторов с близким характером нагрузки; приведенная погрешность восстановления концентраций не превышает 20%.

-применение мехатронного комплекса «ЭЛЕКТРО» позволяет автоматизировать дистанционный мониторинг высоковольтного оборудования электрической подстанции в условиях разнообразия типов установленных силовых трансформаторов.

В заключении констатируется, что к основным результатам диссертации относится следующее:

1. Установлена актуальность мехатронного подхода в сфере диагностики и сформулированы принципы гибкой автоматизации дистанционного мониторинга крупногабаритного высоковольтного оборудования электрических подстанций.

2. Разработан способ и аппаратные средства адаптивного управления манипуляционно-исполнительными компонентами МКДМ с учётом текущих результатов мониторинга, позволяющие достичь следующих показателей: точность двухстороннего позиционирования - 640 мкм; повторяемость двухстороннего позиционирования - 410 мкм; средняя зона нечувствительности – 32 мкм.

3. Сформулированы основные теоретические положения инженерной методики анализа устойчивости, быстродействия и динамических погрешностей манипуляционно-исполнительных и диагностических компонентов МКДМ, результатом которой стали аналитические выражения для расчёта предельного петлевого усиления, времени установления выходного сигнала с заданной погрешностью при апериодическом и колебательном переходных процессах, динамической погрешности в критическом режиме.

4. Предложены математические модели информативных статистических характеристик ЧР-шума, предназначенные для МКДМ, особенностью которых является учёт корреляции между ЧР. Адекватность моделей подтверждалась по геометрической близости графиков зависимостей, полученных экспериментально и с использованием предложенных моделей. В качестве критерия адекватности выбрано условие $\gamma_i \leq \gamma_{\max}$, где $\gamma_{\max} = 10\%$ - максимально допустимое относительное расхождение графиков.

5. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований МКДМ разработаны два способа диагностики высоковольтного оборудования, признанные изобретениями. Их отличительной особенностью является использование режимов со стабилизацией частоты и текущего среднего значения кажущегося заряда ЧР, что позволило снизить погрешность измерений, соответствующую доверительной вероятности 95%, с 37% (без стабилизации) до 10% (со стабилизацией).

6. Проведена апробация опытных образцов манипуляционно-исполнительных компонентов МКДМ на электрических подстанциях филиала «Владимирэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья» и Волго-Окского предприятия магистральных электрических сетей. Достигнутая точность позиционирования манипуляционно-исполнительных компонентов обеспечивает достоверность мониторинга на расстоянии до 50 м от диагностируемого аппарата. В этой зоне напряженности электрического и магнитного полей, даже на ОРУ-750 кВ, не превышают значений 1 кВ/м и 8 А/м, соответственно, т.е. безопасны для оператора.

Отмечено, что результаты диссертации соответствуют требованиям «Положений о технической политике ФСК ЕЭС на период 2006 – 2016 г.г.» (раздел «Диагностика и мониторинг оборудования»).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах из перечня ВАК, рекомендованных для группы научных специальностей 05.02.00:

1. Шахнин, В.А. Анализ динамических погрешностей датчиков для электрошумовой интродиагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров, Ю.С. Чебрякова // Контроль и диагностика. - №8. - 2012. - С. 27-31.

2. Шахнин, В.А. Управление движением мехатронного комплекса электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров, Ю.С. Чебрякова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. - № 8. – С. 47-50.

3. Шахнин, В.А. Алгоритм управления движением антенны мехатронного комплекса электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров, Ю.С. Чебрякова // Контроль и диагностика. - №12. - 2013. - С. 34-38.

4. Шахнин, В.А. Аппаратный анализ и моделирование статистических характеристик частичных разрядов для интродиагностики высоковольтного оборудования / Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В // Автоматизация и современные технологии, 2015, №1, С. 23-28.

5. Шахнин, В.А. Статистические характеристики частичных разрядов как диагностические признаки состояния изоляции высоковольтного оборудования / Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В // Контроль. Диагностика, 2015, № 2, С. 59-65.

В других изданиях:

6. Чебрякова Ю.С. Электрошумовая интродиагностика силовых трансформаторов / Чебрякова Ю.С. // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2012.- Т. 1. - С. 102-103.

7. Шахнин, В.А. Переходные процессы в устройствах присоединения средств электрошумовой интродиагностики высоковольтного

оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров, Ю.С. Чебрякова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2012. - №2. - С. 50-54. – ISSN.

8. Шахнин, В.А. Повышение достоверности электрошумовой интродиагностики высоковольтных вводов автотрансформаторов / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова // Сборник материалов Международной НТК «Электрические аппараты, электротехнические комплексы и системы». – Ульяновск: УГТУ, 2012.- Т. 1. - С. 264-267.

9. Шахнин, В.А. Математическое моделирование статистических характеристик частичных разрядов при диагностике высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова, Я.В. Мироненко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. - № 7. - С. 54-58.

10. Шахнин В.А., Экспериментальное исследование статистических характеристик частичных разрядов в масляной и RIP-изоляции высоковольтных вводов / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова // Материалы Всероссийской НТК «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2013 г. ,С. 45-48.

11. Шахнин В.А., Спектральное распределение частичных разрядов как диагностический признак состояния изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова // Многопрофильный научный журнал Кустанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, 2014, № 3, С. 115-121.

12. Шахнин В.А., Мониторинг высоковольтного оборудования на основе мехатронного подхода / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова, Я.В. Мироненко // Труды IV Всероссийской НТК «Информ.-измер. и управляющие системы военной техники». Владимир, ноябрь 2014, С. 128-132.

13. Шахнин В.А., Экспериментальное определение и моделирование статистических характеристик частичных разрядов / В.А. Шахнин, Н.П. Бадалян, Ю.С. Чебрякова // Вестник Гос. инженерного университета Армении. Серия «Электротехника. Энергетика», 2014. Вып. 17, № 2, С.71-81.

14. Шахнин В.А. Мехатронный модуль для диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, Н.П. Бадалян, Ю.С. Чебрякова // Вестник Национального политехнического университета Армении. Серия «Электротехника. Энергетика», 2015. № 2, С. 9-18.

15. Чебрякова Ю.С. Разработка мехатронного модуля дистанционной сканирующей диагностики для высоковольтного оборудования/ Чебрякова Ю.С. // Материалы VII Международной молодежной научно- технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи -2016». – Казань: КГЭУ, 2016.- Т. I. - С. 254-257.

16. Шахнин, В.А. Дистанционный мониторинг маслобарьерной изоляции силовых трансформаторов / В.А. Шахнин, Н.П. Бадалян, Ю.С. Чебрякова // Вестник Национального политехнического университета Армении. Серия «Электротехника. Энергетика», 2016. № 1,С. 37-48.

17. Шахнин, В.А. Оценка концентрации растворённых газов в масле главной изоляции силовых трансформаторов по параметрам частичных разрядов / Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2016, №4, С. 12-20.

Патенты Российской Федерации:

18. Патент РФ на изобретение № 2511607, МКП G01R 33/12. Способ электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова. - Бюлл. изобр. № 10, 2014.

19. Патент РФ на изобретение № 2536795, МКП G01R 33/12. Способ диагностики высоковольтного оборудования по параметрам частичных разрядов / В.А. Шахнин, Ю.С. Чебрякова, Я.В. Мироненко. - Бюлл. изобр. № 12, 2014.

Личный вклад соискателя:

[1] - предложена методика анализа динамических погрешностей, позволяющая значительно сократить объем вычислений; [2] - разработана функциональная схема адаптивного интерполятора; [3] - обоснована целесообразность применения модифицированного метода оценочной функции для разработки алгоритма управления; [4] - разработана функциональная схема анализатора спектральной плотности для диагностического модуля мехатронного комплекса; [5,11] - обоснована целесообразность использования параметров спектрального распределения в качестве измеряемых параметров для диагностического модуля мехатронного комплекса; [7,8] - сформулированы и обоснованы практически важные выводы о характере переходных процессов для амплитуды и фазы устройств присоединения манипуляционно-исполнительного модуля мехатронного комплекса; [9] - предложена модель процесса частичных разрядов в изоляции диагностируемого оборудования, ориентированная на применение мехатронных средств мониторинга; [10,16,17] - статистически обоснована возможность дистанционного мониторинга концентрации растворённых газов в изоляции силовых трансформаторов с помощью мехатронных средств диагностики; [12, 14] – дан анализ технологического процесса мониторинга высоковольтного оборудования как объекта автоматизации средствами мехатроники; [13] - получение и обработка результатов экспериментов; [18,19] - разработка функциональных схем устройств для реализации предложенных способов диагностики средствами мехатроники.

Подписано в печать 24.04.2017.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Издательство.

Владимирского государственного университета
Имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

