

На правах рукописи



ФРОЛОВ КИРИЛЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ
АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЯЧЕЕК КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Самара – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информационно-измерительная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

- Научный руководитель: **Инаходова Лолита Меджидовна**
кандидат технических наук, доцент,
директор филиала ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет» в г. Белебее
Республики Башкортостан,
- Официальные оппоненты: **Воловач Владимир Иванович**
доктор технических наук, доцент,
директор высшей школы передовых производственных
технологий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет сервиса»,
г. Тольятти
- Фрейман Владимир Исаакович**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Автоматика и телемеханика»,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»,
г. Пермь
- Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Пензенский
государственный университет»
г. Пенза

Защита состоится «12» марта 2026 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <https://d24237704.samgtu.ru/>.

Отзывы и замечания по автореферату просим направлять в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04: тел. (846) 337-05-45, e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.377.04,
кандидат технических наук, доцент



Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время все возникающие дефекты комплектно-распределительных устройств (КРУ) по результатам обследований производственных компаний за 8 лет относятся к развивающимся (до 15 %) или к аварийным дефектам (до 85 %). В этой связи, повышение надёжности электроснабжения промышленных объектов требует наличия систем технического контроля и диагностики [1-6]. Для повышения точности и оперативности диагностики предлагается использование информационно-измерительных систем (ИИС) диагностики состояния КРУ, позволяющих осуществлять дистанционное получение информации и взаимодействие с КРУ. При этом наиболее целесообразным может быть применение ИИС на основе метода бесконтактного акустического контроля всех элементов ячейки, позволяющей принимать решения о необходимости проведения внепланового осмотра для выявления дефектного оборудования и техническом останове КРУ на плановый ремонт без участия обслуживающего персонала.

Основной проблемой при разработке ИИС на основе бесконтактного метода акустического контроля является неопределённость критериев для оценки неисправностей в элементах КРУ. Такие критерии могут быть основаны на наличии или отсутствии частичных и дуговых разрядов, обнаружение которых позволит выявлять предаварийные состояния электрооборудования ячеек КРУ. Таким образом, актуальной научной задачей является разработка метода оценки технического состояния на основе спектрального анализа акустических сигналов и алгоритмов их кластеризации, с последующей реализацией в ИИС непрерывной диагностики, решение которой имеет теоретическое и практическое значение и позволит предотвратить значительное количество аварий и уменьшить затраты на эксплуатацию КРУ.

Степень разработанности темы исследования

Теоретическую основу выполненных в диссертации исследований составили работы по теоретическим принципам ИИС авторов: Захарова В.А., Волегова А.С., Орешникова В.В., Якимова В.Н., Чичёва С.И., Парахуды Р.Н. и др. Проблематика обработки сигналов раскрыта в работах: Дворковича В. П., Дворковича А. В., Prabhu К.М., Marple S. L., Лозанского Э.Д., Фирсова О.Б., Баранова В.М. и др., методические решения которых применены в диссертации при регистрации и фильтрации исходных данных, получаемых с акустических датчиков. Вопросы эксплуатации и защиты электрооборудования подробно рассмотрены в исследованиях Хренникова А.Ю., Гольдштейна В.Г., Шахнина В.А., Красника В.В., Нагая В.И., Михайлова А.В., Казачкова Ю.П., Дорошева К.И., Wang Y., Zhu X. и др., работы которых легли в основу разработанных оригинальных технических решений, полученных в диссертации на основании проведенных исследований.

Несмотря на существующие достижения в создании систем мониторинга, диагностики и защиты КРУ на основе акустического контроля, имеется потребность в разработке методов, критериев и алгоритмов ИИС для оценки технического состояния КРУ для повышения эффективности диагностики, мониторинга и автоматизации защиты КРУ от частичных и дуговых разрядов и рекомендаций принятия решений по ремонту и эксплуатации КРУ.

Основная задача, решению которой посвящено диссертационное исследование – это необходимость оперативного и достоверного определения технического состояния КРУ с использованием метода бесконтактного акустического контроля с учетом сложностей доступа ко всем элементам ячейки с целью определения предаварийных и аварийных состояний.

В связи с этим, разработка ИИС непрерывной акустической диагностики КРУ, а также критериев и алгоритмов ИИС для оценки технического состояния КРУ на основе метода бесконтактного акустического контроля, является актуальной задачей, требующей решения.

Цель диссертационной работы – повышение достоверности и оперативности оценки технического состояния и снижение аварийности электрооборудования ячеек комплектных распределительных устройств с помощью информационно-измерительной системы непрерывной акустической диагностики.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены основные **задачи**.

1. Классификация основных видов повреждений и анализ существующих методов и средств мониторинга и диагностики КРУ, определение факторов, влияющих на их эффективность.

2. Параметрическая идентификация и верификация математической модели акустического сигнала, описывающей частичные и дуговые разряды, возникающие в КРУ.

3. Разработка метода бесконтактного акустического контроля с одновременной диагностикой электрооборудования отсека ячейки КРУ.

4. Разработка метода кластеризации спектральной плотности мощности (СПМ) акустических сигналов для формирования режимно-диагностической карты, позволяющей классифицировать состояние ячейки КРУ и определять его принадлежность к одному из режимов: нормальному, предаварийному или аварийному.

5. Разработка методики контроля работоспособности измерительных каналов ИИС на основе подачи тестовых сигналов, сформированных по параметрической модели акустических сигналов разрядов.

6. Разработка информационно-измерительной системы непрерывной акустической диагностики электрооборудования ячеек КРУ, включая архитектуру, алгоритмы обработки данных, программно-аппаратное обеспечение, и её метрологический анализ.

7. Разработка рекомендаций по применению метода бесконтактного акустического контроля для защиты ячеек КРУ от частичных и дуговых разрядов.

Объект исследования – электрооборудование ячеек комплектных распределительных устройств электрических подстанций.

Предметом исследования являются методы выявления аномальных режимов работы, структура и алгоритмы функционирования информационно-измерительной системы диагностики технического состояния оборудования для непрерывного бесконтактного акустического мониторинга ячеек комплектно-распределительных устройств 6-10 кВ в процессе их эксплуатации.

Научная новизна

1. Предложен метод бесконтактного акустического контроля, *отличающийся* одновременной диагностикой всех элементов отдельного отсека ячейки КРУ за счет расположения двух акустических датчиков в зонах минимального воздействия электромагнитных полей, *что обеспечивает* высокую чувствительность к изменениям контролируемых сигналов без привлечения обслуживающего персонала. (п. 3)

2. Разработан метод кластеризации спектральной плотности мощности акустического сигнала, *отличающийся* использованием метода главных компонент, примененным к измеряемому акустическому сигналу, *позволяющий* формировать режимно-диагностическую карту для классификации состояния ячейки КРУ 6-10 кВ и определять его принадлежность к одному из режимов: нормальному, предаварийному или аварийному. (п. 3)

3. Разработана информационно-измерительная система на основе метода бесконтактного акустического контроля, *отличающаяся* предварительной обработкой акустических данных внутри ячейки КРУ и реализацией метода кластеризации СПМ сигналов, *обеспечивающая* оперативное выявление дефектов подверженных электрическому пробое элементов КРУ, а также пониженную нагрузку на каналы передачи диагностических данных. (п. 6)

4. Предложена методика контроля работоспособности измерительных каналов разработанной ИИС, *отличающаяся* проведением периодической подачи тестовых сигналов на основе параметрической идентификации математической модели акустического сигнала дуговых и частичных разрядов, *что позволяет* обеспечить заданные метрологические характеристики измерительных каналов. (п. 6)

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке метода

бесконтактного акустического контроля комплектных распределительных устройств, дополняющего теорию возникновения и распространения акустических сигналов частичных и дуговых разрядов в различных режимах работы электрооборудования, что создаёт основу для новых диагностических алгоритмов и оценки состояния КРУ.

Практическая значимость работы заключается в: разработке ИИС непрерывной акустической диагностики электрооборудования ячеек КРУ 6-10 кВ, обеспечивающей раннее автономное выявление дефектов; применении устройства и способа защиты для одновременной диагностики электрооборудования; программно-аппаратном обеспечении обработки измерительной информации; методике контроля работоспособности измерительных каналов ИИС на основе периодической подачи тестовых сигналов.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы математического анализа, методы статистики, методы математического и численного моделирования, цифровой обработки сигналов и спектрального анализа, натурный эксперимент, положения теории волновых процессов и акустических колебаний, а также методы неразрушающего контроля.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Метод бесконтактного акустического контроля ячеек КРУ 6-10 кВ, обеспечивающий одновременный непрерывный мониторинг всех элементов ячейки КРУ без участия обслуживающего персонала.

2. Метод кластеризации спектральной плотности мощности акустических сигналов с применением метода главных компонент, формирующий режимно-диагностическую карту и позволяющий достоверно классифицировать состояние ячейки КРУ.

3. Информационно-измерительная система непрерывной акустической диагностики ячеек КРУ, включающая структурные и функциональные решения, аппаратный модуль предварительной обработки данных и программно-аппаратное обеспечение, реализующие автоматическое выявление частичных и дуговых разрядов на ранней стадии их развития.

4. Методика контроля работоспособности измерительных каналов ИИС на основе периодической подачи тестовых сигналов, сформированных по параметрической модели акустических сигналов разрядов, обеспечивающая требуемые метрологические характеристики и повышающая надёжность диагностики.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационное исследование соответствует научной специальности 2.2.11 «Информационно-измерительные и управляющие системы» по п. 3 «Математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительных и управляющих систем», по п. 6 «Методы анализа, диагностики, идентификации и управления техническим состоянием информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта».

Достоверность результатов исследования

Достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертационной работе, обеспечивается корректным использованием математических методов, использованием в теоретических построениях общепризнанных законов, соблюдением действующих стандартов. Теоретические положения подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Полученные результаты не противоречат известным положениям в данной области исследований и подтверждаются публикациями в рецензируемых научных журналах.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в том числе на II, III, IV, V, IV Всероссийской конференции «Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации (г. Белебей, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 гг.), I, II, III Всероссийской конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация» (г. Липецк, 2020, 2021, 2022 гг.), I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Развитие методов прикладной

математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (г. Ульяновск, 2021), Международной научно-практической конференции «Автоматизация, телекоммуникации, информационные технологии и программное обеспечение 2025 (ATITS 2025)» (Ялта, 2025 г.).

Реализация результатов исследований

Результаты научных исследований, проведенных в диссертационной работе, применены в работе АО «ГК «Электрошит» – ТМ Самара», ООО «Башкирэнерго» производственное отделение «Белебеевские электрические сети» и ЗАО «Самарские городские электрические сети», кроме того, результаты исследований внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 12.03.01 и 12.04.01 «Приборостроение».

Публикации

По результатам выполненного исследования опубликовано 14 работ, из них 3 в научных изданиях из перечня ВАК РФ, а также получено 2 патента на изобретение.

Личный вклад автора

Все работы по тематике диссертационной работы выполнены автором или при его непосредственном участии. В публикациях, выполненных в соавторстве, автору принадлежат следующие результаты. В работах [1,2] – реализация экспериментальной установки, аппаратного и программного обеспечения ИИС, проведение экспериментов, обработка и статистический анализ данных, верификация результатов и формулирование выводов; [3] – структуры алгоритма, базы данных, программного обеспечения для обработки акустических сигналов; [4] – методика исследования звукового излучения контактных соединений распределительных устройств подстанций; [5,6,9,10] – алгоритмы обработки акустических сигналов электрооборудования КРУ, реализация программных модулей регистрации, анализа и визуализации; [7,8] – структура экспериментальных стендов, схемотехника и узлы измерительных каналов, параметрическая модель акустических сигналов; [11] – анализ причин отключения комплектных распределительных устройств; [12] – оценка современных методов мониторинга и диагностики методом анализа иерархий; [13] – методика контроля работоспособности измерительных каналов ИИС непрерывной диагностики КРУ электрических подстанций; [14] – метод бесконтактного акустического контроля ячейки КРУ 6-10 кВ; [15,16] – устройство и способ защиты от дуговых и частичных разрядов;

Структура диссертации

Диссертация изложена на 154 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 145 наименований, содержит 55 рисунков, 24 таблицы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи исследования, характеризуется научная новизна полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ причин отключения КРУ по протоколам обследований ряда производственных предприятий в период 2011-2023 гг. Показано, что в практике распределительных сетей наибольшее распространение получили КРУ класса напряжения 6-10 кВ. Выявлены основные виды повреждений и причины отказов электрического оборудования (рис. 1), проблемы своевременного обнаружения дефектов на этапе предаварийного состояния. Показано, что повреждения, вызванные дуговыми и частичными разрядами, занимают около 49 % от общего количества повреждений.

Рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов обнаружения частичных и дуговых разрядов. Отмечено, что все методы, кроме тепловых, не позволяют производить бесконтактную диагностику электрооборудования без вывода из эксплуатации КРУ, при этом тепловые бесконтактные методы требуют непрерывного присутствия персонала и позволяют проводить исключительно точечную диагностику отдельных элементов КРУ. Для обеспечения непрерывного бесконтактного мониторинга, многоэлементного контроля одним датчиком, обнаружения дефектов на ранней стадии их

развития предложено применение бесконтактного акустического метода.

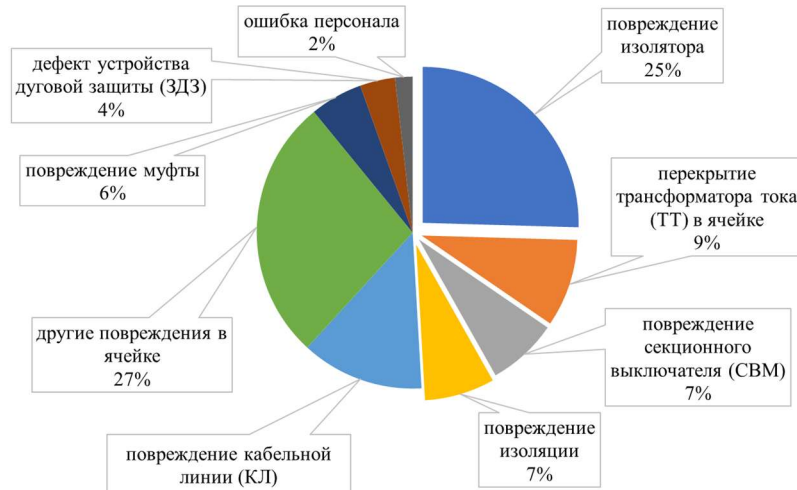


Рисунок 1 – Основные виды повреждений электрического оборудования КРУ

Анализ существующих ИИС, реализованных преимущественно в переносных вибро- и акустических приборах, показал их ограниченную применимость для непрерывного мониторинга ячеек КРУ под напряжением из-за необходимости присутствия персонала и невозможности одновременного многоэлементного контроля.

Приведены результаты экспертной оценки групп диагностических методов применительно к КРУ методом анализа иерархии. Экспертная оценка проводилась по данным предприятий: АО «ГК «Электроцит» – ТМ Самара», АО «Самарская сетевая компания», ПО «Белебеевские электрические сети» ООО «Башкирэнерго». Выявлено, что предпочтительным методом исследования является бесконтактный акустический метод.

В рамках анализа существующих методов и средств мониторинга и диагностики КРУ проведен патентный обзор конструктивных схем и способов их защиты от частичных и дуговых разрядов. Показана необходимость разработки нового подхода к проведению мониторинга и диагностики КРУ, а также необходимость применения телеметрических методов непрерывного мониторинга, которые позволяют выявлять возникновение дефектов на ранних стадиях, предотвращая аварийные ситуации на подстанциях.

Во второй главе разработаны методика проведения исследования и экспериментальная установка для получения первичных данных о характере акустического сигнала от КРУ 6-10 кВ, его интенсивности и частоте. Экспериментальные исследования проводились в ячейках серий К-59, К-61, К-63, К-70 производства АО «ГК «Электроцит» – ТМ Самара». Представлены структурная схема экспериментальной установки для проведения исследования и сбора данных акустических сигналов (рис. 2), а также разработанный прототип датчика с обоснованием места его размещения в ячейке КРУ для проведения эксперимента.

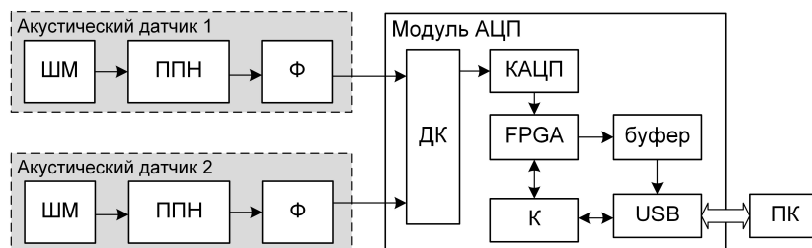


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки: ШМ – широкополосный микрофон, ППН – блок предварительного повышения напряжения, Ф – фильтр, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ДК – динамический коммутатор, КАЦП – конвейерное АЦП, FPGA – поле-программируемая логическая интегральная схема, К – контроллер, USB – USB контроллер, ПК – персональный компьютер

Оценка погрешности акустического датчика определена при проведении калибровки в лабораторных условиях с помощью многофункционального акустического калибратора компании BRÜEL & KJÆR типа 4226. Относительная погрешность измерения частоты сигнала в диапазоне от 125 Гц до 16 кГц (диапазон измерения акустического калибратора типа 4226) не превышает 1,3%, что согласно ГОСТ 17187-81, ГОСТ 8.257-84, ГОСТ 17187-2010, подтверждает высокую точность измерений. Погрешностями АЦП и акустического калибратора можно пренебречь в виду их малой величины.

Проведена параметрическая идентификация и верификация математической модели акустического сигнала в нормальном, предаварийном и аварийном режимах с определением матрицы коэффициентов, позволяющих воспроизвести сигнал.

Показано, что гармонический анализ, базирующийся на принципе суперпозиции синусоидальных колебаний, позволяет представить сигнал $U(t)$ в следующем виде:

$$U(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) + n(t), \quad (1)$$

где A_k, f_k, φ_k – амплитуда, частота и фаза k -й гармоники, $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$ – аддитивный гауссовский шум, σ^2 – дисперсия шума.

Определены амплитуды, частоты и сдвиги фаз всех видов гармоник, присутствующих в акустическом сигнале для каждого из трех состояний КРУ 6-10 кВ. Приведены результаты полученных расчетов (рис. 3-5).

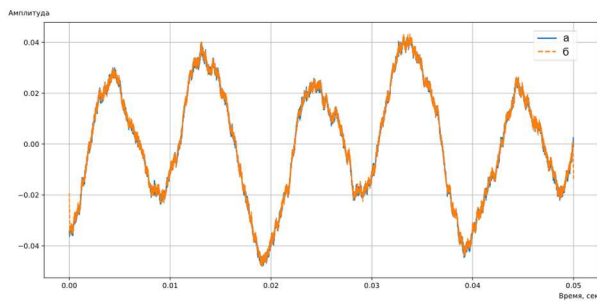


Рисунок 3 – Сопоставление исходного (а) и реконструированного (б) сигналов для нормального режима работы КРУ

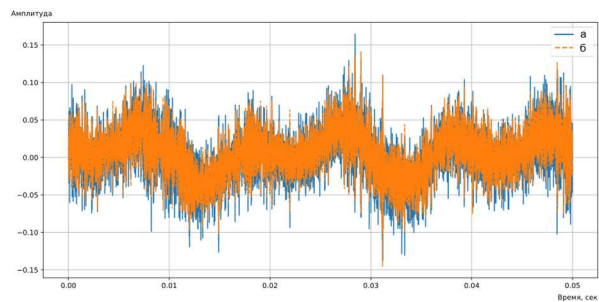


Рисунок 4 – Сопоставление исходного (а) и реконструированного (б) сигналов для предаварийного режима работы КРУ

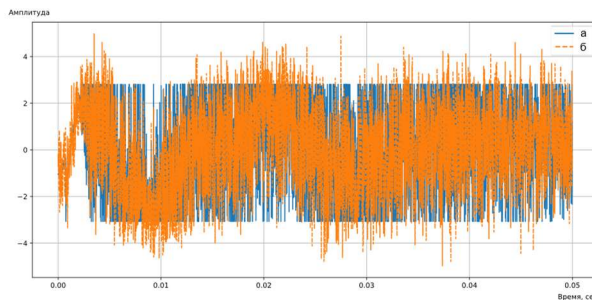


Рисунок 5 – Сопоставление исходного (а) и реконструированного (б) сигналов для аварийного режима работы КРУ

Рассчитаны статистические критерии верификации математической модели акустического сигнала. Верификация математической модели показала её точность и пригодность для практического применения. Величины статистических критериев находятся в пределах граничных значений.

В третьей главе разработан метод кластеризации диапазонов изменения СПМ акустического сигнала для каждого режима работы оборудования (нормального, предаварийного, аварийного), позволяющий классифицировать состояние ячейки КРУ 6-10 кВ и определять его принадлежность к одному из режимов: нормальному, предаварийному или аварийному.

Проведен спектральный анализ полученных с акустических датчиков сигналов, излучаемых электрооборудованием ячеек КРУ 6-10 кВ на основе прямого дискретного преобразования Фурье СПМ сигналов. Для этого определены коэффициенты ряда Фурье $U(k)$ с использованием оконной функции Хемминга $w(n)$ периодической последовательности $u(n)$, которые описываются выражением:

$$U_W(f_k, N) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n\Delta T) \cdot u(n\Delta T) \cdot e^{-j\frac{2\pi f_k n}{N}}, \quad (2)$$

где k – номер гармоники, $n = 0, 1, \dots, N-1$ – номер отсчета, $2\pi/N$ – основная частота, ΔT – интервал дискретизации,

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right). \quad (3)$$

СПМ сигнала определена выражением:

$$S_W(f_k, N) = \frac{\Delta T}{NW} |U_W(f_k, N)|^2, \quad (4)$$

где W – мощность оконной функции.

Получены СПМ сигналов для КРУ в нормальном, предаварийном и аварийном режимах (состояниях). Типовой вид распределения спектральной плотности мощности сигнала представлен на рис. 6.

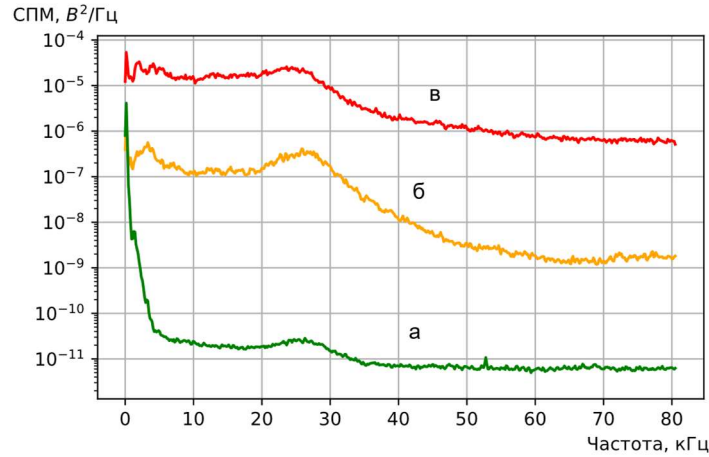


Рисунок 6 – Типовой вид распределения СПМ сигнала в нормальном (а), предаварийном (б) и аварийном (в) состояниях КРУ

Выявлено, что величины СПМ сигналов для различных режимов КРУ имеют отличия на разных частотах. Определены три ключевых значения СПМ, соответствующих частотам 20, 30, 40 кГц, отражающих наличие или отсутствие дефекта.

В целях исключения помех, а также выделения необходимой для получения ключевых значений СПМ полосы частот, синтезирован полосовой фильтр второго порядка с полосой ± 3 кГц вокруг каждой ключевой частоты, описываемый передаточной функцией для непрерывных сигналов:

$$T(s) = \frac{\frac{K_{рез} \cdot \omega_0}{Q_F} \cdot s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q_F} \cdot s + \omega_0^2}, \quad (5)$$

где $K_{рез} = 1$ – коэффициент передачи на центральной частоте ω_0 , s – оператор Лапласа, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, Q_F – добротность фильтра:

$$Q_F = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (6)$$

где ω_1 и ω_2 – частоты, при которых коэффициент передачи снижается на -3 дБ по сравнению с $K_{рез}$.

Для цифровой реализации используется преобразование Тастина:

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{z-1}{z+1}, \quad (7)$$

где $T_s = 1/F_s$ – период дискретизации, F_s – частота дискретизации сигнала.

В частном случае для центральной частоты $\omega_0=20$ кГц, на диапазоне частот $\omega_1=17$ кГц, $\omega_2=23$ кГц с частотой дискретизации $F_s=100$ кГц для дискретного сигнала выражение (6) принимает вид:

$$T_1(z) = \frac{0.16 + 0.16z^{-2}}{1 - 0.53z^{-1} + 0.68z^{-2}}, \quad (8)$$

Для частоты $\omega_0=30$ кГц, на диапазоне частот $\omega_1=27$ кГц, $\omega_2=33$ кГц:

$$T_2(z) = \frac{0.16 - 0.16z^{-2}}{1 + 0.53z^{-1} + 0.68z^{-2}}, \quad (9)$$

Для частоты $\omega_0=40$ кГц, на диапазоне частот $\omega_1=37$ кГц, $\omega_2=43$ кГц:

$$T_3(z) = \frac{0.16 - 0.16z^{-2}}{1 + 1.38z^{-1} + 0.68z^{-2}}, \quad (10)$$

Таким образом, определены фильтры для центральных частот, являющихся определяющими для выявления текущего состояния электрооборудования.

На основании передаточных функций $T_1(z)$, $T_2(z)$, $T_3(z)$, записано $y_1(n)$, $y_2(n)$, $y_3(n)$. Получена энергия для каждого значения центральной частоты:

$$E(k) = \sum_{n=0}^{N-1} |y_k(n)|^2, \quad (11)$$

где

$$y_k(n) = u(n) \cdot T_k(z), \quad (12)$$

$u(n)$ – входной сигнал, $T_k(z)$ – передаточная функция для центральной частоты ω_0 .

Вид распределения СПМ сигнала после применения фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) 2 порядка показан на рис. 7.

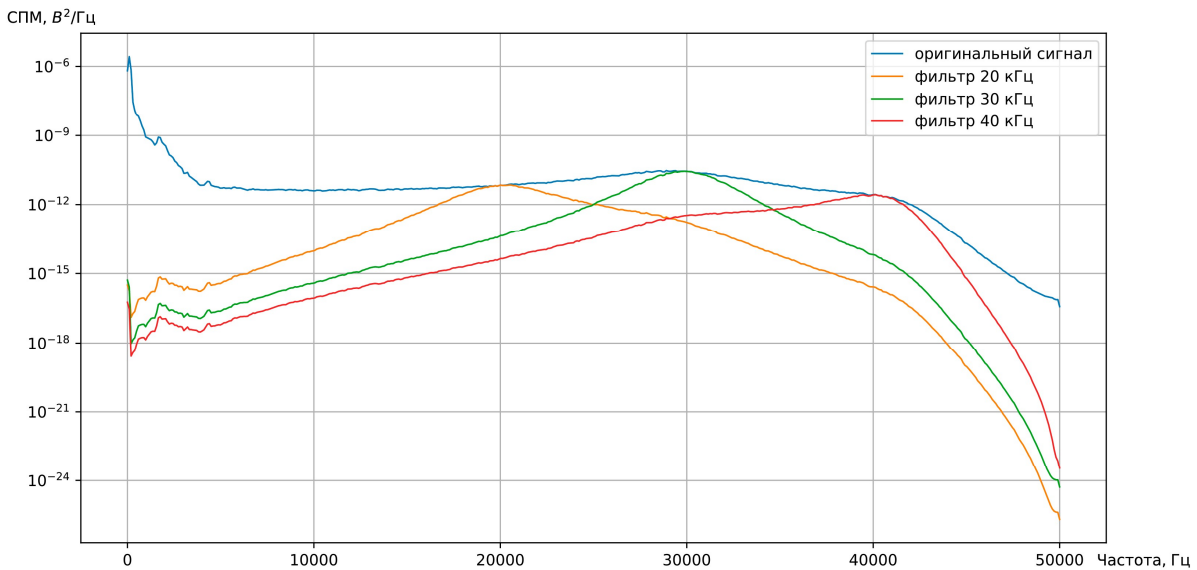


Рисунок 7 – Спектральная плотность мощности сигнала после применения БИХ фильтра 2 порядка.

По результатам спектрального анализа и применения БИХ фильтра 2 порядка, получены графики СПМ с выделением ключевых значений на частотах 20, 30 и 40 кГц.

Определена ширина диапазона (области) изменения СПМ и построены графики плотности распределения СПМ в форме кластерного графа (рис. 8). Здесь нормальный режим работы КРУ характеризуется узкими диапазонами, в то время как предаварийный и аварийный режимы имеют более широкие диапазоны, которые указывают на появление дефектов в работе КРУ. Визуальное представление данных позволяет сравнивать и анализировать диапазоны изменения СПМ между режимами.

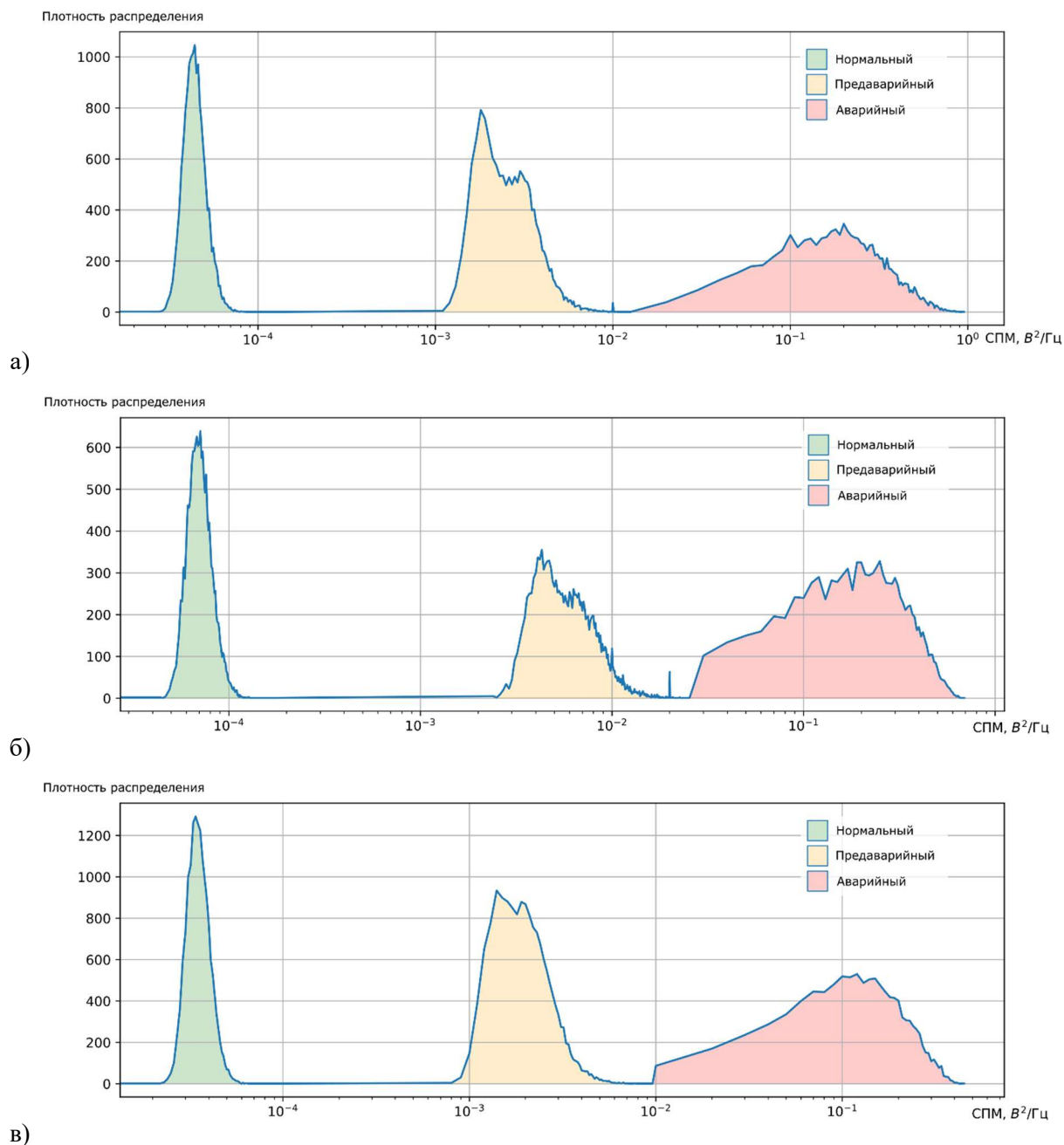


Рисунок 8 – Кластерный граф, описывающий графическое представление диапазона изменения СПМ сигнала для 20 кГц (а), 30 кГц (б) и 40 кГц (в) в логарифмическом масштабе

На основе метода кластеризации разработана режимно-диагностическая карта, представленная в табл. 1. Эти диапазоны служат основным критерием для разработки алгоритмов работы ИИС.

Таким образом, для получения ширины диапазона изменения СПМ сигнала проведен анализ данных СПМ на трех ключевых значениях, полученных после применения БИХ фильтра 2 порядка.

Таблица 1 – Режимно-диагностическая карта

№ п/п	Режим КРУ 6-10 кВ	Частота, кГц	Диапазон изменения СПМ сигнала, В ² /Гц
1	Нормальный	20	$2,79 \cdot 10^{-5} - 8,17 \cdot 10^{-5}$
		30	$4,42 \cdot 10^{-5} - 1,29 \cdot 10^{-4}$
		40	$2,17 \cdot 10^{-5} - 6,46 \cdot 10^{-5}$
2	Предаварийный	20	$1,08 \cdot 10^{-3} - 9,63 \cdot 10^{-3}$
		30	$2,44 \cdot 10^{-3} - 1,88 \cdot 10^{-2}$
		40	$7,80 \cdot 10^{-4} - 6,79 \cdot 10^{-3}$
3	Аварийный	20	$1,24 \cdot 10^{-2} - 9,53 \cdot 10^{-1}$
		30	$2,48 \cdot 10^{-2} - 6,73 \cdot 10^{-1}$
		40	$9,88 \cdot 10^{-3} - 4,53 \cdot 10^{-1}$

Определение текущего состояния ячейки КРУ и её соответствия одному из режимов: нормальный, предаварийный, аварийный производится посредством вычисления значений СПМ сигнала на частотах 20, 30 и 40 кГц. При попадании данных значений в соответствующие области изменений СПМ сигнала определяется текущее состояние ячейки.

Проведен анализ уплотнённых спектральных признаков методом главных компонент, показывающий устойчивое разделение трёх режимов КРУ: 3 главные компоненты объясняют 80,24 % дисперсии, облака классов компактны и разнесены (рис. 9). Методы *k*-средних и модель смешанного гауссова распределения формируют три неперекрывающихся кластера, а полученные матрицы ошибок для обоих методов диагональные. Это эквивалентно нулевым ошибкам I и II рода для всех классов. С практической точки зрения это означает, что выбранная признаковая репрезентация и понижение размерности формируют режимно-диагностическую карту, на которой состояния различаются без двусмысленности.

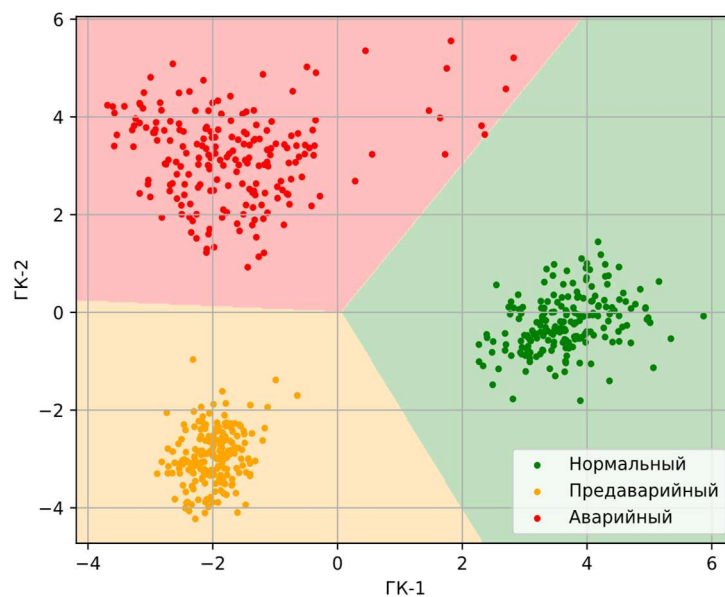


Рисунок 9 – Результаты анализа методом главных компонент

В четвертой главе на основе метода бесконтактного акустического контроля предложены структурная (рис. 10) и функциональная (рис. 11) схемы ИИС непрерывной акустической диагностики КРУ (ИИС НАД КРУ), позволяющие автоматизировать процесс диагностики и непрерывного мониторинга акустических параметров в различных режимах работы комплектных распределительных устройств, отличающиеся предварительной обработкой данных и самоконтроль измерительных каналов внутри ячейки КРУ, обеспечивающей снижение нагрузки на каналы передачи диагностических данных оператору.

ИИС НАД КРУ позволяет организовать непрерывный технологический поток от регистрации акустического поля ячейки до формирования экспертного заключения, сочетая

локальную предварительную обработку и серверный аналитический контур.

Описана реализация двухканальной конфигурации по архитектуре 1oo2 (one-out-of-two), при которой событие фиксируется в случае подтверждения хотя бы одним каналом при одновременной межканальной валидации.

Излучаемый объектом сигнал фиксируется акустическими датчиками, размещёнными в зонах минимального электромагнитного влияния ячейки КРУ. В каждом канале он усиливается прецизионным аналоговым трактом, после чего оцифровывается независимыми 12-разрядными АЦП. Микроконтроллер в реальном времени выполняет расчёт СПМ сигнала, полоса ограничивается программным полосовым фильтром ключевых частот, а результирующие показатели конвертируются в вектор диагностических признаков.

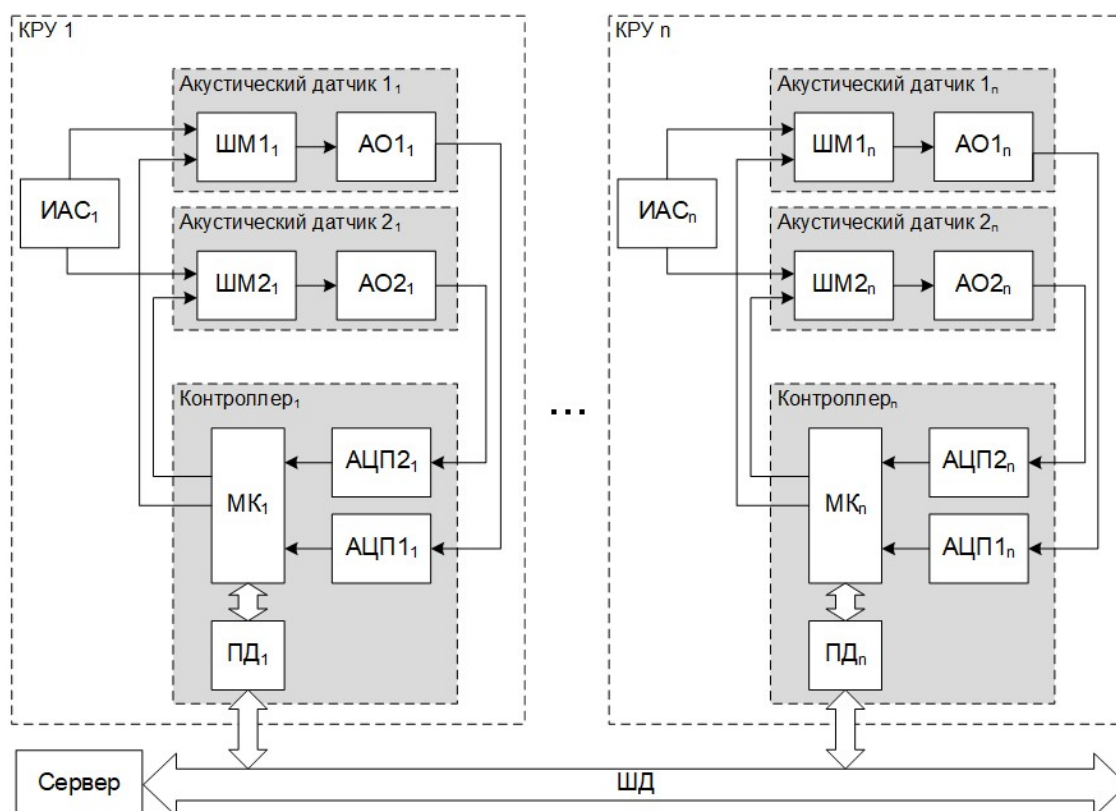


Рисунок 10 – Структурная схема ИИС НАД КРУ: ИАС – источник акустического сигнала; ШМ – широкополосные микрофоны; АО – аналоговый тракт обработки сигнала; АЦП – аналогово-цифровые преобразователи; МК – микроконтроллер; ПД – блок передачи данных; ШД – шина данных

В контроллере реализован блок метрологического контроля, обеспечивающий циклическую подачу эталонных тестовых сигналов для автоматической верификации характеристик измерительного тракта. Тестовые сигналы синтезируются на основе полученной математической модели акустических сигналов для трех состояний КРУ.

Сформированные пакеты передаются по шине данных через модуль связи на сервер, объединяющим функциональные компоненты ИИС, для анализа сигналов, хранения информации в базе данных, а также интерпретации и передачи результатов пользователю в виде отчётов и предупреждений.

Аппаратное обеспечение ИИС НАД КРУ реализовано в соответствии со структурной и функциональной схемами. Основу акустических датчиков составляют широкополосные всенаправленные пьезоэлектрические микрофоны Knowles SPU0410LR5H-QB. Для усиления сигнала используется блок предварительного повышения напряжения, построенный на базе прецизионного операционного усилителя KP140УД17А. Аналогово-цифровой преобразователь MCP3201-CI/P оцифровывает усиленный сигнал с 12-битной точностью через интерфейс SPI. Микроконтроллер PIC24FJ128GC010 выполняет буферизацию,

фрагментацию данных и расчёт спектральной плотности мощности на частотах 20, 30 и 40 кГц, выбранных как индикаторы аномалий. Контроллер объединяет функции обработки и передачи данных, обеспечивая синхронизацию и надёжность системы.

Приёмопередатчик MAX485ESA+T преобразует цифровые данные для передачи по интерфейсу RS-485, что обеспечивает надёжную двустороннюю связь на расстоянии до 1200 м, что соответствует стандартам промышленной эксплуатации. Каналы связи акустических датчиков с контроллером имеют дополнительное экранирование, что позволяет обеспечить помехозащищённость.

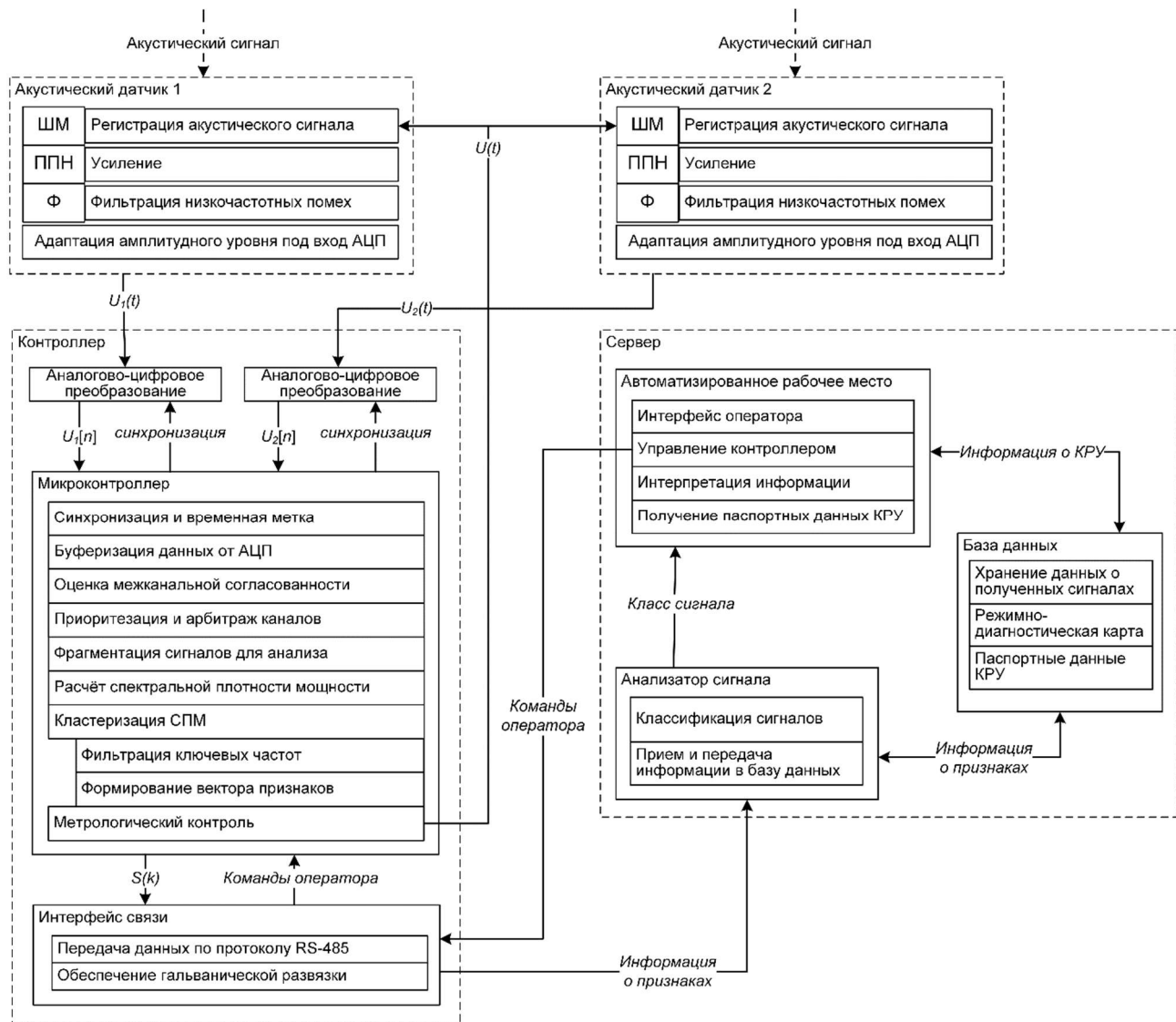


Рисунок 11 – Функциональная схема ИИС НАД КРУ

Разработана методика обеспечения непрерывной метрологической достоверности бесконтактного акустического мониторинга КРУ на основе регулярной самопроверки каналов с подачей тестовых сигналов, синтезированных по параметрической модели частичных и дуговых разрядов. Самоконтроль реализован встроенным блоком метрологического контроля, интегрированным в контроллер и связан с блоком управления и буфером данных, что позволяет циклически проверять тракт без остановки мониторинга. Методика включает генерацию эталонов, сопоставление амплитуд и СПМ на ключевых частотах с эталонами, автоматическую калибровочную коррекцию при выходе за допуски и сохранение результатов. Пакеты самоконтроля и метаданные передаются на сервер и учитываются подсистемой интерпретации для оперативной маркировки каналов и выдачи рекомендаций.

Разработан алгоритм обработки акустических сигналов в ИИС мониторинга и

диагностики КРУ на основе предложенного бесконтактного метода акустического контроля (рис. 12), который строится на модульной архитектуре, интегрирующей аппаратные и программные компоненты.

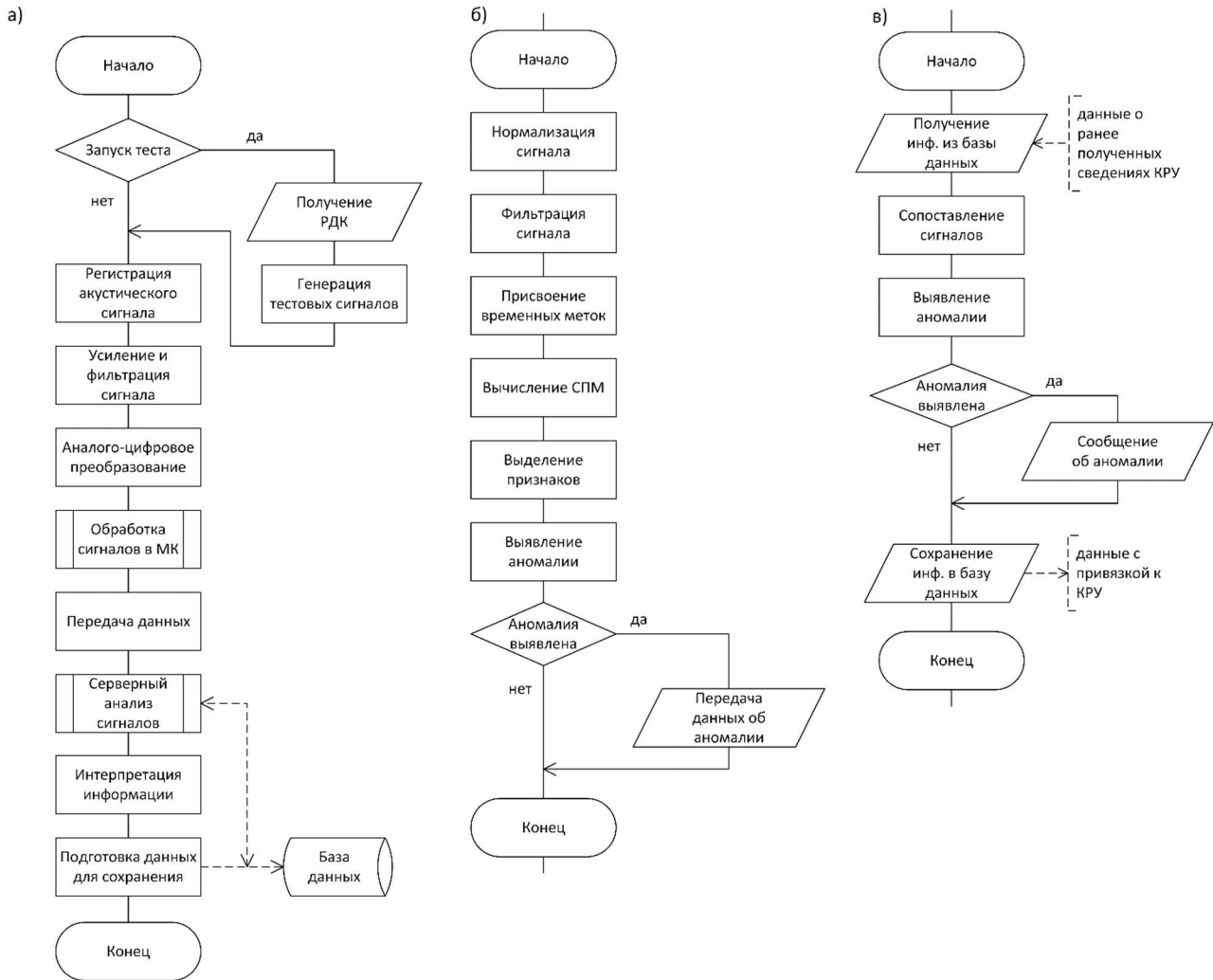


Рисунок 12 – Алгоритм обработки данных в ИИС НАД КРУ: основной алгоритм (а), процедура обработки сигнала в микроконтроллере (б), процедура серверного анализа (в)

С учетом специфики применяемых методов спектрального анализа обработки акустических сигналов выполнена оценка методической и инструментальной погрешностей для метрологической модели разработанной ИИС, использующей метод спектрального анализа – дискретное преобразование Фурье с окном Хемминга для обработки акустических сигналов.

Для систематизации и анализа влияния погрешностей построена структурная модель измерительного канала ИИС НАД КРУ (рис. 13).

Суммарная инструментальная погрешность системы $\delta_{\text{СУММ}}$ определяется квадратурным суммированием всех видов искажений

$$\delta_{\text{СУММ}} = \sqrt{\delta_{\text{Д}}^2 + \delta_{\text{У}}^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2 + \delta_{\text{МК}}^2 + \delta_{\text{К}}^2}, \quad (13)$$

что даёт наиболее адекватную оценку совокупного вклада каждого элемента. Здесь: $\delta_{\text{Д}}$ – погрешность акустического датчика, связанная с чувствительностью датчика, уровнем шумов и нелинейными искажениями; $\delta_{\text{У}}$ – погрешность усилительного тракта обусловлена характеристиками усилителя, включая коэффициент усиления, уровень шумов и нелинейные искажения; $\delta_{\text{АЦП}}$ – погрешность АЦП связана с разрешением, квантованием и динамическим диапазоном АЦП; $\delta_{\text{МК}}$ – погрешность микроконтроллера возникает при обработке и передаче данных, связана с внутренними алгоритмами цифровой обработки сигнала; $\delta_{\text{К}}$ – погрешность

передачи цифровых данных включает ошибки, возникающие при передаче информации по интерфейсам связи.

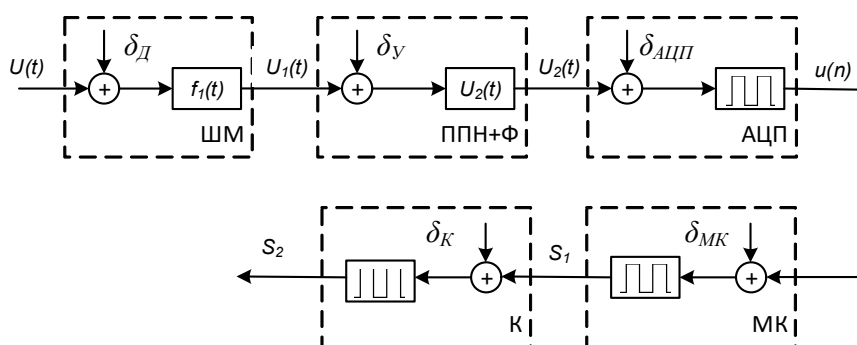


Рисунок 13 – Структурная модель измерительного канала ИИС

Методическая погрешность программы анализа сигнала оценивается на уровне 2,5 %, инструментальная погрешность измерительного канала составляет 4,23 %.

Предложены рекомендации по применению метода бесконтактного акустического контроля в системе защиты ячеек КРУ 6-10 кВ от частичных и дуговых разрядов, позволяющие принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию оборудования ячеек КРУ 6-10 кВ, а также снизить аварийность электрооборудования в среднем за год на 48,1 %.

На примере данных предприятия ООО «Башкирэнерго» производственное отделение «Белебеевские электрические сети» проведен анализ применения разработанной ИИС НАД КРУ, позволяющей предотвратить аварийные ситуации, возникающие по причинам дуговых и частичных разрядов. Результаты исследования приведены на рис. 14.

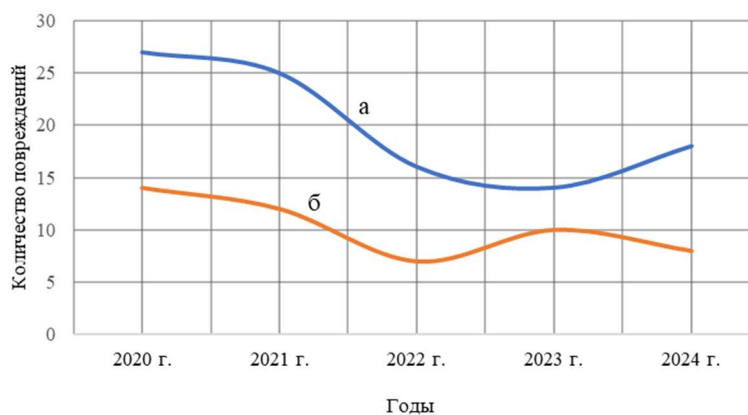


Рисунок 14 – Аварийность электрооборудования КРУ 6-10 кВ до (а) и после (б) применения ИИС НАД КРУ

Представленные данные свидетельствуют о выраженном снижении количества повреждений после внедрения ИИС НАД КРУ, что указывает на достижение существенного эффекта от применения предлагаемого технического решения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе:

1. На основе анализа 128 аварийных отчётов сформирован перечень дефектов с ранжированием по критичности: повреждения изоляторов 25 %, секционных выключателей 7 %, дефекты изоляции ячейки ≈ 7 %, перекрытия трансформаторов тока ≈ 9 %. Установлено, что все указанные категории связаны с частичными и дуговыми разрядами. Для обеспечения непрерывной диагностики, многоэлементного контроля с одного датчика, обнаружения дефектов на ранней стадии их развития предложено применение метода бесконтактного акустического контроля. На основе анализа экспертной оценки групп диагностических методов применительно к КРУ методом анализа иерархии, выявлено, что наилучшим методом

диагностики КРУ является метод бесконтактного акустического контроля с глобальным приоритетом 0,173.

2. Проведена параметрическая идентификация математической модели акустического сигнала (в нормальном, предаварийном и аварийном режимах работы КРУ), которая описывает возникающие в КРУ частичные и дуговые разряды, с определением матрицы коэффициентов, позволяющих воспроизвести сигнал. Осуществлена верификация модели, демонстрирующая её адекватность и пригодность для практического применения. Величины статистических критериев находятся в пределах граничных значений: коэффициент детерминации R^2 не превышает 0,86; критерий Дарбина-Уотсона – 1,5.

3. Предложен метод бесконтактного акустического контроля в круглосуточном автоматическом режиме без участия персонала, в котором два широкополосных датчика устанавливаются в зонах минимального электромагнитного воздействия и обеспечивают одновременную регистрацию сигналов от всех элементов отсека ячейки КРУ 6-10 кВ.

4. Разработан метод кластеризации СПМ акустических сигналов, формирующий режимно-диагностическую карту, определяющий границы диапазонов изменений СПМ акустического сигнала на ключевых частотах 20, 30 и 40 кГц, позволяющий классифицировать состояние ячейки КРУ 6-10 кВ и выявлять его принадлежность к одному из режимов: нормальному, предаварийному или аварийному.

5. Сформирована методика оперативной проверки измерительных каналов ИИС, предусматривающая регулярную подачу тестовых акустических сигналов, синтезированных по параметрической модели разрядов; такой самоконтроль поддерживает исправность измерительного тракта.

6. На основе предложенного метода бесконтактного акустического контроля разработана ИИС непрерывной акустической диагностики ячеек КРУ, позволяющая автоматизировать процесс контроля электрических параметров в различных режимах работы КРУ и выявлять дефекты на ранней стадии их появления. Алгоритмическое, программно-аппаратное обеспечение ИИС, позволяет производить бесконтактную диагностику электрооборудования без вывода из эксплуатации КРУ. Проведен метрологический анализ. Итоговая суммарная методическая погрешность программы анализа сигнала оценивается на уровне 2,5 %, инструментальная погрешность измерительного канала составляет 4,23 %.

7. Предложены рекомендации по применению метода бесконтактного акустического контроля в системе защиты ячеек КРУ 6-10 кВ от частичных и дуговых разрядов, позволяющие принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию оборудования ячеек КРУ 6-10 кВ и снижать аварийность электрооборудования в среднем за год на 48,1 %.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ

1. **Фролов, К. В.** Экспериментальное исследование информационных параметров акустического шума / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2024. – № 2 (48). С. 25-31.

2. **Фролов, К. В.** Создание информационно-измерительной системы защиты от дуговых и частичных разрядов в комплектных распределительных устройствах подстанций / К. В. Фролов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2024. – № 2 (73). – С. 17-30.

3. **Фролов, К. В.** Алгоритмическая обработка акустических сигналов для выявления предаварийных и аварийных состояний комплектных распределительных устройств / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2025. – Т. 33, № 3. – С. 111-120.

Публикации в других изданиях

4. Инаходова, Л. М. Исследование звукового излучения контактных соединений распределительных устройств подстанций / Л. М. Инаходова, **К. В. Фролов** // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – № 4(66). – С. 26-32. – DOI 10.53015/18159958_2021_4_26.
5. **Фролов, К. В.** Ультразвуковой метод обнаружения дефектов контактных соединений алюминиевых проводников высоковольтного оборудования / К. В. Фролов // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации: Сборник статей по материалам второй Всероссийской научно-практической конференции, Белебей, 21 апреля 2021 года. – Белебей: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 75-78.
6. **Фролов, К. В.** Обработка информации от ультразвукового детектора для выявления нарушений контактных соединений алюминиевых проводников на распределительных устройствах подстанции / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : Материалы I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ульяновск, 06–07 октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 162-164.
7. Инаходова, Л. М. Применение акустического детектора для определения дефектов контактных соединений силового электрооборудования / Л. М. Инаходова, **К. В. Фролов** // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация» (15-17 декабря 2021): сборник трудов конференции [Электронный ресурс] – Электр. текст. данные. Липецк: ЛГТУ, 2021.
8. **Фролов, К. В.** Акустические исследования дефектов высоковольтных изоляторов / К. В. Фролов, А. О. Крылов // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : Сборник статей по материалам третьей Всероссийской научно-практической конференции, Белебей, 27 апреля 2022 года. Том 1. – Белебей: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 65-66.
9. **Фролов, К. В.** Метод определения неисправности электрических изоляторов / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Энергетика будущего – цифровая трансформация : Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции, Липецк, 14-15 декабря 2022 года. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. С. 48-52.
10. Инаходова, Л. М. Анализ диагностических сигналов высоковольтного оборудования, полученных акустическим методом / Л. М. Инаходова, А. О. Крылов, **К. В. Фролов** // Сборник статей по материалам четвертой Всероссийской научно-практической конференции «Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации». – Белебей: Самарский государственный технический университет, 2023. – С. 102-104.
11. **Фролов, К. В.** Анализ причин отключения комплектных распределительных устройств / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : Сборник статей по материалам пятой Всероссийской научно-практической конференции, Белебей, 24 апреля 2024 года. – Белебей: Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 30-32.
12. **Фролов, К. В.** Применение метода анализа иерархий для оценки современных методов мониторинга и диагностики / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : Сборник статей по материалам шестой Всероссийской научно-практической конференции, Белебей, 16 апреля 2025 года. – Белебей: Самарский государственный технический университет, 2025. – С. 92-95.
13. **Фролов, К. В.** Применение метода бесконтактного акустического контроля для одновременной диагностики электрооборудования отсека ячейки КРУ 6-10 кВ / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Автоматизация, телекоммуникации, информационные технологии и программное обеспечение 2025 (ATITS 2025) : Материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 28-31 октября 2025 года. – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2025. – С. 112-118.

14. **Фролов, К. В.** Разработка методики контроля работоспособности измерительных каналов ИИС непрерывной диагностики КРУ электрических подстанций / К. В. Фролов, Л. М. Инаходова // Автоматизация, телекоммуникации, информационные технологии и программное обеспечение 2025 (ATITS 2025) : Материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 28-31 октября 2025 года. – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2025. – С. 119-122.

Патенты Российской Федерации

15. Патент № 2815081 С1 Российская Федерация. Устройство защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л. М., Цынаева А. А., Фролов К. В. № 2023122367 ; заявл. 29.08.2023 ; опубл. 11.03.2024.

16. Патент № 2815919 С1 Российская Федерация. Способ защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л. М., Цынаева А. А., Фролов К. В. № 2023129149 ; заявл. 10.11.2023 ; опубл. 25.03.2024.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 7 от «25» декабря 2025 г.)

Тираж 100 экз. Заказ № 399.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Отпечатано в типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244