

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

На правах рукописи



Абидова Елена Александровна

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС
ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О НЕЛИНЕЙНЫХ И
ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информационные и управляющие системы» Волгодонского инженерно-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

Плотников Дмитрий Александрович

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», профессор кафедры «Автоматика и телемеханика».

Щербаков Максим Владимирович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», зав. кафедрой «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования».

Барабанов Владимир Федорович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», и. о. заведующего кафедрой «Автоматизированных и вычислительных систем».

Семенов Анатолий Дмитриевич

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология».

Защита диссертации состоится «18» июня 2025 г. в 15 часов на заседании диссертационного на заседании диссертационного совета МИФИ.2.03 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте: <http://ds.mephi.ru>

Автореферат разослан «__» 2025 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенных печатью организации.

Ученый секретарь

диссертационного Совета МИФИ.2.03

кандидат физико-математических наук, доцент



Климанов С.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации разработаны теоретические положения, направленные на решение научно-практической проблемы идентификации состояния электромеханического оборудования, имеющей чрезвычайно важное хозяйственное значение в условиях действующей АЭС.

Актуальность темы исследования. Для обеспечения безопасности АЭС реализуется диагностическое сопровождение оборудования. Причем, большая часть работ относится к диагностике электромеханического оборудования и производится в период планово-предупредительных ремонтов (ППР). К электромеханическому оборудованию относятся механизмы системы управления и защиты (СУЗ) реакторной установки, механизмы систем регулирования среды в технологических контурах АЭС и др. Отказ ответственного оборудования может стать причиной простоя энергоблока. По данным АО «Концерн Росэнергоатом» простой энергоблока АЭС приводит к убыткам, связанным с недовыработкой электроэнергии на сумму около 75 000 000 рублей в сутки.

Особенностью диагностического сопровождения является возможность полноценного контроля технического состояния в период плановой остановки блока для перегрузки топлива. На большинстве российских энергоблоков с водо-водяными энергетическими реакторами осуществлён переход с 12-месячного на 18-месячный топливный цикл, планируется переход на 24-месячный. В период ППР по результатам диагностирования обосновывают возможность безотказной работы на ближайший межремонтный период, либо необходимость обслуживания. Таким образом, актуальной проблемой является ранняя идентификация зарождающихся дефектов электромеханического оборудования АЭС.

Следует отметить, что существующие системы функциональной диагностики сложного механического оборудования ориентированы на идентификацию явных признаков неисправностей, опираясь на превышение диагностическими параметрами пороговых значений. Обоснование пороговых значений требует большого объема эмпирических данных, которые не всегда доступны. Внедренные системы нуждаются в доработке, но без комплексного анализа их эффективности затруднительно выработать стратегию их совершенствования.

Для решения данных проблем в основу обработки диагностической информации должны быть положены методы идентификации зарождающихся дефектов, для реализации которых достаточно сведений о параметрах нормальной эксплуатации оборудования. Системный анализ эффективности проектируемых диагностических комплексов должен предшествовать их окончательной инженерной реализации и внедрению.

Степень разработанности темы исследования. Концепция системного анализа социотехнических объектов, предложенная Э. Тристом и К. Бэмфортом, развитая в работах Ф. Эмери предполагает совместную оптимизацию технических и человеческих факторов. Данный подход

применительно к синтезу систем диагностики оборудования АЭС предполагает всесторонний анализ проблем эксплуатации объектов диагностирования.

Анализ закономерности деградации электромеханического оборудования отражен в трудах многих авторов – Ф.Я. Балицкого, М.Д. Генкина и др. На базе изложенной теории возможно построение моделей, обосновывающих методы обработки диагностической информации. При этом следует учитывать, что в рамках проблематики настоящей работы востребованы модели зарождающихся дефектов, отличающиеся от известных описаний явных признаков деградации.

Широко применяемый подход к анализу диагностической информации – статистическая обработка данных. Данный подход закреплён в методиках диагностики электроприводного оборудования (А.К. Адаменков, В.И. Павелко и др.), различных нормативных документах. Также широко применяются методы частотного анализа (спектральный, кепстральный анализ, вейвлет-анализ). Особенности применения методов данной группы к диагностическим сигналам представлены в работах А.В. Баркова, Г.Ш. Розенберга и др. Недостатком применяемых подходов является то, что они, параметризируя детерминированную составляющую, нечувствительны к нестационарным и хаотическим процессам.

Методы параметризации нестационарных процессов, представлены в фундаментальных трудах Э.Н. Лоренца, К.Э. Шеннона. Вклад в изучение нестационарной составляющей диагностической информации путем её визуализации внесли М.М. Закричная, А.Т. Скойбеда. Исследования нестационарных процессов имеют частный характер. Актуальной проблемой является синтез систем диагностики, реализующих повышение эффективности обработки информации за счет идентификации структуры исследуемых данных, включая нелинейные и хаотические проявления.

Теория синтеза диагностических комплексов как многомерных систем разработана Ю.П. Мухой, А.П. Науменко и др. Комплексы, предназначенные для диагностики электромеханического оборудования, в России производят десятки фирм, наиболее известные из них: научно-технический центр «Диапром» и ООО «Ассоциация ВАСТ». Конкретные инженерные решения, применяемые в современной практике диагностирования оборудования АЭС, описаны в работах В.П. Поварова, В.Н. Никифорова и др. Несмотря на теоретическую и практическую значимость работ данных авторов, оценка эффективности диагностических комплексов как целостных систем остается сложноформализуемой проблемой, которая затрудняет их внедрение. Системный анализ эффективности проектируемых и действующих комплексов востребован для формализации и унификации синтеза перспективных систем диагностики.

Цель: повышение эффективности эксплуатации АЭС путем совершенствования систем диагностики электромеханического оборудования на основе системного анализа диагностической информации

Достижение поставленной цели требует последовательного решения

следующих задач:

1. Исследовать процесс диагностического сопровождения АЭС, обеспечивающего подготовку и принятие решений о возможности безопасной эксплуатации оборудования.
2. Сформулировать критерии, определяющие эффективность диагностических систем, и провести их экспериментальную апробацию.
3. Исследовать закономерности проявлений зарождения и развития дефектов электромеханического оборудования АЭС и разработать модели проявлений дефектов в диагностических параметрах.
4. Провести экспериментальные исследования для обоснования выбора методов обработки диагностической информации, обеспечивающих чувствительность к дефектам электромеханического оборудования.
5. Разработать методы обработки диагностических сигналов, обеспечивающие идентификацию зарождающихся дефектов за счет анализа структуры исследуемых временных рядов.
6. Разработать метод комплексного анализа различных по физической природе диагностических параметров, включая ретроспективные данные.
7. Разработать методы обработки диагностической информации, обеспечивающие идентификацию нелинейных и хаотических проявлений дефектов в диагностическом сигнале и их численную оценку.
8. Исследовать чувствительность разработанных методов обработки диагностических сигналов к признакам зарождающихся дефектов в сравнении с другими сценариями обнаружения отклонений.
9. Формализовать этапы и задачи структурно-параметрического синтеза систем диагностики оборудования АЭС путем оценки альтернативных вариантов синтезируемой системы и обоснования необходимого количества и состава информационных каналов.
10. Провести анализ эффективности систем, достигаемой при использовании разработанных методов обработки диагностической информации.
11. Разработать рекомендации по разработке и совершенствованию многоканальных диагностических комплексов. В соответствии с предложенными рекомендациями разработать системы диагностики оборудования АЭС, провести их апробацию и внедрение в промышленную эксплуатацию.

Объект исследования: социотехническая система диагностического сопровождения оборудования АЭС, обеспечивающая подготовку и принятие решений о возможности безопасной эксплуатации оборудования.

Предмет исследования: закономерности проявления, зарождения и развития дефектов электромеханического оборудования на основе результатов модельных и натурных экспериментов в производственных условиях.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы статистической теории обнаружения, частотного анализа, сингулярного спектрального анализа, построения фазовых траекторий,

энтропийной параметризации, распознавания образов.

Научная новизна. Впервые предложена совокупность моделей, методов и алгоритмов, обеспечивающая создание перспективных систем технической диагностики, включая:

1. Способ оценки достоверности диагностических признаков, реализация которого впервые осуществляется по критерию Уилкоксона, позволяющему обосновать статистическую значимость по выборкам малого объема (п. 3 паспорта специальности).

2. Модели проявлений дефектов оборудования, которые в отличие от существующих моделей, описывающих явные признаки неисправностей, имитируют зарождающиеся дефекты, что позволяет обосновать эффективность методов идентификации зарождающихся и скрытых дефектов (пп. 3, 17).

3. Метод визуализации и анализа закономерностей проявлений зарождения и развития дефектов оборудования, для чего впервые с этой целью используется спектр собственных значений ганкелевой матрицы диагностического сигнала, анализ которого обосновывает концепцию улучшения характеристик систем технической диагностики за счет идентификации структуры исследуемых временных рядов (п. 12).

4. Концепция улучшения характеристик систем технической диагностики, впервые реализующая повышение чувствительности к дефектам электромеханического оборудования за счет методов идентификации изменения структуры исследуемых временных рядов, для реализации которой разработаны:

а) модернизированный метод сингулярного спектрального анализа и модернизированный метод главных компонент, отличающиеся построением эталонного базиса и представлением в нем ретроспективных и анализируемых данных с учетом закономерностей развития дефектов, что обеспечивает идентификацию скрытых дефектов, проявляющихся изменением структуры исследуемых временных рядов (пп. 6, 12);

б) метод анализа фазовых портретов диагностических сигналов, отличающийся совместной обработкой текущей и ретроспективной информации, что обеспечивает раннюю идентификацию нелинейных и хаотических проявлений зарождающихся дефектов в диагностическом сигнале (пп. 6, 12);

в) методы энтропийной параметризации, отличающиеся представлением диагностической информации в виде комплекса параметров, численно характеризующих состояние объекта с учетом нестационарных и хаотических проявлений дефектов в диагностическом сигнале (п. 6).

5. Подход к принятию решения о состоянии оборудования, отличающийся от принятого сравнения исходных параметров с пороговыми значениями сопоставлением проекций параметров исправного и анализируемых состояний в эталонном базисе, обеспечивающий за счет этого повышение чувствительности и снижение ошибок диагностирования (пп. 3, 17).

6. Формализация этапов и задач структурно-параметрического синтеза систем диагностики оборудования АЭС, в рамках которой впервые в качестве главного принципа заложено обоснование количества и состава информационных каналов, обеспечивающих соответствие критериям эффективности диагностирования, что способствует созданию перспективных вариантов систем контроля технического состояния (п. 17).

7. Подход к оценке эффективности диагностических комплексов на основе представления диагностических параметров в пространстве главных компонент, что в отличие от существующего подхода – сопоставления отдельных показателей, позволяет учесть взаимосвязь контролируемых системой величин как фактор проявления дефектов и, таким образом, оценить эффективность диагностических комплексов как целостных систем (п. 3).

Практическая значимость работы. Значение диссертационного исследования для практики состоит в возможности создания и усовершенствования на его основе систем диагностики электромеханического оборудования, отличающихся от известных:

- снижением вероятности ошибок диагностирования минимум на 15-20 % за счет внедрения методов идентификации структуры данных;
- возможностью формирования единого заключения на основе комплексного анализа данных различных по физической природе;
- простотой реализации в связи с отсутствием необходимости обоснования пороговых значений параметров путем эмпирического анализа процессов деградации;
- наглядностью визуального анализа эффективности многоканальных диагностических комплексов, обосновывающего стратегию их совершенствования;
- простотой, быстродействием, бесконтактностью регистрации за счет возможности контроля состояния оборудования на основании анализа электрических сигналов, к которым применяются методы идентификации структуры временных рядов.

Положения, защищаемые в работе:

1. Критерии, определяющие эффективность диагностических систем, включая чувствительность к дефектам при одновременном снижении вероятности ошибок первого рода, достоверность диагностических признаков, полноту и быстродействие.

2. Модели проявления зарождающихся дефектов электромеханического оборудования, предназначенные для оценки эффективности систем диагностики, описывающие проявления дефектов оборудования в диагностических сигналах в виде слабых нелинейных и хаотических генераций.

3. Метод визуализации и анализа нелинейных и хаотических проявлений развивающихся дефектов электромеханического оборудования по спектру собственных значений, получаемому в результате сингулярного разложения ганкелевой матрицы диагностического сигнала.

4. Результаты экспериментальной апробации методов идентификации изменения структуры исследуемых временных рядов, обеспечивающих повышение чувствительности и снижение ошибок диагностирования при диагностике электромеханического оборудования

5. Методы обработки диагностических данных на основе сингулярного преобразования, обеспечивающие повышение чувствительности к дефектам при одновременном снижении вероятности ложной сигнализации о дефекте.

6. Методы получения и анализа фазовых портретов диагностических сигналов, обеспечивающих раннюю идентификацию зарождающихся дефектов в электромеханическом оборудовании за счет визуализации нелинейных и хаотических проявлений в диагностическом сигнале.

7. Комплекс энтропийных параметров, численно характеризующих нестационарность и хаотичность диагностических сигналов, визуально проявляющихся в форме фазовых портретов.

8. Подход к принятию решения о состоянии оборудования на основе комплексного анализа различных по физической природе диагностических данных в пространстве главных компонент, обеспечивающий повышение чувствительности при диагностировании.

9. Формализация процесса структурно-параметрического синтеза систем диагностики оборудования АЭС путем оценки альтернативных вариантов синтезируемой системы и обоснования необходимого количества и состава информационных каналов.

10. Подход к оценке эффективности многоканальных диагностических комплексов на основе представления диагностической информации в виде графиков нагрузок и графиков счетов в пространстве главных компонент.

11. Результаты апробации диагностических систем оборудования АЭС, отличающихся повышенной чувствительностью за счет использования информации о нелинейных и хаотических проявлениях дефектов.

Внедрение результатов работы. Разработаны и внедрены шесть систем диагностики ответственного оборудования, что позволило повысить качество диагностирования. Промышленные испытания дали положительные результаты на Нововоронежской АЭС (диагностика арматуры, дизель-генераторов, приводов систем управления и защиты, машины перегрузки ядерного топлива); на Ростовской АЭС (диагностика дизель-генератора, машины перегрузки ядерного топлива, арматуры); на ООО «Волгодонская тепловая генерация» (диагностика дизель-генератора, арматуры).

Степень достоверности. Достоверность результатов обеспечивается:

- использованием современных программных средств;
- метрологической аттестацией измерительного оборудования;
- соответствием теоретических результатов результатам опытно-промышленных испытаний систем диагностики;
- статистической обработкой результатов опытно-промышленных испытаний.

Апробация результатов работы. Теоретические и практические результаты используются при подготовке специалистов в Волгодонском

инженерно-техническом институте – филиале Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ).

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: IX-XX Международные научно-практические конференции «Безопасность ядерной энергетики», 2013-2024 гг., г. Волгодонск; X Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 16-19 мая 2017 г. – ОКБ «Гидропресс», г. Подольск; XI, XIII Международные научно-практические конференции «Динамика технических систем», 2017, 2019 гг., г. Ростов-на-Дону; XVI Международная научная конференция «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах (МABP – 2020)» 2020 г., г. Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (ICMTMTE 2020). 2020 г., г. Севастополь; II Международная конференция «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (APITECH-II – 2020). 2020 г., г. Красноярск; XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения», 2021 г., г. Санкт-Петербург; IV Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании», 2021 г., г. Балаково; XVII Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», 14-15 ноября 2023 г., г. Омск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 100 работ, основные 51 из которых приведены в конце автореферата, в том числе 1 монография, 26 – в изданиях, рекомендованных ВАК России, 8 в журналах, входящих в перечень Scopus, 5 патентах, 11 РИНЦ. Также разработаны 2 учебных пособия и 6 (итоговых) отчетов о НИР.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, пять глав, заключение и библиографический список. Основное содержание изложено на 235 страницах, включая 122 рисунка, 37 таблиц. Основная часть дополняется двумя приложениями на 29 страницах. Список литературных источников содержит 200 наименований.

Сведения о личном вкладе автора. Путем анализа особенностей эксплуатации и диагностирования оборудования АЭС [1-19, 21-45, 47-51] автором сформулированы задачи, которые необходимо решить с целью усовершенствования существующих систем. Обоснованы методы обработки информации, обеспечивающие повышение чувствительности при определении состояния объекта [1-17, 19, 21-51], автором лично описан математический аппарат предложенных методов. Результаты испытаний систем диагностики электромеханического оборудования АЭС [1-17, 19, 21-45, 47-51] обработаны лично автором.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** формулируется актуальность темы, ставится цель и соответствующие задачи, представлены научная новизна и защищаемые

положения исследований, значимость для практики.

В первой главе (Анализ особенностей диагностического сопровождения эксплуатации оборудования атомных станций) на основании анализа существующих средств и методов диагностирования оборудования АЭС с точки зрения соответствия критериям эффективности обосновывается актуальность проблемы идентификации дефектов на более ранних этапах их зарождения и развития.

Полноценная диагностика оборудования АЭС выполняется в период ППР системами, предоставляющими информацию, на основании которой принимается решение о возможности дальнейшей работы данного оборудования или необходимости ремонта (рисунок 1). Обоснованность решения в значительной степени определяется эффективностью диагностических систем, которые оцениваются по соответствию критериям:

- вероятности ошибок первого и второго рода, иначе говоря, вероятности ложной неисправности (ложная сигнализация о дефекте) и не обнаруженной неисправности (пропуск дефекта);
- продолжительность, включая время подготовки к диагностике, время регистрации данных и их обработку;
- глубина поиска места неисправности;
- достоверность;
- полнота.

В условиях АЭС целесообразно учесть простоту реализации, возможность дистанционной регистрации и передачи данных, устойчивость к внешним помехам. Достижение эффективности диагностирования конкретного объекта зависит от выбора средств регистрации и методов обработки диагностических сигналов.



Рисунок 1 – Проблема принятия решения по управлению состоянием оборудования в период планово-предупредительного ремонта

Результат диагностирования обычно устанавливаются путем обработки диагностической информации методами статистического или частотного

анализа. Существующая схема диагностирования, реализующая сопоставления с пороговым значением приведена на рисунке 2.

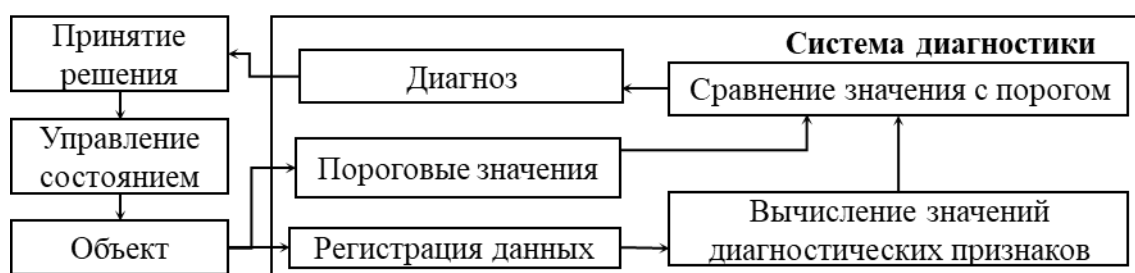


Рисунок 2 – Функциональная схема управления состоянием объекта

Основной проблемой данного подхода является необходимость обоснования пороговых значений в условиях многостадийности протекания процессов деградации, недостатка информации о проявлении дефектов. Вероятны ошибки принятия решения на основании сопоставления статистических или частотных параметров с пороговыми значениями (рисунок 1). Внедрение методов, которые требуют для своей реализации только минимальных априорных сведений о параметрах нормальной эксплуатации оборудования, представляется перспективным направлением.

При синтезе систем диагностики наиболее распространен операторный подход, он широко представлен в работах А.В. Баркова, В.Н. Костюкова и др. Данный подход хорошо себя зарекомендовал для виброакустических систем, но малоприменим для систем комплексной обработки данных другой физической природы. Методология не является гибкой для перенастройки, не позволяет отследить влияние добавления/удаления измерительных каналов. Поэтому в настоящей работе за основу взят принцип, который в работах зарубежных авторов Guratzsch R.F Upadhyaya B. и др. известен как Sensor Placement Optimization. Название метода для задач синтеза многоканальных диагностических комплексов можно трактовать как «Оптимизация информационных каналов». Преимущества – обоснование необходимого количества и состава информационных каналов, простота оценки показателей качества на этапе проектирования.

В данной работе изучен опыт диагностического сопровождения оборудования АЭС.

Перегрузочная машина ядерного топлива. Объект выполняет десятки операций; движется по сложной траектории. Перегрузка топлива – опасное состояние реактора с точки зрения вероятности серьезной аварии. Одной из основных угроз является падение тепловыделяющей сборки в результате выхода из строя элементов машины перегрузочной. Работа перегрузочной машины контролируется телевизионной системой и тензодатчиками. Устанавливается только сам факт выполнения/невыполнения операции. Диагностика самих механизмов перегрузочной машины не предусмотрена. Востребованы системы, обеспечивающие сигнализацию зарождения дефектов за время достаточное, чтобы на неё отреагировал оператор.

Источники резервного питания АЭС представляют собой дизель-

генераторные установки, которые должны обеспечить питание систем безопасности в случае обесточения. На российских станциях в качестве источников аварийного питания используется пять типов конструкций. Последствия отказа дизеля при аварии на АЭС демонстрирует катастрофа на АЭС Фукусима. Кроме фукусимской катастрофы, известны случаи, когда неготовность резервных дизелей приводила как минимум к простоя энергоблока. Особенность резервных дизель-генераторов АЭС в том, что они работают не постоянно, а периодически согласно графику. Во время ППР измеряют только уровень вибрации, что не обеспечивает глубину и полноту диагностирования. Эффективное диагностирование данных сложных распределенных объектов требует разработки многоканальных многопараметрических комплексов.

Привод системы управления и защиты (СУЗ) отвечает за регулирование мощности и остановку реактора (плановую и аварийную) путем введения в активную зону или выведения из нее поглощающих стержней. В основе работы привода лежит электромагнитный механизм, обеспечивающий управление положением поглощающих стержней. Отказ привода СУЗ может стать исходным событием аварии, которая приведет к внеплановому простоя энергоблока. Современные приводы систем управления и защиты оснащены встроенными средствами диагностики. Однако приводы предыдущих поколений продолжают эксплуатироваться, их работоспособность устанавливается по факту срабатывания на стенде. Во избежание отказа данных приводов в период работы блока на мощности необходима идентификация зарождающихся дефектов в период ППР.

Трубопроводная арматура, задвижки, клапаны, краны, вентили являются исполнительными механизмами, управляющими подачей воды или пара. Это самая многочисленная группа механизмов. Один энергоблок содержит около 30000 единиц арматуры. Для обеспечения работы АЭС требуется около 200 различных типоразмеров арматуры. Из дефектов около 60 % связаны с её негерметичностью, 30 % приходится на механические дефекты (подшипников, зубчатых пар редуктора), 10 % составляют дефекты двигателя. Герметичность устанавливается ультразвуковым методом, при реализации которого принят органолептический подход, не всегда надежный из-за особенностей восприятия оператора. Состояние электромеханической части устанавливается путем контроля сигналов тока и напряжения двигателя. Выбор электрических параметров обеспечивает возможность дистанционного контроля в условиях большого числа объектов и их труднодоступности. Однако из практики известно, что при анализе электрических параметров ошибки диагностирования могут быть выше, чем при анализе параметров вибрации.

Таким образом, проведенным анализом особенностей диагностического сопровождения оборудования АЭС установлена необходимость проведения научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование методов и алгоритмов идентификации дефектов на более ранних этапах их зарождения.

Во второй главе (Исследование информационных процессов при зарождении и развитии дефектов оборудования) обосновывается возможность улучшения характеристик систем технической диагностики, за счет идентификации структуры исследуемых временных рядов.

Анализ закономерностей процессов, под влиянием которых формируются диагностические сигналы, объясняет проблемы существующих методов обработки диагностической информации и обеспечивает целесообразность использования новых методов. Указанные закономерности проиллюстрированы экспериментом, который заключался в ускоренном износе подшипника. В процессе износа регистрировалась его виброскорость. Как видно из функций плотности распределения вероятности, дефект идентифицируется по среднеквадратичному значению (СКЗ) сигналов, но с ошибками, которые зависят от развития дефекта (рисунок 3).

Для выявления дефектов подшипников широко используется спектральный анализ. При наличии дефекта в спектре диагностического сигнала теоретически возрастают амплитуды на соответствующих частотах. Однако обработка результатов эксперимента показывает, что не все признаки в спектре являются достоверными в соответствии с критерием Уилкоксона.

Анализ лабораторных и промышленных экспериментов устанавливает, что причинами ошибок при диагностировании является то обстоятельство, что процессы, характеризующие дефект, неустойчивы, их вклад в формирование диагностических параметров статистически меньше вклада неспецифических генераций. Поэтому требуются методы, учитывающие проявление дефекта в относительно слабом и нестационарном изменении структуры диагностических данных. С целью апробации данных методов в работе построены модели, отличающиеся описыванием дефектов оборудования именно в виде слабых отклонений, в том числе нелинейных и хаотических проявлений.

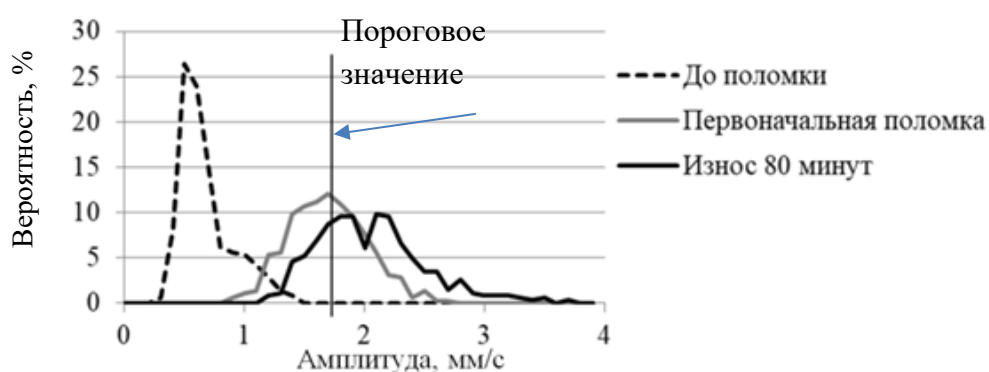


Рисунок 3 – Функции плотности распределения вероятности СКЗ виброскорости подшипника

Данная модель учитывает, что оборудование независимо от состояния является источником колебаний с частотами кратными частоте питающей сети и вала двигателя, т. е. не специфическими гармониками. А зарождению дефекта соответствуют специфические гармоника со значительно меньшей амплитудой. Таким образом, сигнал эталонного исправного объекта:

$$X_n(t) = (\sum_{i=1}^K A_{n_i} \sin 2\pi \cdot f_i t) + \delta_n(t), \quad (1)$$

где f_i – гармоники, частоты питающей сети и вала двигателя, A_{n_i} – их амплитуды, K – количество гармоник, $\delta_n(t)$ – хаотическая составляющая, принимающая случайные значения.

Сигнал анализируемого объекта с дефектом:

$$X(t) = \left(\sum_{j=P+1}^Q A_{s_j} \sin 2\pi \cdot f_{s_j} t \right) + \left(1 + \sum_{k=1}^R A_{s_k} \sin 2\pi \cdot f_{s_k} t \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^P A_i \sin(2\pi \cdot f_i t + \sum_{l=1}^O A_{s_l} \sin 2\pi \cdot f_{s_l} t) \right) + \delta(t), \quad (2)$$

где A_{s_j} , f_{s_j} – амплитуды и частоты основных гармоник дефектных деталей, Q – количество данных гармоник; P – количество гармоник питающей сети и вала двигателя; A_{s_k} , f_{s_k} , A_{s_l} , f_{s_l} – амплитуды и частоты амплитудо- и фазомодулирующих гармоник дефектных деталей, R и O – количество соответствующих гармоник; $\delta(t)$ – хаотическая составляющая в сигнале объекта с дефектом. $A_i \gg A_{s_j}$, A_{s_k} , A_{s_l} , $\forall i, j, k, l$; $\delta_n(t) < \delta(t)$.

Модель многоканальной системы строится по аналогичному принципу. Например, в системе диагностики дизель-генератора параметры реагируют на наличие дефекта в зависимости от их физической природы. Однако эта реакция сопоставима с действием случайных факторов и не приближается к пороговым значениям. Если система измеряет n параметров в m каналах, то нормированные параметры исправного состояния (эталонные) в момент t_k можно представить матрицей (3):

$$\dot{X}_3(t_k) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{31}^1 & \dots & \dot{x}_{3n}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{x}_{31}^6 & \dots & \dot{x}_{3m}^6 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\dot{x}_{3i}^j$ – нормированные значения параметров.

Значения параметров определяются отклонениями относительно медианного значения в i -й группе:

$$\dot{x}_{3i}^j = 1 + \varepsilon * o_i^j, \quad (4)$$

где ε – величина, характеризующая случайные факторы, действующие в исправном оборудовании; o_i^j – величины, характеризующие случайные факторы в метрологически аттестованном измерительном канале.

Состоянию анализируемого объекта соответствует матрица той же структуры, что и (3), состоящей из элементов $\dot{x}_i^j$. Значения $\dot{x}_i^j$ определяются иными отклонениями:

$$\dot{x}_i^j = 1 + \varepsilon * r_i^j, \quad (5)$$

где ε – величина, характеризующая случайные факторы, действующие в неисправном оборудовании; r_i^j – величины, характеризующие совместное действие случайных факторов в измерительном канале и влияния дефекта на данный параметр. $[\varepsilon * o_i^j], [\varepsilon * r_i^j] \leq 0,1$.

Для анализа структуры сигнала, разделения слабых/сильных трендов, шума разработан метод сингулярного спектрального анализа (ССА).

Классическая реализация метода, изложена в работах В.А. Москвиной, Н.Э. Голяндиной и др., она заключается в применении к ганкелевой матрице сигнала (6) сингулярного преобразования (7):

$$[A] = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_2 & a_3 & \dots & a_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a & a_{m+1} & \dots & a_N \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\{a_1, a_2 \dots a_N\}$ – значения временного ряда;

$$[A]_{m \times n} = [U]_{m \times m} [S]_{m \times n} [V]_{n \times n}^T, \quad (7)$$

где $U^T U = I$ и $V^T V = I$ – базисные векторы; S – диагональная матрица, содержащая квадратные корни собственных значений. Спектр собственных значений (ССЗ) отражает вклад каждой компоненты. Для демонстрации различия структуры данных с помощью модели получены сигналы, у которых сильные гармоники совпадали, а дополнительные слабые отличались. Различия визуализируются в ССЗ ганкелевых матриц сигналов (рис. 4 а).

В настоящей работе впервые ССЗ используется для визуализации изменения структуры диагностического сигнала электромеханического оборудования под влиянием зарождения и развития дефектов (рис. 4 б). Сначала износ характеризуется ростом первых компонент разложения, которые в соответствии с методом ССА рассматриваются как детерминированные и переменные. Последующий износ проявляется снижением вклада первых компонент и возрастанием высших хаотических компонент.

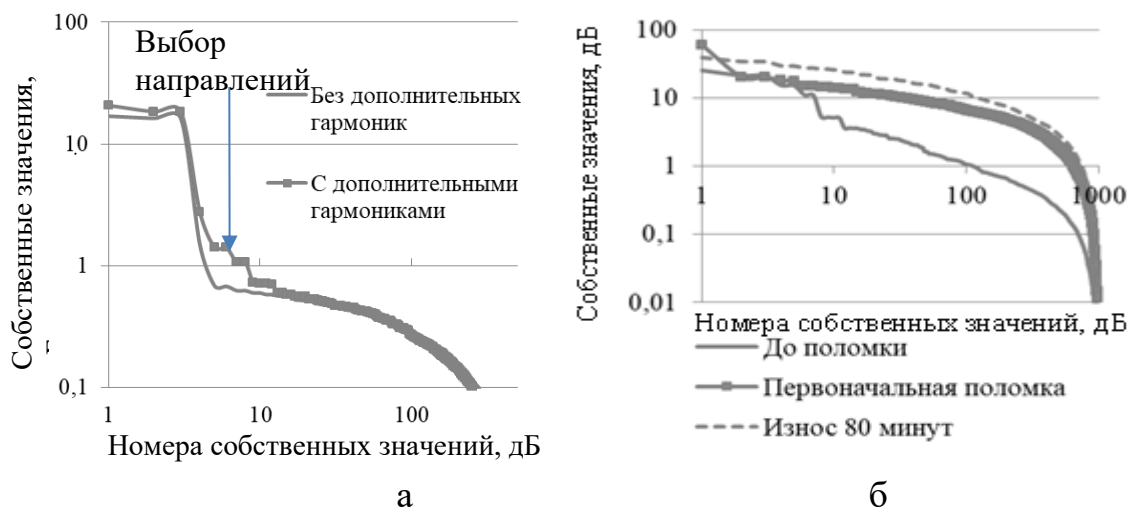


Рисунок 4 – Спектры собственных значений ганкелевых матриц сигналов: а) рассчитанных; б) полученных в результате эксперимента

Свойства компонент сигнала подтверждаются путем проецирования на соответствующие направления сингулярного базиса с последующим диагональным усреднением. Гармоники, выбранные по ССЗ, отражают важные для диагностики генерации. Результаты обработки сигналов (рисунок 5) показывают, что восстановление не является обязательным этапом и можно ограничить реализацию метода этапом проецирования. Проекция сигналов исправного и неисправного оборудования на выбранное

направление эталонного базиса демонстрируют явные различия, которые позволяют идентифицировать состояние без сравнения с пороговым значением.



Рисунок 5 – Функции плотности распределения вероятности проекций сигналов вибрации

От классической реализации модернизированный метод ССА (рисунок 6) отличается расчетом эталонного базиса, в котором совместно рассматриваются проекции исправного и анализируемого состояний.



Рисунок 6 – Алгоритм модернизированного метода ССА при обработке диагностических сигналов: а) исправного оборудования (ретроспективная информация); б) текущая информация

Выбор проекций осуществляется с точки зрения наглядной визуализации состояний. Повышение чувствительности дополнительно обеспечивается умножением на собственные значения. Восстановление не является обязательным этапом. Аналогичный подход, основанный на анализе структуры данных, предложен для обработки информации в многоканальных системах. Он требует предварительного нормирования и объединения физически разных данных за разные периоды в одной матрице. Этап выбора главной компоненты (ГК) проецирования приобретает смысл выбора системного параметра. Для случая комплексного анализа данных различной природы модернизированный метод ССА в настоящей работе называется модернизированным методом главных компонент (МГК). Экспериментально обоснована возможность за счет комплексного подхода с использованием модернизированного МГК выявить относительно слабые отклонения, существенные для идентификации состояния, и принятия своевременных решений по управлению состоянием объекта.

Таким образом, за счет использования методов обработки информации, обеспечивающих идентификацию структуры исследуемых временных рядов, достигается снижение условных вероятности обнаружения и не обнаружения дефектов. На основании величины ошибок диагностирования может быть принято решение по управлению состоянием оборудования в случае, когда пороговое значение параметра неизвестно или недостоверно.

В третьей главе (Разработка концепции системного анализа диагностической информации) исследована чувствительность методов обработки данных, отличающихся совместной обработкой текущей и ретроспективной информации, что обеспечивает раннюю идентификацию скрытых дефектов, проявляющихся изменением структуры исследуемых временных рядов.

Предел чувствительности алгоритма модернизированного ССА определяется минимальной степенью отклонения и объемом накопленных изменений необходимым для обоснования результата диагностирования. Был разработан алгоритм обработки выборок до изменений и после изменений: базовой и тестовых (рисунок 7). Причем, базовая использовалась для построения эталонного базиса. Расстояния в эталонном базисе между проекциями базовой и тестовых выборок $\{d_i\}$, когда они соответствовали доверительному интервалу $\pm h$, с вероятностью P менее допустимой $P_{\text{доп}}$, используется для индикации изменений. Например, ступенчатое возмущение 2 % определяется по выборке, которая включает 600 значений, сформированных до возмущения и 400 после возмущения. Что определяется как предел чувствительности метода ССА к данному типу возмущения.

Представляет интерес сравнение результатов применения метода ССА с другими сценариями обнаружения изменения данных. Простейший подход, который рекомендуется в нормативных документах – метод кумулятивных сумм. При ступенчатом возмущении результат применения обоих методов сопоставим. Если возмущение носит периодический характер, т.е. меняется

структура данных, то очевидно преимущество метода ССА. Простые рекуррентные методы в данном случае неэффективны.



Рисунок 7 – Алгоритм ранней идентификации изменений в потоке данных

Представляет практический интерес анализ работы насоса, вибрация которого регистрировалась до и во время отказа (рисунок 8 а). С точки зрения раннего обнаружения исследован участок до явных проявлений дефекта, содержащий незначительное возмущение, похожее на ступенчатое. Применение алгоритма к архивным данным позволило обнаружить изменения за четыре часа до сигнализации существующей системой (рисунок 8 б).

Обоснование алгоритма модернизированного метода ССА для ранней идентификации дефектов позволяет вместо использования пороговых

значений диагностического параметра в соответствии с функциональной схемой на рисунке 3 предложить усовершенствованную схему на рисунке 9. Реализация предлагаемой схемы требует сведений о параметрах нормальной эксплуатации оборудования для расчета эталонного базиса (ретроспективной информации). Текущие данные рассматриваются в виде проекций в эталонном базисе совместно с проекциями исправного состояния. На основе сопоставления проекций на выбранные направления (рисунок 5) или на все направления (рисунок 8 б) оцениваются ошибки диагностирования. Оператор системы принимает решение о возможности дальнейшей эксплуатации объекта или необходимости его ремонта.

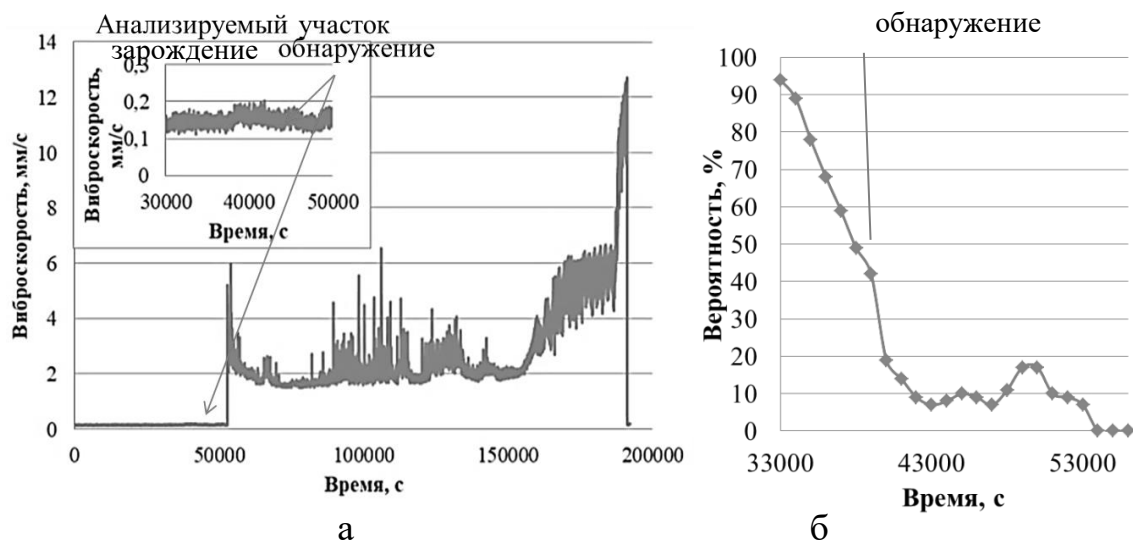


Рисунок 8 – Анализ параметров вибрации насоса: СКЗ виброскорости на подшипнике насоса: а) СКЗ виброскорости на подшипнике насоса
б) вероятности пропуска отклонения

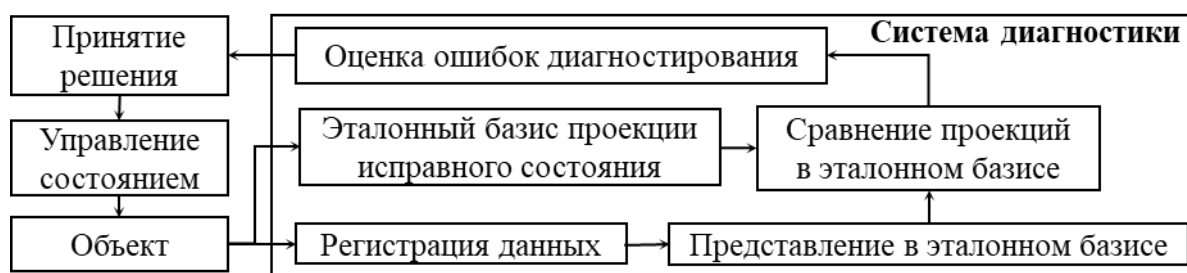


Рисунок 9 – Усовершенствованная функциональная схема управления состоянием объекта

Раннее обнаружение обеспечивается чувствительностью используемых методов и инвариантностью к изменению структуры данных с одной стороны инвариантности к нестационарности, недифференцируемости анализируемых рядов. Данными преимуществами обладает фазово-плоскостной метод (ФПМ), который дополнительно обеспечивает визуализацию квазипериодических процессов, сопровождающих развитие дефектов электромеханического оборудования. В настоящей работе под фазовым портретом (ФП) понимается совокупность траекторий, которые описывает на комплексной плоскости вершина фазора, мгновенное положение которого

определяется векторной суммой всех гармонических составляющих диагностического сигнала (рисунки 10 а и б).

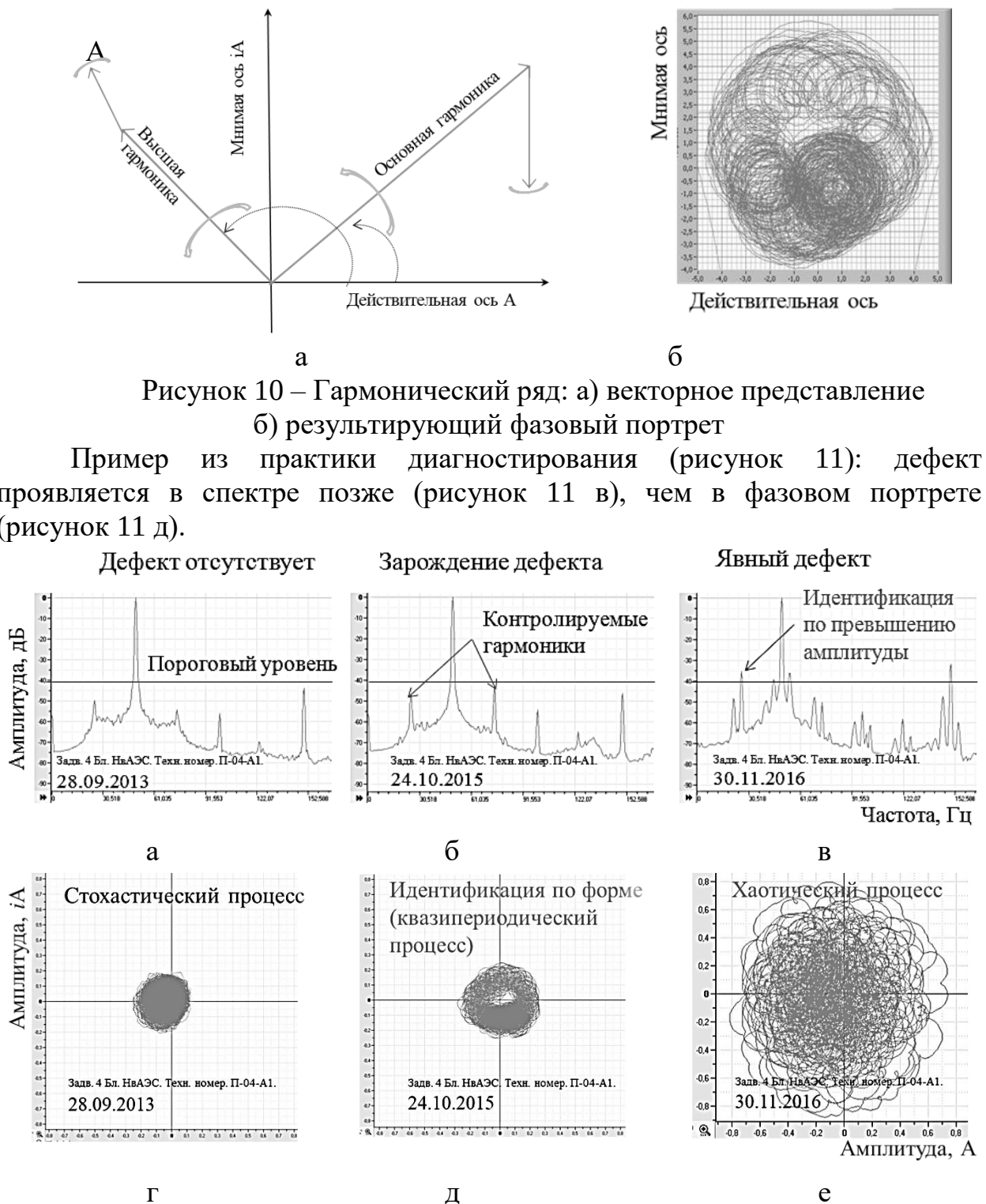


Рисунок 11 – Проявление дефекта задвижки (затирание штока в ходовом узле) в сигнале тока двигателя: а), б), в) – спектры сигналов тока двигателя задвижки в 2013, 2015, 2016 гг.; г), д), е) – фазовые портреты сигналов тока двигателя задвижки полученные в 2013, 2015, 2016 гг.

Алгоритм сравнительного анализа формы ФП текущего и ранее полученного сигналов для ранней идентификации зарождающихся дефектов показан на рисунке 12.

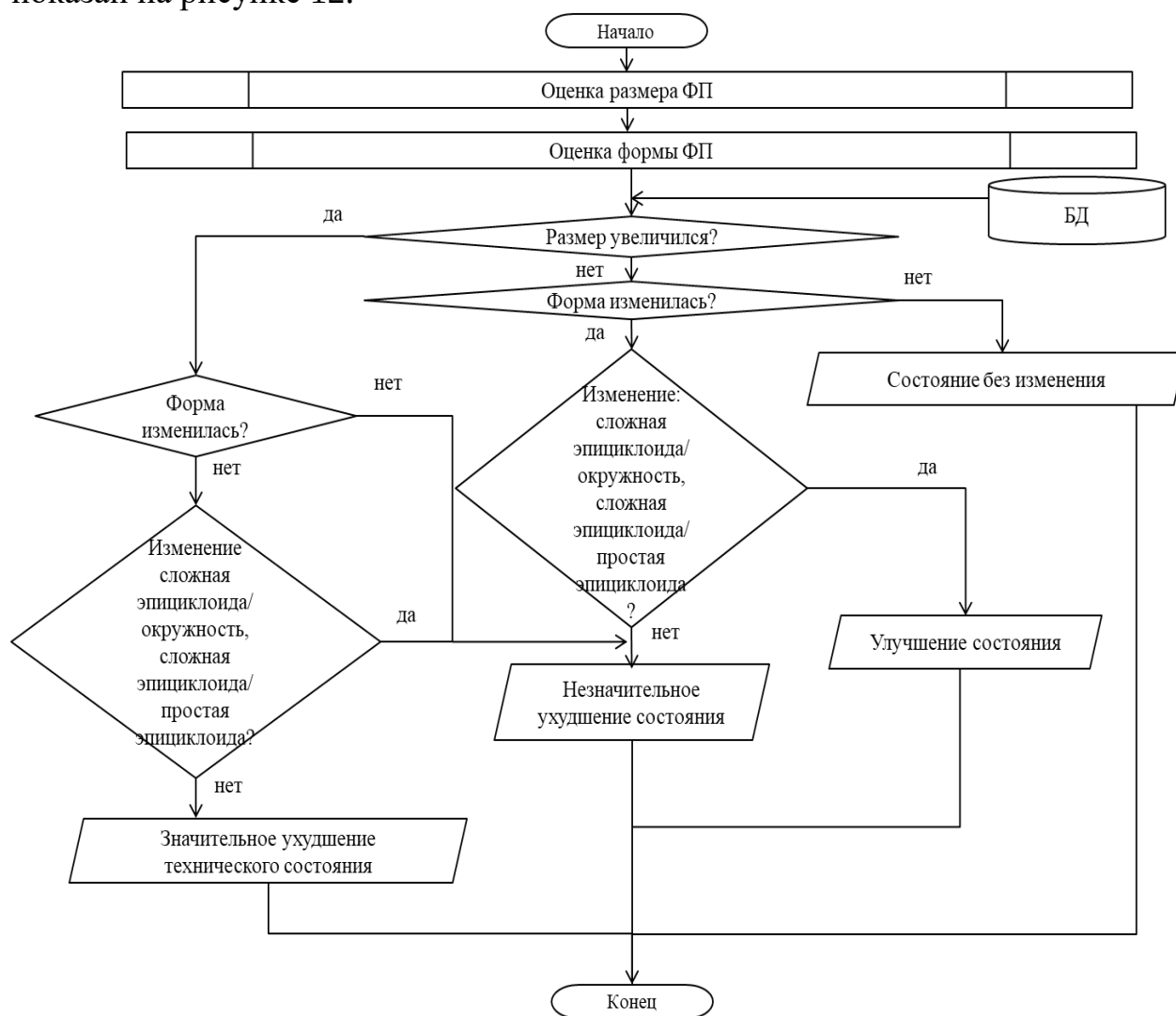


Рисунок 12 – Алгоритм сопоставления ФП анализируемого сигнала с ФП сигнала по результатам предыдущего диагностирования

Как видно из сопоставления спектров и ФП, разным колебаниям могут соответствовать похожие спектры, но явно различные фазовые портреты за счет чувствительности формы ФП к нелинейным процессам. Фазовые портреты развитых дефектов (рисунок 11 е) визуализируют неустановившиеся хаотические колебания, параметризация которых детерминированными методами не вполне корректна. К сигналам, которые характеризуется непредсказуемостью, сложностью, фрактальной размерностью должны применяться методы, инвариантные к указанным особенностям. С этой целью разработаны алгоритмы расчета энтропийных индексов диагностических сигналов. В качестве показателя variability обоснована энтропия Шеннона. Неопределенность в отношении результата x_i измерения временного ряда $X(i)$ с распределением вероятностей $p(x_i)$ определяется по формуле:

$$H_{Sh}(X) = - \sum_{i \in 1..n} p_i \log p_i \quad (8)$$

Энтропия Колмогорова-Синяя известна как мера хаотичности. Данный показатель может быть интерпретирован как условная вероятность совпадения двух сегментов временного ряда длиной N на длине $m+1$ если они совпадают на длине m . Соответствие отрезков определяется порогом r , согласно выражению $r = \sigma$ сигнала, где k может принимать значения от 0 до 1. Мера энтропии Колмогорова-Синяя вычисляется для пределов параметров $r \rightarrow 0$, $m \rightarrow \infty$ и $N \rightarrow \infty$. В работе предложена приближенная оценка – аппроксимационная энтропия $ApEn$ временного ряда $\{x(n); 1 \leq n \leq N\}$ при заданном m можно оценить в соответствии с алгоритмом ниже:

1. Формируется $(N - m + 1)$ векторов длиной m , заданные выражением

$$\{X_i^m: 1 \leq i \leq (N-m+1)\} \quad (9)$$

где, $X_i^m = \{x(i+k): 0 \leq k \leq m-1\}$.

2. Аналогично, формируется $(N - m)$ вектора длины $(m+1)$, заданные на интервале

$$\{X_i^{m+1}: 1 \leq i \leq (N-m)\} \quad (10)$$

где, $X_i^{m+1} = \{x(i+k): 0 \leq k \leq m\}$

3. Для каждого X_i^m вектора, взятого в качестве эталонного, находится его расстояние от каждого вектора X_j^m согласно выражению

$$d_{ij}^m = \{\max \vee X_i^m - X_j^m \vee: 1 \leq j \leq (N-m+1)\}. \quad (11)$$

4. Принимается, что θ_i — число векторов X_j^m , которые лежат на расстоянии r от вектора X_i^m .

5. Вероятность, того что вектор X_j^m лежит на расстоянии r от вектора X_i^m задается выражением

$$C_i^m(r) = \frac{\theta_i}{N-m+1}. \quad (12)$$

6. Рассчитывается среднее арифметическое натуральных логарифмов этих вероятностей за $i \leq (N-m+1)$ как

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} [\sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_{i=1}^{N-m+1}(r)]. \quad (13)$$

7. Далее повторяются этапы с 3 по 6 для размерности $(m+1)$, с оцениванием

$$\phi^{m+1}(r) = \frac{1}{N-m} [\sum_{i=1}^{N-m} \ln C_i^{m+1}(r)]. \quad (14)$$

Для предельных значений N , m и r повторяются описанные выше этапы до сходимости $[\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)]$ и эта сходящаяся величина соответствует ЭКС сигнала:

$$Entropy(N, m, r) = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{m \rightarrow \infty} \lim_{N \rightarrow \infty} [\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)]. \quad (15)$$

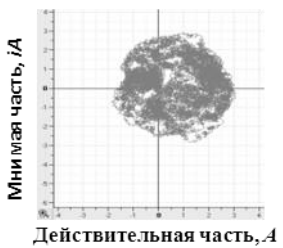
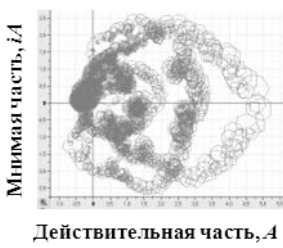
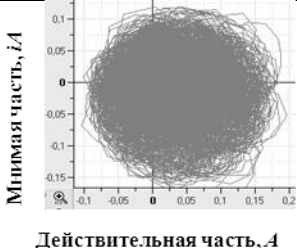
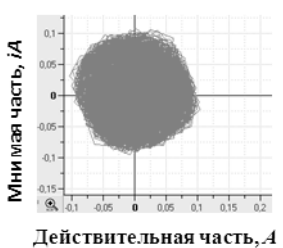
С учетом конечности исследуемых сигналов была обоснована оценка регулярности – аппроксимационная энтропия, которая является приближенной версией ЭКС, оцениваемая при единичном значении r , m и N :

$$ApEn(m, r) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r), \quad (16)$$

где $\phi^m(r)$ и $\phi^{m+1}(r)$ получают в соответствии с шагами алгоритма 1-7. Значения m и r выбираются из рекомендуемых диапазонов $\{2,3,4\}$ и $\{[0,1-0,2]N\}$ соответственно.

Результат обработки сигналов тока двигателя электроприводной арматуры трех различных типов (номер соответствует типу) приведен в таблице 1: энтропийные параметры, количественно отражают хаотичность исследуемых сигналов, которая визуальнo проявляется в фазовых портретах.

Таблица 1 – Визуализация и количественная оценка проявления нестационарности и хаотичности в неисправной арматуре

Номер, дата, дефект	Фазовый портрет		$ApEn$
№1, 17.06.16, затирание штока в месте уплотнения		Несущие колебания – нестационарный, неустановившийся процесс; модуляция фазовая с малой амплитудой	0,21
№2, 23.08. 15, затирание штока в месте уплотнения		Несущие колебания – нестационарный, неустановившийся процесс; модуляция фазовая с большой амплитудой	0,43
№3, 12.06.16, биение выходного вала		Несущие колебания – нестационарный, неустановившийся процесс; модуляция с непостоянными характеристиками	0,71
№3, 07.07.16, биение выходного вала		Переход в хаотический режим, резкое изменение характеристик несущих и модулирующих колебаний	0,89

Таким образом, обоснована концепция, обеспечивающая улучшение характеристик систем технической диагностики, включая, включая модернизированные методы ССА и МГК, ФПМ и методы энтропийной параметризации.

В **четвертой главе** (Синтез систем комплексной диагностики электромеханического оборудования) этапы синтеза систем диагностики впервые описаны с точки зрения обоснования количества и состава информационных каналов, обеспечивающих качество диагностирования.

Опыт проектирования систем диагностики для многих объектов позволяет выделить при разработке девять условно последовательных этапов (рисунок 13).

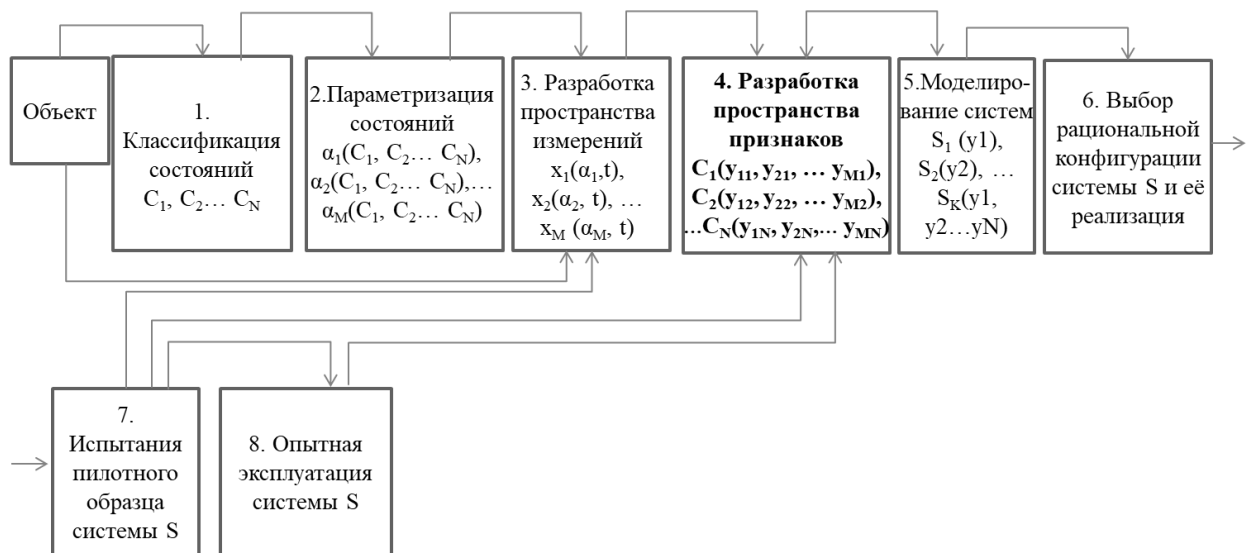


Рисунок 13 – Этапы разработки и совершенствования систем диагностики

В настоящей работе за основу взят подход к синтезу систем, который отличается оценкой показателей качества в процессе проектирования, за счет чего возможно обоснование количества и состава информационных каналов. Недостаточная эффективность или возможность повышения эффективности, обнаруженные на этапах 7 и 8, предполагают повторное прохождение предыдущих этапов. Достаточное качество должно достигаться при меньшем количестве измерений. Формализация такой задачи требует с одной стороны оценки «вклада» каждого диагностического параметра при выявлении различных состояний, а с другой стороны оценки эффективности обнаружения каждого состояния при использовании комплекса параметров.

В теории распознавания образов предложено решение этой двойной задачи – путем представления каждого состояния вектором признаков и объединения векторов в матрицу вида (3). Например, в таблице 2 приведены результаты моделирования системы диагностики дизель-генератора. На основе экспертной информации модель имитирует реакцию четырех каналов на семь дефектов.

Данная форма представления информации позволяет провести комплексный анализ данных различных по физической природе. Модуль диагностического вектора в пространстве признаков характеризует нагрузку, т.е. эффективность каждого канала. В данном случае вклад параметров вибрации выше параметров ультразвука. Модуль диагностического вектора в пространстве состояний характеризует идентифицируемость, т.е. эффективность обнаружения отдельного состояния. В данном примере система распознает четвертое состояние лучше других, а седьмое хуже. Расстояния между векторами состояний 1-7 характеризуют изолированность, т.е. меру различимости состояний. Визуализировать и наглядно представить данную информацию позволяет применение МГК к матрице. Актуальность наглядного представления многомерных систем возрастает с ростом числа каналов и состояний (для более сложного дизельного двигателя следует предусмотреть десятки каналов и состояний).

Таблица 2 – Нормированные координаты центров выборок четырехмерной системы

Состояния Состояния	Каналы				Идентифицируемость
	Вибрация	Температура	Ультразвук	Давление	
1	0,10	0,11	-0,01	0,01	0,15
2	0,11	-0,09	-0,04	0,03	0,15
3	0,00	0,21	0,00	0,05	0,21
4	0,36	0,10	-0,01	0,05	0,38
5	0,25	0,20	-0,04	-0,07	0,34
6	0,24	0,00	0,00	0,00	0,24
7	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Нагрузка	0,52	0,33	0,05	0,10	

Анализ нагрузок параметров (рисунок 14) позволяет обосновать стратегию улучшения системы. Например, путем исключения наименее информативных каналов снизить стоимость без существенного снижения качества распознавания. С другой стороны, анализ идентифицируемости и изолированности (рисунок 15) позволяет ещё на этапе проектирования установить дефекты, выявление которых представляет наибольшую сложность. Совершенствование системы должно быть направлено на возможность установления наиболее сложных дефектов.

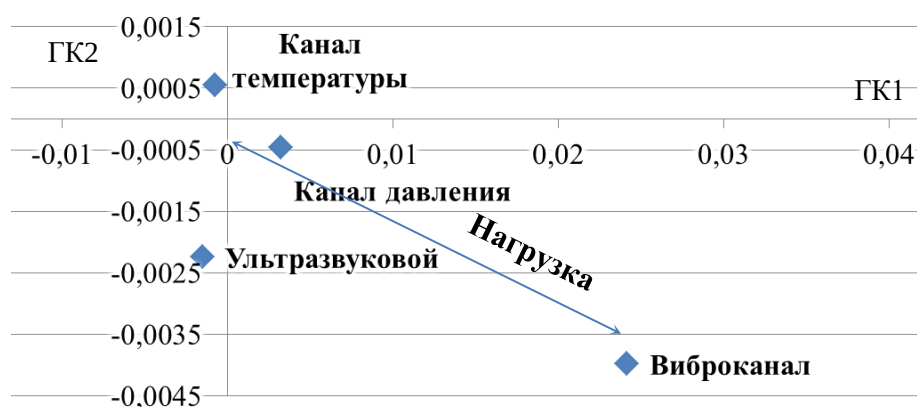


Рисунок 14 – График нагрузок в 4-мерной системе диагностики дизеля

Разработаны рекомендации по синтезу многоканальных диагностических комплексов, основанные на сохранении информационных каналов, обеспечивающих соответствие критериям качества, и исключении каналов, минимально влияющих на качество диагностирования.

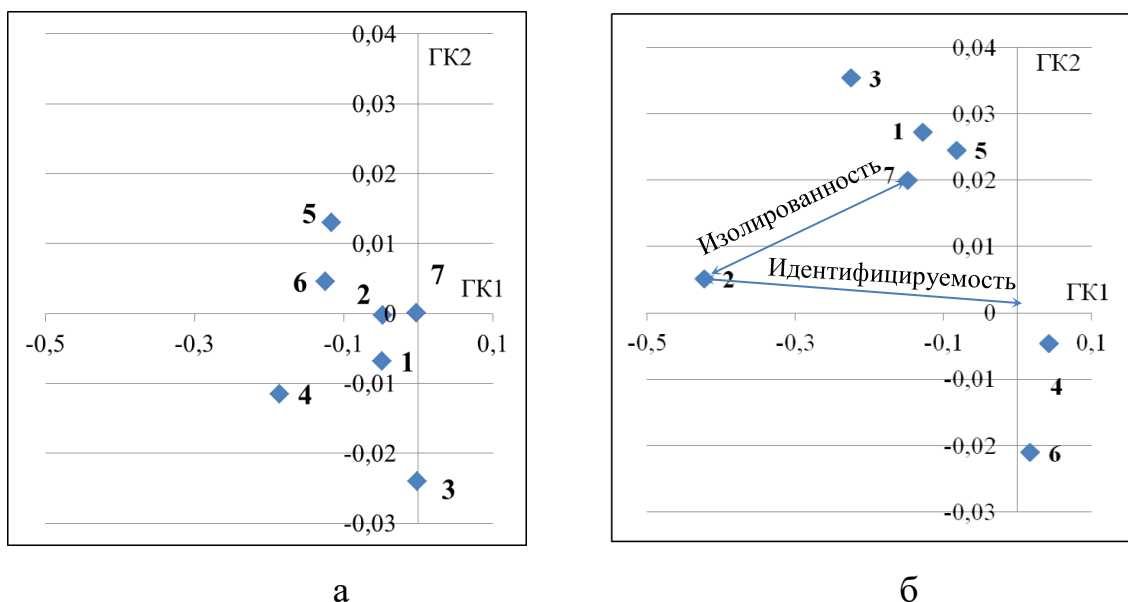


Рисунок 15 – Графики счетов диагностических параметров: а) 4-мерной системы диагностики дизеля (ультразвук, вибрация, давление, температура); б) 12-мерной системы диагностики дизеля (ультразвук, вибрация, давление в четырёх цилиндрах)

Окончательной инженерной реализации систем предшествуют испытания пилотного образца с анализом показателей качества диагностирования.

В пятой главе (Разработка и внедрение систем информационно-диагностического сопровождения оборудования АЭС) представлены системы диагностики машины перегрузочной, дизель-генераторов, приводов СУЗ и электроприводной арматуры, реализующие алгоритмы обработки информации на основании выбранных методов.

1) Система контроля процесса перегрузки ядерного топлива разработана в рамках договора между НИЯУ МИФИ и «Концерн Росэнергоатом». Систему формируют канал виброакустического контроля совместно с блоками обработки и базой данных.

В процессе испытания системы было зафиксировано отклонение – растяжение каната захвата кластера. Штатная система установила это отклонение уже после того, как оно произошло. Программное обеспечение на основе модернизированного метода ССА (рисунок 6) выявило по виброакустическим сигналам (рисунок 16) признаки зарождающегося дефекта (рисунок 17), причем, за время достаточное, для того чтобы оператор отреагировал на наличие отклонения.

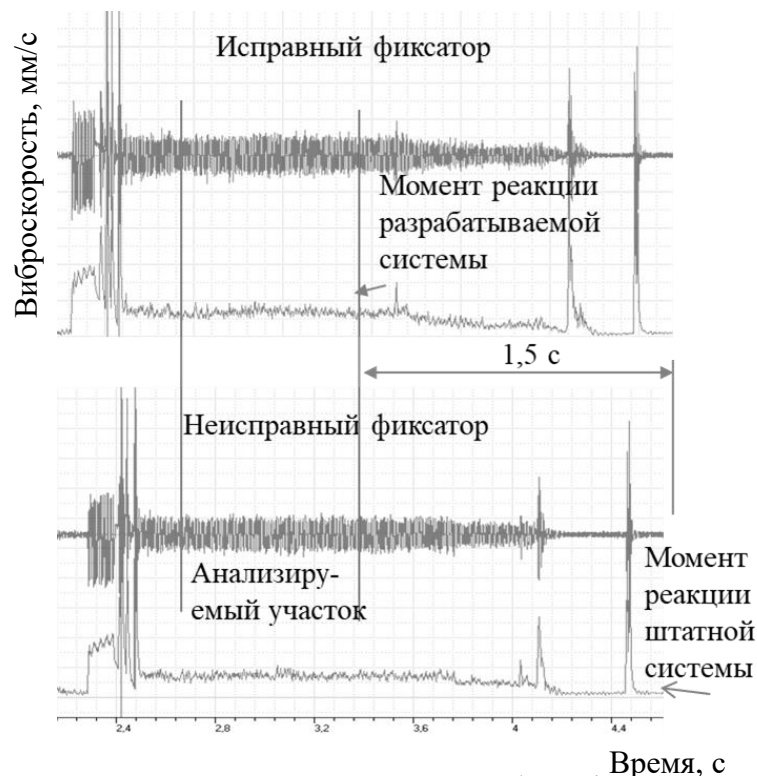


Рисунок 16 – Сигнал при нормальной работе фиксатора (сверху) и сигнал при неисправности (снизу), их огибающие

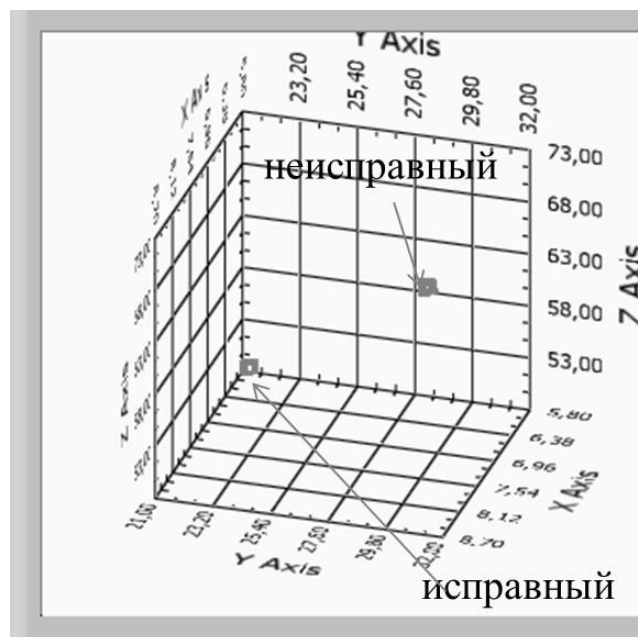


Рисунок 17 – Проекция на эталонный базис сигналов вибрации рабочей штанги при наличии и отсутствии неисправности

Особенностью объекта является функционирование в помещениях с ограниченным доступом. В связи с чем, исследована возможность диагностирования по сигналу тока, потребляемого приводами. Электрические сигналы были дистанционно зарегистрированы в процессе выполнения объектом разнообразных операций. Идентификация операций по статистическим и спектральным показателям сигналов вибрации или тока не обеспечивало надежной безошибочной классификации. Поэтому по сигналам

тока были получены ФП, которые демонстрируют формирование устойчивых колебаний при выполнении определенных операций. Поскольку форма портретов в течение кампании не меняется, то характеристики формы предложено использовать для описания классов исправных состояний. Разработка систем диагностики по электрическим параметрам является перспективным направлением.

Система, реализующая виброакустический контроль, внедрена на Ростовской АЭС с 2021 г.

2) *Комплекс контроля состояния оборудования резервного питания АЭС.* Контролируемые дизель-генераторные установки требуют диагностики с использованием многоканальных систем, обеспечивающих регистрацию и обработку данных различных по физической природе. Пилотный образец, выполняющий обработку и регистрацию вибрации, температуры, индикаторного давления и ультразвуковых параметров показан на рисунке 18.

Исследование информативности диагностических параметров путем анализа нагрузок на ГК обосновано, что для идентификации состояний, угрожающих отказом оборудования достаточно использовать три канала регистрации (вибрация, температура, индикаторное давление).



Рисунок 18 – Пилотный образец системы контроля состояния дизель-генераторов АЭС

Алгоритм МГК обеспечивает обработку параметров различной физической природы. В результате обработки испытаний получен график счетов (рисунок 19). Координаты проекций в пространстве ГК иллюстрируют

состояния цилиндров, один из которых (восьмой) неисправен. Номера соответствуют группам измерений, относящихся к одному цилиндру.

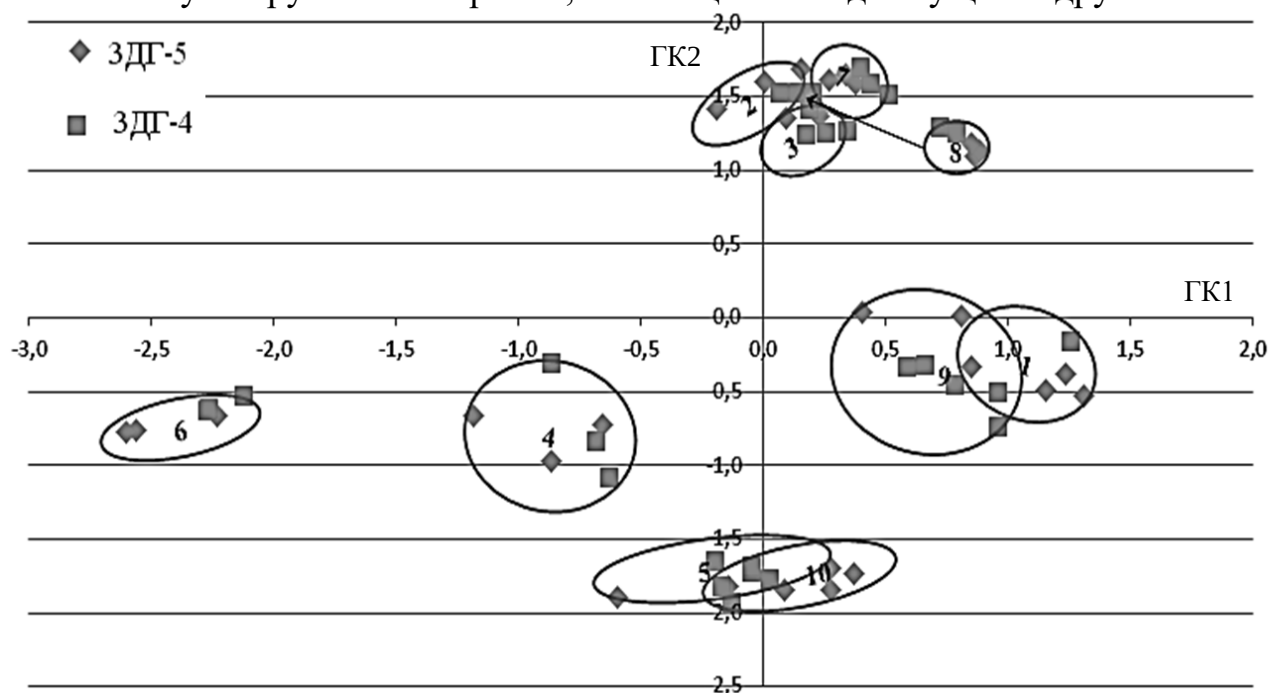


Рисунок 19 – График счетов (координаты состояний) десяти цилиндров дизель-генераторных установок с номерами 3ДГ-4 и 3ДГ-5

Как видно из графика счетов, координаты, соответствующие одному и тому же цилиндру, имеют близкие значения. Координаты, соответствующие неисправному цилиндру, формируют частично несовпадающие области.

Система внедрена на Нововоронежской АЭС с 2019 г.

3) Система диагностики приводов системы управления и защиты реакторной установки. Аппаратно-технические средства комплекса представлены на рисунке 20.



Рисунок 20 – Система диагностики приводов СУЗ

При испытаниях пилотного образца системы в стендовых условиях были симулированы наиболее значимые дефекты привода СУЗ. Обработка сигнала вибрации традиционными методами (сопоставление

амплитуд вибрации в исправном и неисправном состоянии) выявила дефекты со значительными ошибками. Энтропийная параметризация диагностических сигналов обеспечила избирательность к различным состояниям.

За счет получения ССЗ ганкелевой матрицы диагностического сигнала (рисунок 21) обеспечивается визуализация проявлений дефектов.

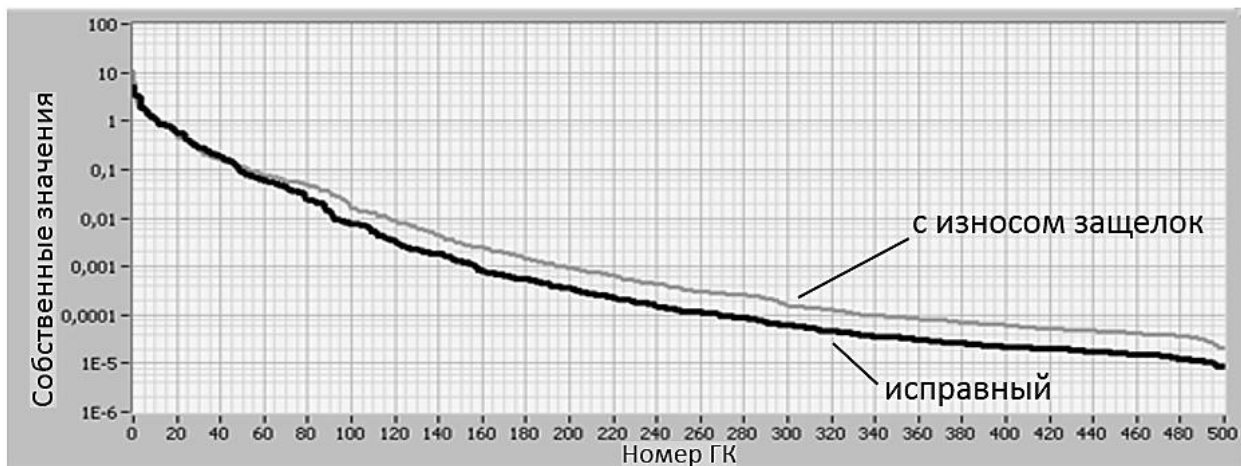


Рисунок 21 – Спектр сингулярных значений исправного привода и привода СУЗ с износом защелок

Система внедрена на Нововоронежской АЭС с 2024 г.

4) Система контроля протечек оборудования АЭС. До настоящего времени принят органолептический подход, не всегда надежный из-за особенностей восприятия оператора диагноста. Разработана автоматизированная система, предназначенная для идентификации течи и её размеров: (течи нет, незначительная течь, малая течь, большая течь). Вид системы представлен на рисунке 22: предусмотрено два измерительных канала – акустический датчик GT-400 и микрофон.

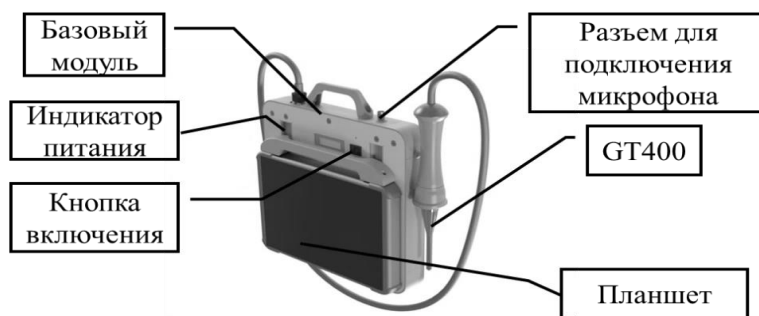


Рисунок 22 – Фото системы контроля протечек оборудования

При синтезе данной системы обоснование выбора средств регистрации выполнено путем анализа реакции измерительных каналов на зарождение дефектов.

Для идентификации течи и её размеров внедрена энтропийная параметризация диагностических сигналов. Результаты представлены на рисунке 23.

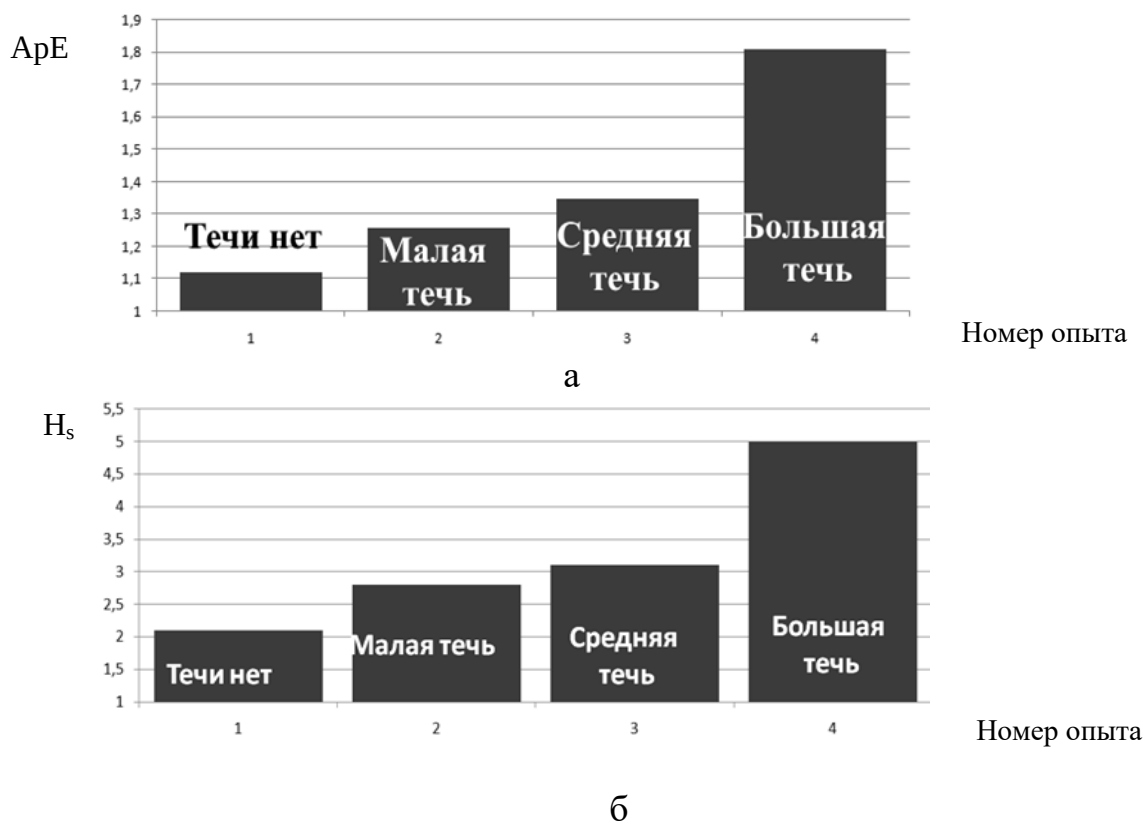


Рисунок 23 – Изменение энтропийных параметров звуковых сигналов при различных характеристиках течи: а) изменение аппроксимационной энтропии; б) изменение энтропии Шеннона

Реализация алгоритма модернизированного ССА акустическим сигналам обеспечила снижение вероятности ошибок диагностирования.

Система используется с 2018 г. на Нововоронежской АЭС.

5) Система контроля технического состояния и настройки электроприводного оборудования. В ходе разработки системы (рисунок 24) решалась задача повышения чувствительности при диагностике по электрическим сигналам объекта. По электрическим сигналам диагностируются тысячи единиц арматуры на АЭС, но не все дефекты выявляются традиционными методами обработки сигнала.



Рисунок 24 – Система контроля технического состояния и настройки электроприводного оборудования (арматура, вентиляторы, насосы)

На рисунке 25 параметры сигнала тока двигателя арматуры представлены в виде нагрузок. Вектор признаков сформирован по

результатам обработки сигналов тока двигателя: пусковые токи при открытии и закрытии ($I_{по}$, $I_{пз}$), рабочие токи ($I_{ро}$, $I_{рз}$), время открытия и закрытия (T_o и T_z), отношения пусковых и рабочих токов (S_o и S_z), плавности хода (Y_o и Y_z), а также энтропия Шеннона на участке рабочего хода при открытии и закрытии ($H_{shotкр}$, $H_{shзакр}$). Нагрузки энтропийных показателей превосходят показатели традиционно используемых.

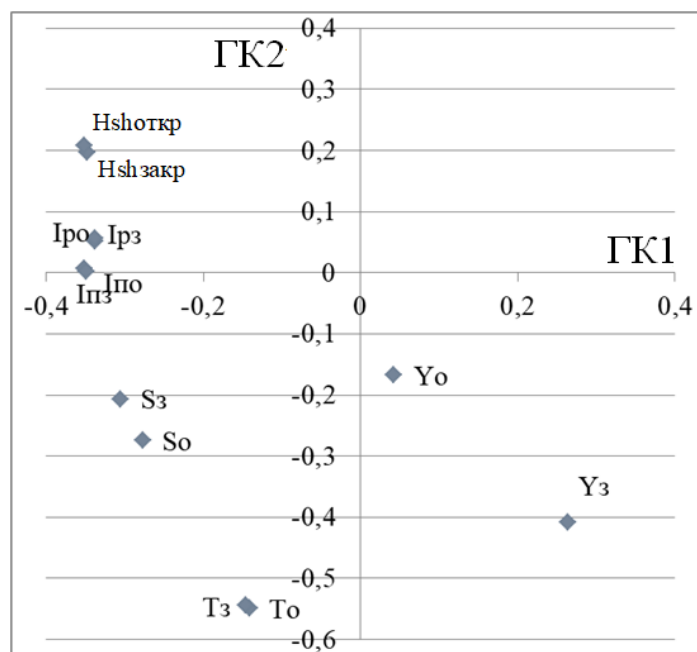


Рисунок 25 – График нагрузок диагностических параметров ЭПА

Применение алгоритма ССА к ганкелевой матрице сигнала тока обеспечило снижение вероятности ошибок диагностирования (рисунок 26). За счет высокого качества диагностирования по электрическим сигналам возможно исключение виброакустического канала, т.е. создание более рациональной конфигурации.

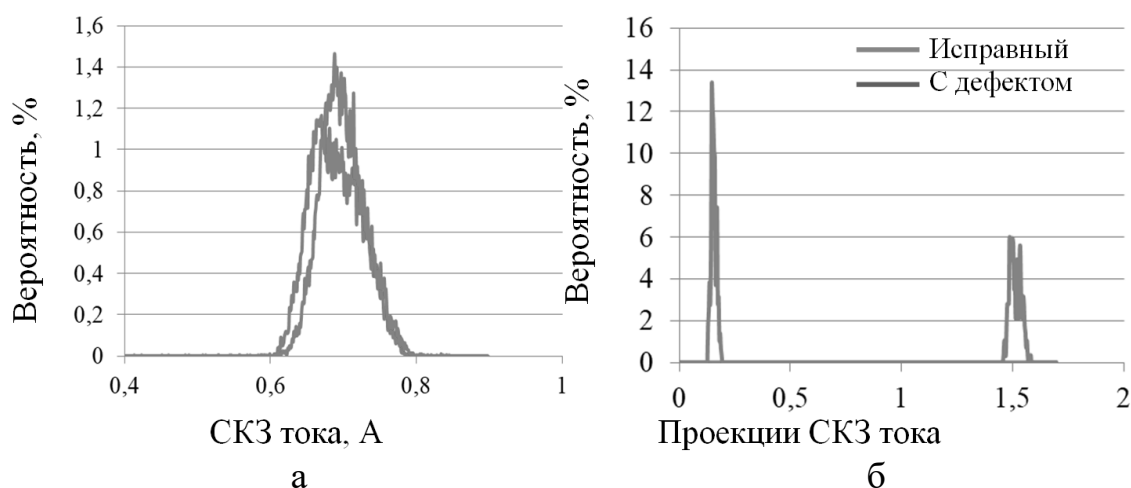


Рисунок 26 – Функции плотности распределения вероятности параметров тока двигателя: а) без обработки; б) после обработки

Система внедрена на Нововоронежской АЭС с 2018 г.

б) Система тепловизионного контроля электромеханического оборудования АЭС. В настоящее время большой объём результатов термографирования не систематизирован и обрабатывается без учета взаимосвязи с данными другой физической природы. С целью снижения издержек на обслуживание электроприводного и тепломеханического оборудования создана комплексная автоматизированная система хранения и анализа результатов термографирования.

Программное обеспечение системы реализует для обработки тепловизионных параметров совместно с параметрами другой физической природы алгоритм МГК (аналогично комплексу контроля состояния источников резервного питания АЭС).

Система внедрена на Ростовской АЭС с 2023 г.

Таким образом, концепция улучшения характеристик систем технической диагностики доведена до уровня инженерной реализации.

В Заключение перечислены основные результаты диссертационной работы и сформулированы вытекающие из нее **выводы**.

В Приложения вынесены копии документов, подтверждающих новизну и внедрение результатов.

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что существенным моментом диагностического сопровождения АЭС в период ППР является подготовка и принятие решений о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования до следующей плановой остановки энергоблока. В связи с тенденцией увеличения межремонтного периода необходимо проведение научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование методов и алгоритмов идентификации дефектов на ранних этапах их зарождения.

2. С использованием статистической теории обнаружения сформулированы и прошли экспериментальную апробацию критерии эффективности диагностических систем, включающие условные вероятности обнаружения, необнаружения дефектов и достоверность. Способ оценки достоверности оформлен в виде международного патента.

3. Разработана модель зарождающихся дефектов, предназначенная для оценки эффективности систем диагностики, описывающая проявления дефектов оборудования в диагностических сигналах в виде слабых нелинейных генераций. Модель позволила провести исследования для обоснования выбора методов обработки диагностических сигналов.

4. Разработана модель, предназначенная для оценки эффективности многоканальных диагностических комплексов, параметры которой согласованно изменяются под влиянием дефекта в зависимости от их физической природы и места регистрации, при этом изменение параметров не приближается к пороговым значениям. Модель обеспечила описание ранних проявлений дефектов дизельного двигателя в измерительных каналах для обоснования количества и состава информационных каналов диагностического комплекса.

5. Установлено, что, получаемый в результате сингулярного разложения ганкелевой матрицы диагностического сигнала спектр собственных значений, визуализирует изменение структуры данных под влиянием дефектов.

6. Разработан модернизированный метод сингулярного спектрального анализа. Экспериментальными исследованиями установлено, что сопоставление проекций параметров исправного и анализируемых состояний в эталонном базисе обеспечивает чувствительность к дефектам электромеханического оборудования и снижение ошибок диагностирования по сравнению с исходными параметрами, в частности, при установлении состояния трубопроводной арматуры до 50 %.

7. Разработан модернизированный метод главных компонент, обеспечивающий возможность комплексного анализа проекций параметров различных по физической природе в эталонном базисе. Диагностирование на основании сопоставления проекций параметров исправного и анализируемого состояний имеет практическое преимущество в связи с отсутствием необходимости обоснования пороговых значений каждого из параметров эмпирическим путем. Новизна подхода подтверждается международным патентом.

8. Разработаны методы получения и анализа фазовых портретов диагностических сигналов, раннюю идентификацию зарождающихся дефектов за счет визуализации нелинейных и хаотических процессов, связанных с развитием дефектов, в объекте диагностирования. Что позволило выявить признаки зарождающегося дефекта при диагностике трубопроводной арматуры на год раньше, чем они были идентифицированы штатной системой.

9. Разработаны методы энтропийной параметризации. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований получено подтверждение связи численных значений энтропийных показателей вариабельности и хаотичности диагностических сигналов с состоянием электромеханического оборудования.

10. Экспериментально подтверждена возможность идентификации с помощью модернизированного метода сингулярного спектрального анализа исследуемых временных рядов относительно слабых изменений структуры исследуемых временных рядов. Например, ступенчатое возмущение 2% определяется по выборке, которая включает 600 значений, сформированных до возмущения и 400 после возмущения. Что определяется как предел чувствительности метода к данному типу возмущения.

11. Формализованы этапы структурно-параметрического синтеза диагностических комплексов как итерационный процесс, связанный с последовательным формированием альтернативных вариантов системы до тех пор, пока не будет достигнуто соответствие критериям эффективности.

12. На примере создания системы диагностики дизельного двигателя реализован подход к анализу эффективности диагностических комплексов на основе метода главных компонент, обеспечивающий комплексный анализ

диагностических параметров. Наглядный визуальный анализ многоканальных диагностических комплексов обосновывает стратегию их совершенствования.

13. На основе рекомендаций по разработке и совершенствованию многоканальных диагностических комплексов разработаны и внедрены диагностические комплексы для принятия своевременных решений по управлению состоянием объектов:

- перегрузочной машины ядерного топлива;
- дизель-генераторных установок резервного питания;
- приводов системы управления и защиты реакторной установки;
- трубопроводной арматуры.

14. Достигается повышение эффективности эксплуатации АЭС в условиях увеличения межремонтных периодов путем разработки методов и алгоритмов идентификации дефектов оборудования на ранних этапах их зарождения и принятия решений о возможности безопасной эксплуатации данного оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

В журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ по специальности 2.3.1 (05.13.01):

1. Абидова Е.А., Бойко В.В., Лапкис А.А. Инструменты кластерного анализа для построения системы диагностики электроприводного оборудования. Автоматизация в промышленности. – 2020. - № 11. – С. 37-42. DOI 10.25728/avtprom.2020.11.07;

2. Абидова Е.А., Бойко В.В., Лапкис А.А. Контроль работы машины перегрузочной с помощью отображения диагностической информации в многомерном пространстве признаков. Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2020. Т. 9. № 5. С. 460-469. DOI: 10.1134/S2304487X20050028;

3. Абидова Е.А., Дембицкий А.Е., Чернов А.В. Разработка системы диагностики дизель-генераторной установки. Системы управления и информационные технологии. Воронежский государственный технический университет. Воронеж. ISSN 1729-5068. 2021г. №1 – с. 49-53;

4. Абидова Е.А., Чернов А.В., Лапкис А.А., Симакова Н.А., Дембицкий А.Е. Использование энтропийных показателей в диагностических процедурах. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 4 (212). – С. 24-29;

5. Абидова Е.А., Лапкис А.А., Ожерельев В.Д., Чернов А.В. Паспортизация перегрузочных операций для контроля состояния оборудования атомной электростанции. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021; 9(1). Доступно по: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=917> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.020;

6. Абидова Е.А., Лапкис А.А., Дембицкий А.Е., Симакова Н.А. Особенности применения метода главных компонент для обработки диагностических сигналов электромеханического оборудования. Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2021. – Т. 10, № 1. – С. 85-92;

7. Абидова Е.А., Данилов А.Д., Дембицкий А.Е., Чернов А.В. Метод комплексного анализа данных при диагностике сложного энергетического

оборудования. Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. - Т. 17, № 4. – С. 27-35;

8. Абидова Е.А., Дембицкий А.Е., Лапкис А.А., Симакова Н.А. Использование энтропийных преобразований в диагностических комплексах. Автоматизация в промышленности. – 2021. - № 12. – С. 44-48. – URL: <http://avtprom.ru/article/ispolzovanie-entropiinykh-preobr>;

9. Абидова Е.А., Дембицкий А.Е., Лапкис А.А., Швеиц Д.В. Расчётный метод контроля состояния электропривода запорной арматуры. Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 45-50. – URL: <http://avtprom.ru/article/raschetnyi-metod-kontrolya-sosto>;

10. Абидова Е.А., Ратушный В.И. Регистрация и обработка сигналов в измерительном комплексе контроля протечек трубопроводной арматуры атомной электростанции. Омский научный вестник. 2023 No 4 (188). С. 117-124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124.

11. Абидова Е.А. Методика формирования многоканальной системы технической диагностики с оценкой целесообразности использования измерительных каналов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2023. № 4. С. 41-48. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-4-41-48>.

12. Абидова Е.А. Разработка модели многоканальной многопараметрической системы диагностики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2024. № 1. С. 27–33. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2024-1-27-33>.

13. Абидова Е.А. 12. Абидова Е. А. Алгоритм обработки данных в задаче управления состоянием оборудования // Омский научный вестник. 2024. No 4 (192). С. 125–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-125-133

14. Абидова Е.А., Муха Ю.П., Чернов А.В., Хегай Л.С. Алгоритмизация процесса обработки диагностических сигналов электроприводной арматуры с учетом хаотических составляющих. Инженерный вестник Дона : электрон. науч. Журн, 2017. – № 2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4253>;

15. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В. Диагностика негерметичности в затворе электроприводной арматуры по энтропийным показателям звуковых и ультразвуковых сигналов. Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журн, 2017. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493>;

16. Абидова Е.А., Белоус М.А., Хегай Л.С., Чернов А.В. Методика диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки. Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журн, 2017. – № 4. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493>;

В журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ по другим специальностям

17. Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Пугачев А.К. Алгоритм поиска течи теплоносителя первого контура ВВЭР-1000. Глобальная ядерная безопасность, 2014. - № 4 (13). – С. 62-67;

18. Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Никифоров В.Н. и др. Цели и задачи организации диагностического мониторинга оборудования АЭС. Глобальная ядерная безопасность, 2015. - № 3 (16). – С. 70-76;

19. Абидова Е.А., Драка О.Е., Соловьев В.И., Хегай Л.С., Пугачева О.Ю., Чернов А.В. Обработка изображений в системе диагностики дизелей-генераторов АЭС с использованием энтропийных подходов. Ядерная физика и инжиниринг, 2017. - Т. 8, № 2. – С. 181-186;

20. Абидова Е.А., Бейсуг О.И., Драка О.Е. Пугачёва О.Ю., Дембицкий А.Е. Оценка состояния водного объекта в зоне размещения РоАЭС с использованием метода главных компонент. Глобальная ядерная безопасность, 2018. - № 4 (29). – С. 17-23;

21. Абидова Е.А., Бейсуг О.И., Благин А.В., Драка О.Е., Чернов А.В. Использование энтропийных методов обработки видеоизображений для контроля состояния оборудования АЭС. Глобальная ядерная безопасность, 2019. – № 1 (30). – С. 106-112;

22. Абидова Е.А., Бабенко Р.Г., Дембицкий А.Е. Повышение достоверности диагностических процедур при определении технического состояния электромеханического оборудования. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. – № 4. – С. 106-112;

23. Абидова Е.А., Лапкис А.А. Чернов А.В. Контроль операций перегрузочной машины по спектральным параметрам токового сигнала в пространстве главных компонент. Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2020. - № 2. – С. 38-43;

24. Абидова Е.А., Лапкис А. А., Безматеева А.Н. Анализ деформированного состояния активной зоны ВВЭР-1000 с помощью системы управления машины перегрузочной. Глобальная ядерная безопасность, 2021. – № 1 (38). – С. 84-93;

25. Абидова Е.А., Швец Д.В., Калашников М.В., Поваров П.В. Воробьев Е.В. Концепция создания комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля. Глобальная ядерная безопасность. – 2022. - № 1 (42). – С. 60-66;

26. Абидова Е.А. Совершенствование методов анализа технического состояния электромеханического оборудования АЭС. Глобальная ядерная безопасность. 2023. №3 (48). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-metodov-analiza-tehnicheskogo-sostoyaniya-elektromehanicheskogo-oborudovaniya-aes>

Статьи в журналах входящих в перечень Scopus:

27. Abidova E.A., Khagai L. S., Chernov A.V. Diagnostics of Rotary Equipment by Means of Entropic Indices Based on Electrical Signals. Russian Engineering Research, September 2018, Volume 38, Issue 9. – P. 699–701;

28. Abidova E.A., Chernov A.V., Lapkis A.A. Bearing Defects diagnostics using the principal components analysis. IOP Materials Science Conference Series: Materials Science and Engineering 680 (2019) 012005 IOP Publishingdoi:10.1088/1757-899X/680/1/012005;

29. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Zarochintseva I.V., Lapkis A.A., Chernov A.V. NPP Refueling Process Monitoring Based on the Refueling Machine Current Signals. Journal of Physics: Conference Series, September 2020, Volume 1679 032016. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032016;

30. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Lapkis A.A., Chernov A.V. Synthesis of Control Systems for Complex Technical Objects. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;

31. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Lapkis A.A., Zarochintseva I.V., Chernov A.V. Processing NPP Electromechanical Equipment Diagnostic Signals Using Principal Component Analysis in Hardware–Software Complexes. Smart Innovation, Systems and Technologies. - 2022. – Vol. 232. – P. 415-426. International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”, ERZR 2021Virtual, Online14-17 April 2021. – URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115178446&origin=resultslist>;

32. Abidova E.A., Dembitsky A.E., Chernov A.V. Methodology and hardware-software complex for diagnosing diesel generator units of nuclear power plants. International Journal of Risk Assessment and Management, 2021 Vol.24 No.2/3/4, pp.97 – 116.

33. Abidova E.A., Povarov P.V., Popov V.M., Prytkova D.A. Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Generators Together with Standard Instrument Readings. Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 86, Issue 11, pp.2384-2391

34. Abidova E.A. Visualization and Analysis Method of Defect Manifestation in Electromechanical Equipment. Emerging Science Journal, 2024, Vol 8, No 4, pp. 1293-1303.

Научные результаты диссертации отражены также в следующих изданиях:

- патенты РФ:

35. РФ 2552854 С2. МПК G01R 31/34 Способ диагностики технического состояния электроприводного оборудования; / Абидова Е.А., Никифоров В.Н., Пугачева О.Ю., Пугачев А.К., Бабенко Р.Г., Елзов Ю.Н., Сиротин Д.В. - № 2013146727/28; заявлено 2013.10.18, опублик. 2015.06.10;

36. РФ 2574315 С1. МПК G01R 31/34 Способ диагностики электромеханического оборудования / Абидова Е.А., Никифоров В.Н., Пугачева О.Ю., Пугачев А.К. - № 2014151080/28; заявлено 2016.02.10, опублик. 2016.02.10;

37. РФ 2511801 С2. МПК G01M 15/02 Способ определения технического состояния энергетического оборудования с использованием параметров термографических изображений / Абидова Е.А., Горбунов И.Г., Пугачёва О.Ю. Дембицкий А.Е., Кривин В.В., - №2021139413; заявлено 2021.28.12, опублик. 2023.03.03;

-международные патенты:

38. РФ 2753156 С1, № 044033 В1, ЕР 4 209 768 А1, ВR 112022027066-6 А2, US 2023/0266201 А1 и др. МПК G01M 15/04, G01M 15/12 Способ контроля технического состояния дизель-генератора при эксплуатации / Абидова Е.А., Горбунов И.Г., Никифоров В.Н., Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И. – № 2020128924; заявлено 2020.09.01, опублик. 2021.08.12;

39. РФ 2753578 С1, № 044656 В1, ЕР 4 209 767 А1, ВR 112022027072-0 А2, US 2023/0266160 А1 и др. МПК G01M 15/12 Способ диагностики технического состояния роторного оборудования / Абидова Е.А., Бабенко Р.Г. – № 2020128922; заявлено 01.09.2020, опублик. 2021.08.17;

40. РФ 2754620 С1, № 044179 В1, ВR 112022027068-2 А2, CN 115836193 А, US 2023/0265976 А1 и др. МПК G01M 3/24, F17D 5/02 Способ контроля герметичности и обнаружения места течи в трубопроводе с запорным элементом / Абидова Е.А., Синельщиков П.В. - № 2020128921; заявлено 2020.09.01, опублик. 2021.09.06.

- монография:

41. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В. Совершенствование методов обработки информации в системах диагностики оборудования АЭС. Монография. Москва: НИЯУ МИФИ; Волгоградск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 118 С.

- статьи и материалы конференций:

42. Абидова Е.А., Носенко В.А., Пугачёва О.Ю., Чернов А.В. Спектральный анализ диагностирования электроприводной аппаратуры. Известия Волгоградского государственного технического университета :

межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград, 2012. – № 6(93). – С. 85-89. – (Сер. Электроника, измерительная техника и связь. Вып. 6);

43. Абидова Е.А., Пугачёва О.Ю., Малик О.В. Оценка технического состояния ЭПА по фазовым портретам её диагностических сигналов. Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2015 : сб. тез. и ст. науч.-практ. конф., 16–20 февр. 2015 г. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 31-34;

44. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В., Бекетов В.Г. Энтропийные методы обработки диагностической информации. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс]: тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD);

45. Абидова Е.А., Никифоров В.Н. Пугачева О.Ю. и др. Информационный паспорт оборудования АЭС. Сопровождение ремонтных кампаний. X Междунар. науч.-технич. конф., 16 -19 мая 2017 г. / ОКБ «Гидропресс». – г. Подольск.

<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2017/autorun/article66-ru.htm> ISBN 978-5-94883-146-6;

46. Абидова Е.А., Бейсуг О.И., Дембицкий А.Е., Пугачёва О.Ю. Метод главных компонент в оценке экологического состояния дельты реки Дон. Системы обеспечения техносферной безопасности: тез. докл. V всероссийской. конф., 5–6 октября 2018 г. / Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону): ЮФУ, 2018. – С. 99-101. – ISBN 978-5-9275-2887-5;

47. Абидова Е.А., Никифоров В.Н., Пугачёва О.Ю. и др. Методы и средства оперативного контроля состояния дизель-генераторных установок АЭС. 55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом: тез. докл. науч.-практ. конф., 24–27 сентября 2019 г. - г. Нововоронеж;

48. Абидова Е.А., Дембицкий А.Е., Чернов А.В. Программно-технический комплекс регистрации и анализа диагностической информации дизель-генераторного оборудования АЭС. Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: международная конференция МАБР-2020 (Санкт-Петербург, 23–25 июня, 2020 г.): – Санкт-Петербург, 2020. – 221 С. - ISBN 978-5-8088-1494;

49. Абидова Е.А., Нечитайлов В.В., Ермилов И.В., Крапивко Е.Н. Разработка комплексной автоматизированной системы хранения и анализа результатов тепловизионного контроля оборудования. Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции (16 декабря 2021 года). – Москва : НИЯУ МИФИ ; Балаково: БИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – Т. II. – С. 11-15. - ISBN 978-5-7262-2872-3;

50. Абидова Е.А., Прыткова Д.А., Пугачёва О.Ю., Чернов А.В. Анализ тепловизионных параметров оборудования АЭС с использованием комплексной автоматизированной системы. Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XIX Международной научно-практической конференции, 6 – 7 июня 2023 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 9-10.

51. Абидова Е.А., Совершенствование методов и алгоритмов обработки сигналов в диагностических комплексах оборудования АЭС XX Международной научно-практической конференции, 19 – 20 сентября 2024 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – С. 7-9.

Подписано к печати _____ г
Бумага «SvetoСору» 80 г/м². Объем 0.83 усл.печ.л.
Тираж 100 экз.
Изд. № Заказ №

Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ.
Типография ВИТИ НИЯУ МИФИ.
г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94