

На правах рукописи

Зайниев Азат Венерович



**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И
ДИАГНОСТИКИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ
ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

***Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы
и системы***

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

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Хакимьянов Марат Ильгизович

Официальные оппоненты:

Радионов Андрей Александрович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», кафедра «Автоматика и управление», заведующий кафедрой;

Серебряков Артем Владимирович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Электрооборудование, электропривод и автоматика», доцент.

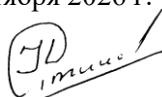
Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Защита диссертации состоится **23 декабря 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из наиболее эффективных способов утилизации попутного нефтяного газа является использование газопоршневых электроагрегатов (ГПЭА) с синхронными генераторами переменного тока (СГ) и двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

При этом ограниченные средства на ремонт оборудования и неблагоприятная внешняя конъюнктура часто вынуждают промышленные предприятия переходить на стратегию ремонта по техническому состоянию. Данная стратегия может применяться только при наличии современных систем контроля технического состояния и технического диагностирования.

Несмотря на то, что вопросы диагностики электротехнических комплексов и систем изучаются широким кругом специалистов, в настоящее время имеется довольно широкий круг нерешенных задач в данной области знаний.

Все современные методы технической диагностики обладают рядом своих недостатков. В частности, применение вибродиагностики электрических машин связано с затруднениями, связанными с влиянием приводящего (приводимого) агрегата. При использовании диагностики по изменению внешнего магнитного поля возникают сложности интерпретации измерений, связанные с наличием искажений измеряемого сигнала от внешних помех. К недостаткам спектродиагностики можно отнести «размытие» спектра при нестационарных условиях работы машины, а также при влиянии внешней сети. Существующие подходы к разработке систем организации ремонта по техническому состоянию требуют совершенствования методов и алгоритмов оценки и прогнозирования технического состояния оборудования.

Необходимость решения вышеуказанных задач предопределяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в развитие метода диагностики электрических машин, в том числе синхронных генераторов, по внешнему магнитному полю внесли российские ученые Ю.Б. Казаков, А.Н. Морозов, Д.И. Баловнев, А.А. Татевосян, а также зарубежные

авторы V. Gurusamy, E. Bostanci, H. Ehya, A. Nysveen. Можно отметить, что в работах авторов уделено недостаточно внимания диагностике комбинированных дефектов и исключению искажений измеряемого сигнала от внешних помех.

Подходы к мультифизической диагностике электротехнических комплексов рассмотрены в работах А.В. Лукьянова, Ю.С. Мухачева, А.Н. Горожанкина, И.О. Бельского, А.С. Карандаева, В.И. Завидея. При этом не раскрыты дополнительные возможности повышения полноты и достоверности диагностирования дефектов за счет возможностей, предоставляемых развивающимися технологиями цифровых двойников и цифровых теней.

Проблемами оценки технического состояния автономных генераторных комплексов занимались как российские, так и зарубежные ученые, среди которых А.С. Стеклов, А.В. Серебряков, В.Г. Титов, А.А. Радионов, С. Salomon. Опираясь на работы указанных авторов, можно отметить, что в них недостаточно внимания было уделено исследованию влияния приводящих механизмов и изменениям нагрузки в режиме реального времени.

Объект исследования – электротехнические комплексы ГПЭА с СГ.

Предмет исследования – системы диагностики и контроля технического состояния электротехнических комплексов ГПЭА с СГ.

Цель работы – совершенствование систем контроля технического состояния и диагностики ГПЭА с СГ для повышения эффективности их эксплуатации.

Идея заключается в создании и внедрении диагностических моделей на основе мультифизического подхода с применением технологии цифровых двойников и моделей управления техническим состоянием на основе теории нечетких множеств, которые позволят повысить полноту технического диагностирования и перейти на стратегию ремонта по техническому состоянию.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выполнить анализ электротехнического комплекса ГПЭА, классифицировать возможные неисправности. Проанализировать возможности современных методов технического диагностирования.

2. Предложить комплексный подход к оценке работоспособности компонентов синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) в составе ГПЭА на основе анализа пространственно-временных характеристик внешнего магнитного поля для целей технического диагностирования дефектов, в том числе комбинированных.

3. Разработать цифровую тень ГПЭА для комплексного технического диагностирования ГПЭА на основе мультифизического подхода.

4. Предложить модели оценки надежности, определения и прогнозирования технического состояния ГПЭА в условиях отсутствия или недостатка статистических данных.

5. Провести эмпирические исследования разработанных моделей и оценить технико-экономические показатели эффективности их применения на действующей электростанции.

Научная новизна работы:

1. Разработан параметрический метод синтеза дефектных сценариев электромагнитного состояния СГПМ на основе суперпозиции эффектов нескольких типов повреждений, обеспечивающий возможность оценки устойчивости электромагнитных характеристик и диагностики сложных сочетаний дефектов.

2. Впервые установлена возможность надежного определения типов дефектов (механических, электрических, комбинированных) в ГПЭА с синхронным генератором на постоянных магнитах на основе анализа кросскорреляционных коэффициентов между вибрацией, напряжением и магнитным потоком.

3. На основе использования метода анализа иерархий (МАИ) установлена возможность оценки надежности ГПЭА и его функциональных узлов с учетом установленных нормативной документацией критериев в условиях отсутствия или недостатка статистических данных.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:

п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов

и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электро-механические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п. 4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана цифровая тень магнитного поля СГПМ, имеющая многоуровневую архитектуру и позволяющая проводить раннюю диагностику локальных повреждений магнитной системы, в том числе при одновременном наличии нескольких видов неисправностей (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025688300).

2. Разработана модель интеграции диагностических признаков при использовании мультифизического подхода, позволяющая определять дефекты на ранних стадиях их развития за счет комплексной обработки сигналов различной физической природы и подтверждения согласованности проявлений в смежных подсистемах на основе приращений межканальных связей (патенты на изобретения № 2851765 и № 2837784, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662535).

3. Предложены усовершенствованные модели определения показателей надежности функциональных узлов ГПЭА на основе метода анализа иерархий и оценки технического состояния ГПЭА на основе нечеткой логики (свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2024687948, № 2024689233).

4. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Башнефть-Добыча» (акты внедрения № МЛ-12658 от 26.06.2025 г., № МЛ-40789 от 21.08.2024 г.), ООО «РН-Ванкор» (акт внедрения от 20.09.2024 г.) в рамках применения стратегии ремонта по техническому состоянию.

Методология и методы исследования. Проведение иссле-

дований осуществлялось с использованием теоретических и эмпирических методов, базирующихся на фундаментальных положениях теории электромеханического преобразования энергии, теории электрических машин, теории нечетких множеств и нечеткой логики, теории регрессионных моделей, а также методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ *Google Colab*, *PlantUML*, *Matlab*, *PyFEMM*, *Microsoft Excel*, объектно-ориентированного программирования с использованием языков программирования *Python*, *C++*. Экспериментальные данные для исследований получены на действующей ГПЭС установленной мощностью 12 МВт.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ, позволяющая проводить раннюю диагностику локальных повреждений магнитной системы, в том числе при одновременном наличии нескольких видов неисправностей за счет параметрического синтеза дефектных сценариев электромагнитного состояния СГПМ на основе принципа суперпозиции.

2. Мультифизический подход к диагностике ГПЭА на основе идентификации преобладающего источника формирования диагностического признака по активным частотам сигналов вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля с подтверждением корреляционной согласованности проявлений в смежных подсистемах с учетом приращений межканальных связей, который обеспечивает повышение полноты диагностирования дефектов ГПЭА.

3. Модель управления техническим состоянием ГПЭА, осуществляемая на основе инструментов теории нечетких множеств и позволяющая в условиях неполноты данных оценивать надежность ГПЭА и их функциональных узлов, непрерывно в режиме реального времени контролировать и прогнозировать изменение индекса технического состояния.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования, а также подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на действующей газопоршневой электростанции.

Апробация результатов диссертации проведена на 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 8 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: IX Международная научно-техническая конференция «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, апрель 2024 г.); Научный семинар аспирантов Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (IEEE, Магнитогорский государственный технический университет им. Носова, г. Магнитогорск, сентябрь 2024 г.); Российский энергетический форум – 2024 (ООО «Башкирская генерирующая компания», г. Уфа, октябрь 2024 г.); X Международная научно-техническая конференция «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, апрель 2025 г.); XX международная научно-техническая конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, апрель 2025 г.); Научный семинар аспирантов Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (IEEE, Магнитогорский государственный технический университет им. Носова, г. Магнитогорск, сентябрь 2025 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, июнь 2025 г.); XXI международная научно-техническая конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, апрель 2026 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке многоуровневой архитектуры цифровой тени СГПМ, обеспечивающей параметрический метод синтеза дефектных сценариев электромагнитного состояния; разработке цифровой тени

ГПЭА, обеспечивающей реализацию мультифизического подхода к техническому диагностированию ГПЭА путем спектрального и кросс-корреляционного анализа; усовершенствовании математической модели вычисления индекса технического состояния ГПЭА на основе нечеткой логики; усовершенствовании методики определения показателей надежности функциональных узлов ГПЭА на основе метода анализа иерархий. В работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя составляет не менее 80%.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 14 печатных работах, в том числе в 7 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК). Получено 2 патента на изобретения и 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 139 наименований, списка обозначений и сокращений и 11 приложений. Диссертация изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ электротехнического комплекса ГПЭА, выполнена классификация возможных неисправностей и современных методов диагностики ГПЭА. Показана ограниченная специализация отдельных методов диагностики. Структурная схема ГПЭА, служащая основой для построения диагностических алгоритмов и моделирования процессов представлена на рисунке 1.

Во второй главе разработан комплексный подход к оценке работоспособности компонентов СГПМ в составе ГПЭА на основе

анализа пространственно-временных характеристик внешнего магнитного поля, позволяющего проводить раннюю диагностику локальных повреждений магнитной системы.

В третьей главе предложен мультифизический подход к диагностике неисправностей, основанный на интеграции и совместном анализе данных вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля. Продемонстрировано, что применение кросскорреляционного подхода в цифровой тени позволяет эффективно интегрировать данные от разнородных датчиков в единую систему диагностики.

В четвертой главе проведено исследование применения нечетких методов для мониторинга и управления техническим состоянием ГПЭА.

Пятая глава посвящена практической реализации разработанных моделей и методик в составе системы диагностики и прогнозирования технического состояния действующей газопоршневой электростанции нефтедобывающего промысла.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ, позволяющая проводить раннюю диагностику локальных повреждений магнитной системы, в том числе при одновременном наличии нескольких видов неисправностей за счет параметрического синтеза дефектных сценариев электромагнитного состояния СГПМ на основе принципа суперпозиции.

Предложенная модульная архитектура цифровой тени для моделирования магнитного поля СГПМ, представленная на рисунке 2, основана на принципе разделения физических задач моделирования на две взаимосвязанные подсистемы: симулятор внутреннего магнитного поля и блок проверки внешнего поля. Такой подход обеспечивает физическую достоверность модели возможность количественной проверки диагностических алгоритмов на основе сравнения с экспериментальными измерениями. Результаты моделирования исправного состояния СГПМ показаны на рисунке 3.

Моделирование дефектных состояний реализовано на основе физически обоснованных математических моделей, учитывающих специфику каждого типа повреждений. Математически процесс моделирования единичного дефекта описывается формулой (1):

$$B_{\text{дефект}} = f_i(B_{\text{норм}}, P_i), \quad (1)$$

где f_i – функция применения i -го типа дефекта; $B_{\text{норм}}$ – распределение магнитного поля в исправном состоянии; P_i – вектор параметров i -го дефекта.

Система включает пять основных типов дефектов: размагничивание постоянных магнитов; эксцентриситет ротора; межвитковое замыкание в обмотке статора; дефекты подшипников; дисбаланс ротора.

Моделирование эксцентриситета ротора, дефектов подшипников и дисбаланса ротора показало наличие небольших искажений на векторных картах, профиль поля по окружности сохраняет синусоидальную форму и практически не отличается от профиля исправного состояния, как по амплитуде, так и по фазовому положению, что делает данный метод малочувствительным к указанным дефектам.

В то же время установлено, что размагничивание постоянных магнитов и межвитковое замыкание в обмотке статора приводят к резкому нарушению симметрии магнитного поля и существенным искажениям формы сигнала. На рисунке 4 представлены результаты моделирования магнитного поля в случае возникновения межвиткового замыкания (МВЗ) обмотки статора с замыканием 30% витков (для наглядности). Как видно из рисунка 4, при МВЗ наблюдается существенный рост амплитуды сигналов от датчиков Холла (до 0,24 Тл).

Нижние пределы обнаружения дефектов определены по критерию Неймана-Пирсона. Минимально обнаружимая степень межвиткового замыкания при единичных замерах составит $S_{K3\min} \approx 10\%$ и может быть снижена до $S_{K3\min} \approx 2\%$ в режиме трендового мониторинга. Минимально обнаружимая степень размагничивания постоянных магнитов $S_{\text{демаг. min}} \approx 20\%$.

Разработанная система моделирования обеспечивает корректное воспроизведение таких состояний на основе принципа су-

перпозиции, процесс моделирования которого описывается математически формулой (2):

$$B_{\text{комб}} = B_{\text{норм}} + \sum_{i=1}^N \Delta B_i, \quad (2)$$

где $\Delta B_i = f_{i(B_{\text{норм}}, P_i)} - B_{\text{норм}}$ – изменение поля от i -го дефекта; N – количество активных дефектов.

На рисунке 5 представлен пример моделирования комбинированного дефекта.

Таким образом, разработанная цифровая тень СГПМ для моделирования магнитного поля, отличающаяся многоуровневой архитектурой, обеспечивает проведение технического диагностирования, в том числе, возможность диагностики сложных сочетаний дефектов за счет параметрического метода синтеза дефектных сценариев на основе суперпозиции аномалий, вызванных наличием нескольких типов повреждений.

2. Мультифизический подход к диагностике ГПЭА на основе идентификации преобладающего источника формирования диагностического признака по активным частотам сигналов вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля с подтверждением корреляционной согласованности проявлений в смежных подсистемах с учетом приращений межканальных связей, который обеспечивает повышение полноты диагностирования дефектов ГПЭА.

Предложенный мультифизический подход к диагностике неисправностей, основанный на интеграции и совместном анализе данных вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля, реализован в программном модуле цифровой тени ГПЭА на языке *Python*. Блок-схема, представленная на рисунке 6, показывает взаимодействие персонала и цифровой тени.

Для количественного анализа взаимосвязи диагностических параметров разной физической природы используется классический коэффициент корреляции Пирсона (3):

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где x_i – значения одного диагностического параметра (например, вибрации); y_i – значения другого параметра (например, напряжения); $\bar{x}, \bar{y}$ – средние значения параметров.

Сравнение ведётся относительно коэффициентов корреляции в исправном состоянии $\rho_{X,Y}^0$; далее анализируются приращения по формулам (4), (5):

$$\Delta\rho_{X,Y} = \rho_{X,Y} - \rho_{X,Y}^0, \quad (4)$$

$$\Delta\rho_{max} = \max\{|\Delta\rho_{Vib,Volt}|, |\Delta\rho_{Vib,Flux}|, |\Delta\rho_{Volt,Flux}|\}, \quad (5)$$

где $\rho_{X,Y}$ – коэффициент корреляции пары каналов X, Y для текущего сценария; $\rho_{Vib,Volt}$ – коэффициент корреляции между сигналами вибрации и напряжения; $\rho_{Vib,Flux}$ – коэффициент корреляции между сигналами вибрации и магнитного потока; $\rho_{Volt,Flux}$ – коэффициент корреляции между сигналами напряжения и магнитного потока; $\Delta\rho_{max}$ – максимальный коэффициент корреляции между сигналами.

На рисунке 7 представлены характерные тепловые карты корреляций для исправного состояния и эксперимента с дефектами магнитной системы.

Совмещение спектрального и корреляционного анализа обеспечивает определение источника неисправности (по активным частотам и физически связанному каналу) и проверку согласованности проявлений в соседних подсистемах. На рисунке 8 приведены примеры спектральных характеристик дефектов.

Механические дефекты. Спектры вибрации характеризуются выраженными компонентами на частоте вращения (25 Гц) и/или частотами дефектов подшипников и их боковыми полосами (рисунок 8, а). Компоненты на частотах дефектов подшипников выявляются и в магнитном потоке (через модуляцию зазора), тогда как напряжение сохраняет спектр исправного состояния.

Электрические дефекты. В спектрах напряжения и магнитного поля доминируют гармоники, кратные сетевой (100 Гц, 150 Гц) и селективные составляющие (например, пятая гармоника на частоте 250 Гц) (рисунок 8, б); вибрация содержит меньшие по амплитуде ответные компоненты. Корреляционно это проявляется в заметной величине $|\Delta\rho_{Volt,Flux}|$ (общая электрическая/магнитная причина) при малых $\Delta\rho_{Vib,Volt}$, $\Delta\rho_{Vib,Flux}$.

Магнитные дефекты. Для размагничивания спектр магнитного сигнала демонстрирует снижение первой гармоники на частоте 50 Гц и рост амплитуд нечётных гармоник (150, 250, 350 Гц) (рисунок

8, в), тогда как согласованность вибрации с другими каналами существенно не изменяется: $\Delta\rho_{vib,volt} \approx 0$. При этом $\rho_{volt,flux}$ обычно смещается к нулю вследствие ослабления связи на 50 Гц.

Комбинированные дефекты. В комбинированных сценариях наблюдается одновременное изменение двух и более пар межканальных связей, что выражается в росте нескольких $|\Delta\rho|$ и повышенных значениях $\Delta\rho_{max}$ на фоне «смешанной» спектральной картины («механические» линии в спектре вибрации совместно с электрическими и магнитными гармониками в спектрах напряжения и магнитного потока (рисунок 8, г)).

На рисунках 9, 10 представлены результаты из диагностического отчета, полученного от цифровой тени ГПЭА. Совокупность обнаруженных признаков указывает на наличие комбинированного дефекта, включающего механические, требующие проверки ротора, подшипников и соосности валов, и электрические неисправности. Выполненная ревизия ГПЭА подтвердила предположение о дефекте подшипника (рисунок 11).

Таким образом, мультифизический подход к диагностике ГПЭА на основе идентификации преобладающего источника формирования диагностического признака по активным частотам сигналов вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля с подтверждением корреляционной согласованности проявлений в смежных подсистемах с учетом приращений межканальных связей, который обеспечивает повышение полноты диагностирования дефектов ГПЭА.

3. Модель управления техническим состоянием ГПЭА, осуществляемая на основе инструментов теории нечетких множеств и позволяющая в условиях неполноты данных оценивать надежность ГПЭА и их функциональных узлов, непрерывно в режиме реального времени контролировать и прогнозировать изменение индекса технического состояния.

Для оценки надёжности ГПЭА предложен алгоритм метода анализа иерархий (МАИ) с учетом мнений нескольких экспертов. Применение МАИ позволяет оценить надежность ГПЭА и их функциональных узлов. Повысить общую надежность ГПЭА можно путем сокращения периодичности диагностического контроля наименее

надежных функциональных узлов.

Проведенный методом анализа иерархий расчет надежности ГПЭА показал, что наиболее уязвимыми функциональными узлами являются обмотка статора генератора и система зажигания ДВС, а наиболее надежными - сердечник статора генератора и коленчатый вал ДВС. Результаты расчетов приведены на рисунке 12.

Предложен комплексный подход к определению индекса технического состояния ГПЭА на основе аппарата нечеткой логики с учетом текущих параметров СГ и ДВС. На рисунке 13 представлена компьютерная модель оценки технического состояния ГПЭА, использующая нейро-нечеткие логические контроллеры. В отличие от известных, предложенная модель учитывает техническое состояние приводного механизма – двигателя внутреннего сгорания. На рисунке 14 представлены результаты вычисления индекса технического состояния шести агрегатов газопоршневой электростанции за период с 01.10.2023 по 30.09.2024 с дискретизацией один раз в сутки, выполненные на основе фактических данных, полученных из системы АСУ ТП электростанции и предложенной математической модели.

Продемонстрировано, что для прогнозирования технического состояния ГПЭА могут применяться адаптивные нейро-нечеткие сетевые модели и регрессионные модели временных рядов.

Таким образом, управление техническим состоянием ГПЭА осуществимо на основе инструментов теории нечетких множеств и позволяет в условиях неполноты данных оценивать надежность ГПЭА и их функциональных узлов, непрерывно в режиме реального времени контролировать и прогнозировать изменение индекса технического состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи по повышению эффективности эксплуатации электротехнических комплексов ГПЭА, используемых для утилизации попутного нефтяного газа на объектах добычи нефти.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведён анализ электротехнического комплекса ГПЭА, идентифицированы основные структурные элементы комплекса и их

взаимосвязи, выполнена классификация возможных неисправностей. Показано, что использование отдельных методов диагностики снижает их диагностическую ценность в применении к сложным электротехническим комплексам, таким как ГПЭА, в состав которых входят машины, основанные на разных физических законах.

2. Разработана многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе ГПЭА. Показано, что к эксцентриситету, дисбалансу ротора и дефектам подшипников предложенный подход малочувствителен. Установлены минимально обнаружимые данным методом степени межвиткового замыкания (10% при единичных замерах с возможностью снижения до 2% в режиме трендового мониторинга) и размагничивания постоянных магнитов (20%). Установлена возможность выявления нескольких типов повреждений на основе принципа суперпозиции.

3. Разработана цифровая тень ГПЭА для комплексного технического диагностирования на основе мультифизического подхода для выявления как единичных, так и комбинированных неисправностей. Продемонстрирована возможность надежного определения типов дефектов на основе анализа кросс-корреляционных коэффициентов между вибрацией, напряжением и магнитным потоком. Установлены устойчивые диагностические признаки: для механических дефектов характерна положительная корреляция между вибрацией и магнитным потоком, тогда как для электрических – устойчивая высокая положительная корреляция между напряжением и магнитным потоком, а для комбинированных – наблюдается универсальное усиление или разбалансировка всех межканальных связей, отражающее мультифизическую природу процесса.

4. На основе предложенного алгоритма применения метода анализа иерархий с учетом мнений нескольких экспертов установлено, что наиболее уязвимыми функциональными узлами являются обмотка статора генератора и система зажигания ДВС (вероятности безотказной работы в течение года составят 0,973 и 0,828 соответственно), а наиболее надежными – сердечник статора генератора и коленчатый вал ДВС (вероятности безотказной работы в течение года 0,991 и 0,907 соответственно). Разработана модель определения ин-

декса технического состояния ГПЭА на основе аппарата нечеткой логики, позволяющая непрерывно контролировать изменение индекса в режиме реального времени. Установлено, что прогнозирование изменений технического состояния ГПЭА возможно, как на основе адаптивной нейро-нечеткой сети, так и на основе регрессионных моделей.

5. Проведены эмпирические исследования разработанных моделей на действующей электростанции. Для ГПЭС установленной мощностью 12 МВт рассчитанный экономический эффект составит 12,1 млн руб. за пятилетний срок мониторинга реализации проекта. Результаты диссертации используются в ООО «Башнефть-Добыча», ООО «РН-Ванкор» в рамках стратегии ремонта по техническому состоянию.

Перспективным направлением развития темы исследования является развитие цифровой тени с внедрением алгоритмов машинного обучения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Зайниев, А.В.** Анализ современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами на объектах добычи нефти / **А.В. Зайниев**, В.Ф. Шайдуллин, М.И. Хакимьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19. – № 3. – С. 133-144. – DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-133-144

2. **Зайниев, А.В.** Определение надежности элементов газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами методом анализа иерархий / **А.В. Зайниев**, В.Ф. Шайдуллин, М.И. Хакимьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – № 4. – Т. 19. – С. 108-119. – DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-108-119

3. **Зайниев, А.В.** Прогнозирование технического состояния газопоршневых агрегатов / **А.В. Зайниев**, В.Ф. Шайдуллин, М.И. Хакимьянов // Электротехнические системы и комплексы. – 2024. – №1(62). – С. 51-55. – DOI: 10.18503/2311-8318-2024-1(62)-51-55 .

4. **Зайниев, А.В.** Спектральный состав выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов как параметр системы технической диагностики / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 52. – С. 96–116. – DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.05.

5. **Зайниев, А.В.** Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики синхронных генераторов газопоршневых агрегатов / **А.В. Зайниев** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 44-51. – DOI: 10.14529/power250105.

6. **Зайниев, А.В.** Комплексная диагностика неисправностей синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе газопоршневого агрегата с использованием нейронных сетей / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 1(65). – С. 23-37.

7. **Зайниев, А.В.** Анализ пространственно-временных характеристик внешнего магнитного поля синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для целей диагностики неисправностей / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 4(68). – С. 24-38.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

8. Патент № 2837784 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Способ контроля технического состояния газопоршневого агрегата в эксплуатации: № 2024111130: заявл. 22.04.2024: опубл. 04.04.2025 / М.И. Хакимьянов, **А.В. Зайниев**, В.Ф. Шайдуллин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» – 10 с.: ил.

9. Патент № 2851765 Российская Федерация, МПК G01N 21/00, G01M 11/00. Способ контроля технического состояния газо-

поршневого электроагрегата в эксплуатации: № 2025107065: заявл. 24.03.2025; опубл. 28.11.2025 / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – 11 с. : ил.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687948. Определение надежности элементов газопоршневого агрегата методом анализа иерархий / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов; № 2024686911; заявл. 07.11.2024; опубл. 22.11.2024 заявитель А.В. Зайниев – 1 с.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689233. Определение индекса технического состояния газопоршневого агрегата с синхронным генератором переменного тока / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов; №2024686941; заявл. 07.11.2024; опубл. 04.12.2024 / заявитель А.В. Зайниев – 1 с.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662535. Цифровой двойник для диагностики неисправностей газопоршневых электроагрегатов на основе мультифизического подхода / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов; №2025661341; заявл. 07.05.2025; опубл. 22.05.2025 / заявитель А.В. Зайниев – 1 с.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025688300. Цифровая модель внешнего магнитного поля синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для диагностики неисправностей / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов; №2025687481; заявл. 06.10.2025; опубл. 17.10.2025 / заявитель А.В. Зайниев – 1 с.

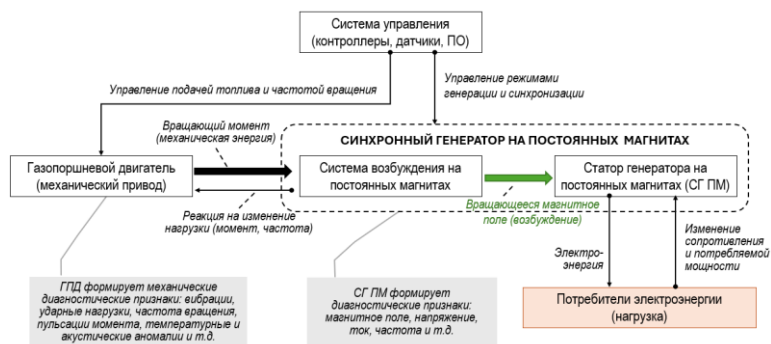


Рисунок 1 – Структурная модель электротехнического комплекса ГПЭА

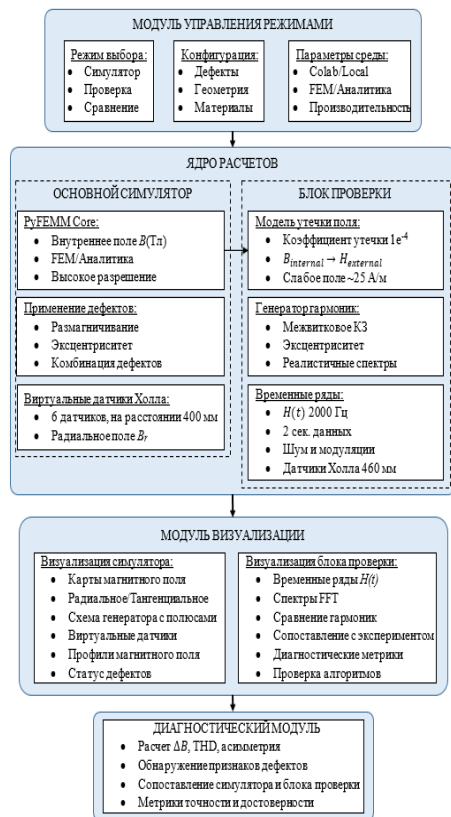


Рисунок 2 – Модульная многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ

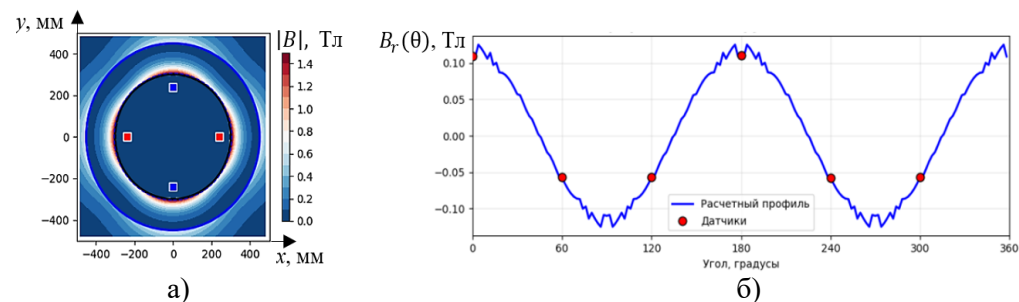


Рисунок 3 – Результаты моделирования распределения магнитного поля в модели исправного состояния генератора
а) магнитуда; б) профиль радиальной составляющей по окружности

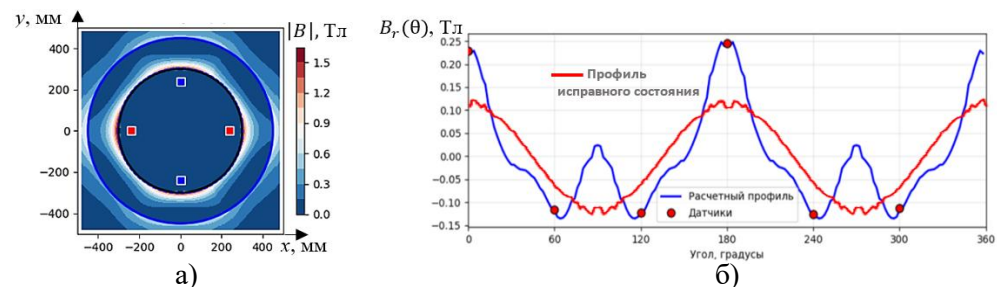


Рисунок 4 – Моделирование магнитного поля в случае возникновения межвиткового замыкания:
а) магнитуда; б) профиль радиальной составляющей по окружности

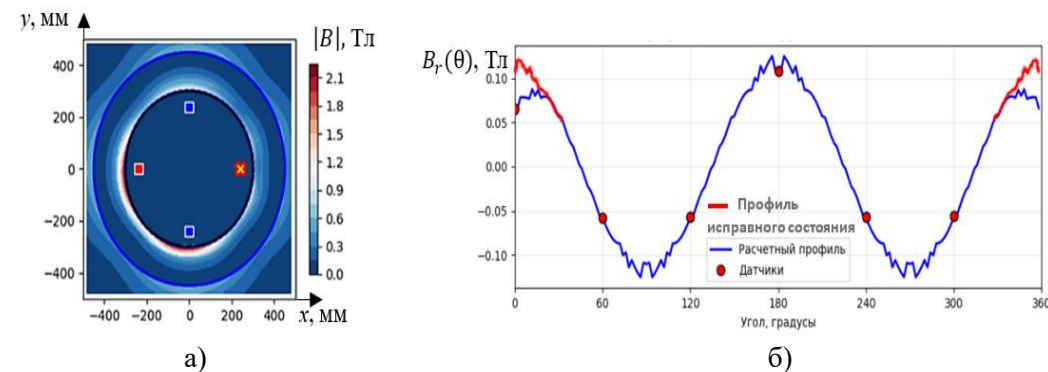


Рисунок 5 – Пример комбинированного дефекта (размагничивание 40% и дисбаланс 50%):
а) магнитуда; б) профиль радиальной составляющей по окружности



Рисунок 6 – Блок-схема взаимодействия персонала и цифровой тени

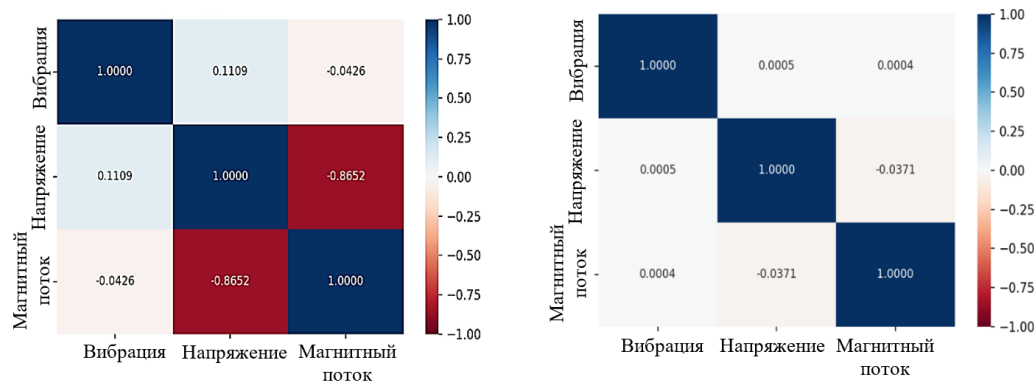


Рисунок 7 – Корреляционные матрицы мультифизических сигналов: а) исправное состояние; б) размагничивание постоянных магнитов

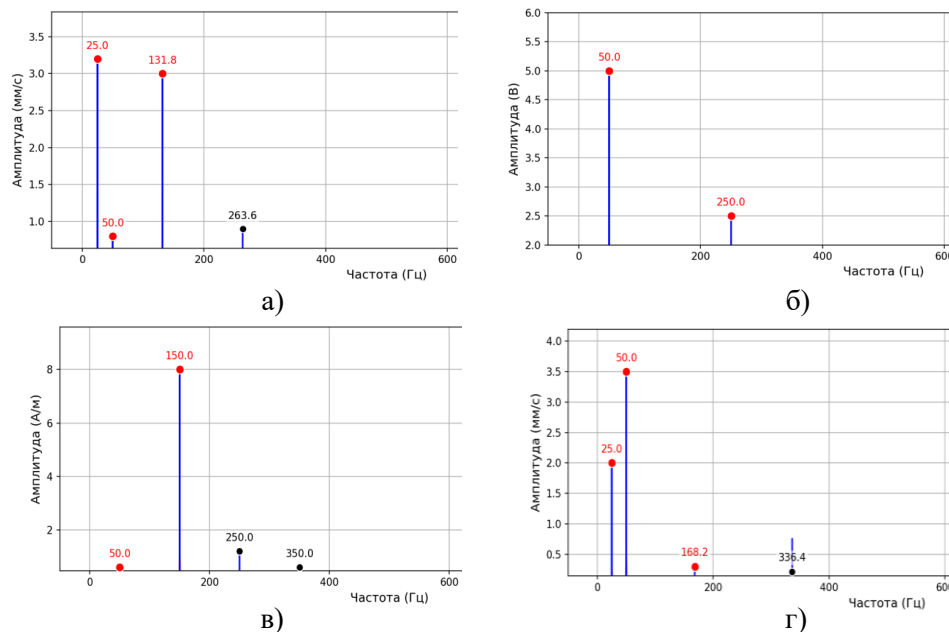
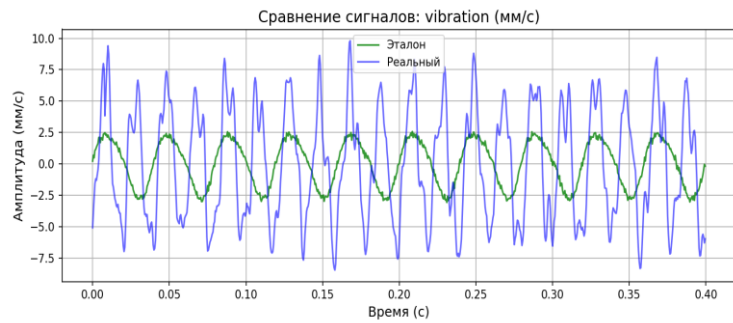
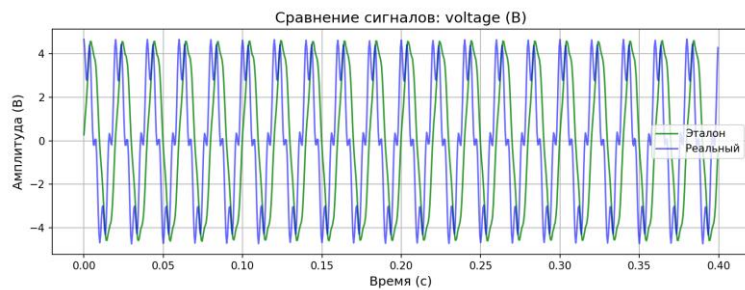


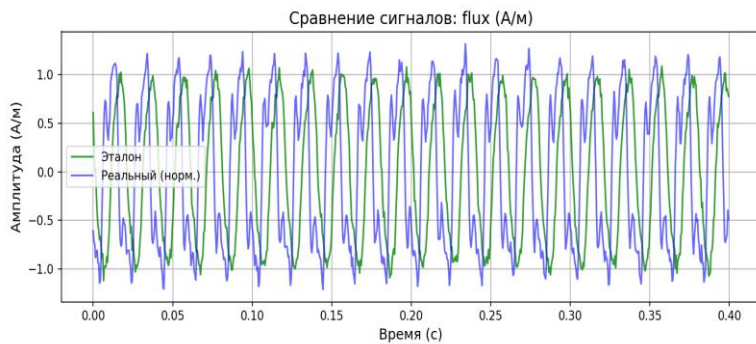
Рисунок 8 –Примеры спектральных характеристик дефектов: а) спектр виброскорости при дефекте наружной обоймы подшипника; б) спектр сигнала напряжения при асимметрии фаз; в) спектр магнитного потока при размагничивании постоянных магнитов; г) спектр виброскорости при комбинированном дефекте внутренней обоймы подшипника и эксцентриситете



а)



б)



в)

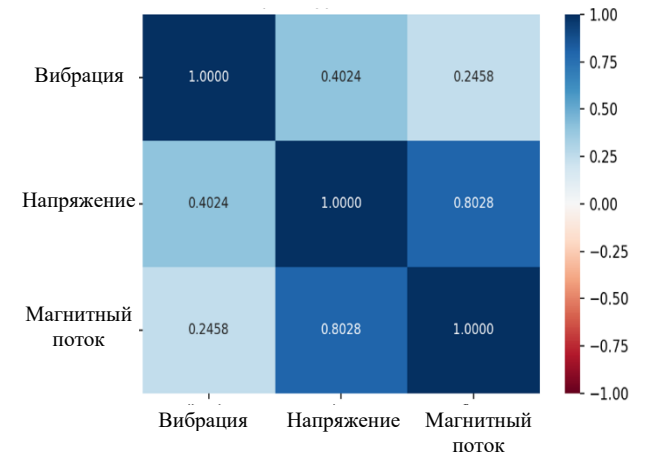
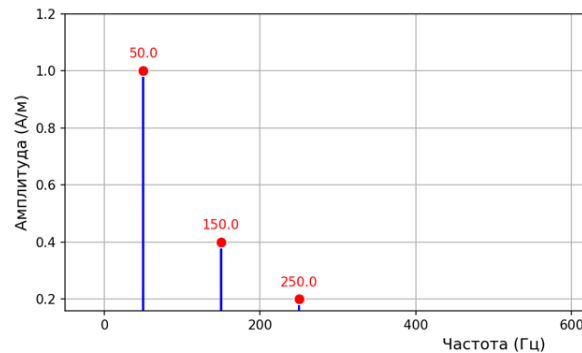
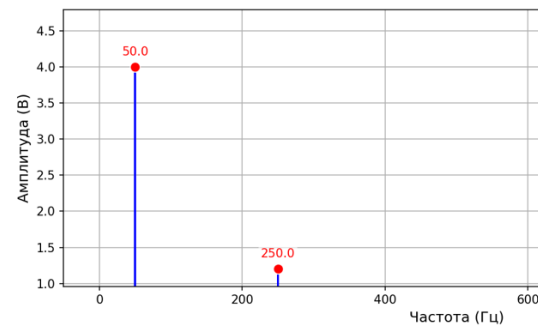
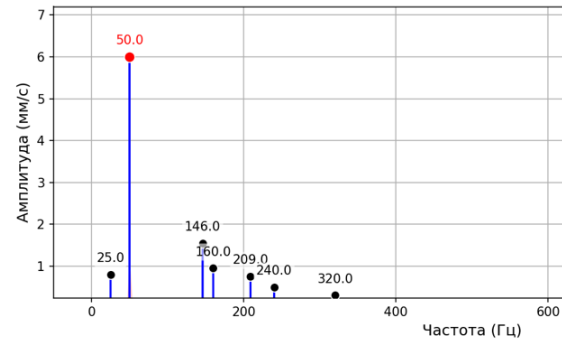


Рисунок 10 – Корреляция сигналов ГПЭА



а)

б)

Рисунок 11 – Дефектный подшипник качения синхронного генератора:
а) дефекты роликов; б) дефекты внешней обоймы

Рисунок 9 – Сравнение реального и эталонного сигналов и спектр реального сигнала ГПЭА:

а) вибрации; б) выходного фазного напряжения; в) внешнего магнитного поля

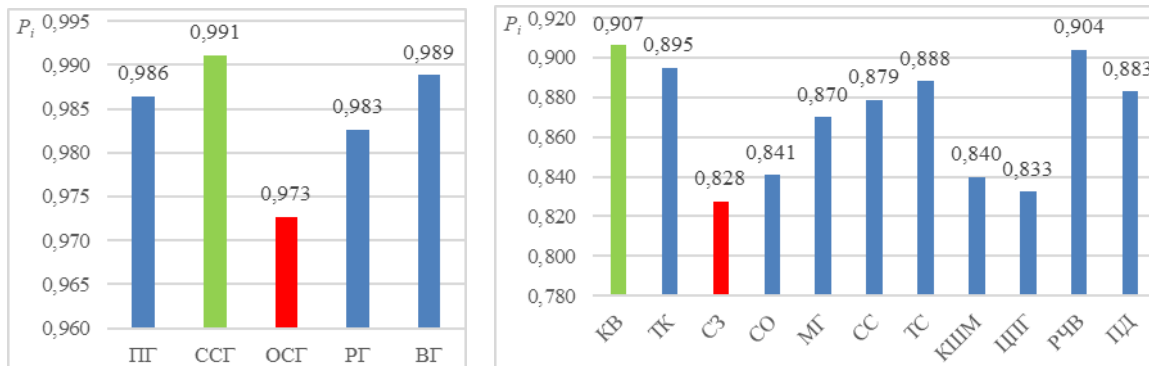


Рисунок 12 – Вероятность безотказной работы функциональных элементов: а) синхронного генератора; б) двигателя внутреннего сгорания; ССГ – сердечник статора; ОСГ – обмотка статора; РГ – ротор; ВГ – возбудитель на постоянных магнитах; ПГ – подшипники генератора; КВ – коленчатый вал; ТК – турбокомпрессор; СЗ – система зажигания; СО – система охлаждения; МГ – механизм газораспределения; СС – система смазки; ТС – топливная система; КШМ – кривошипно-шатунный механизм; ЦПГ – цилиндро-поршневая группа; РЧВ – регулятор частоты вращения; ПД – подшипники скольжения ДВС

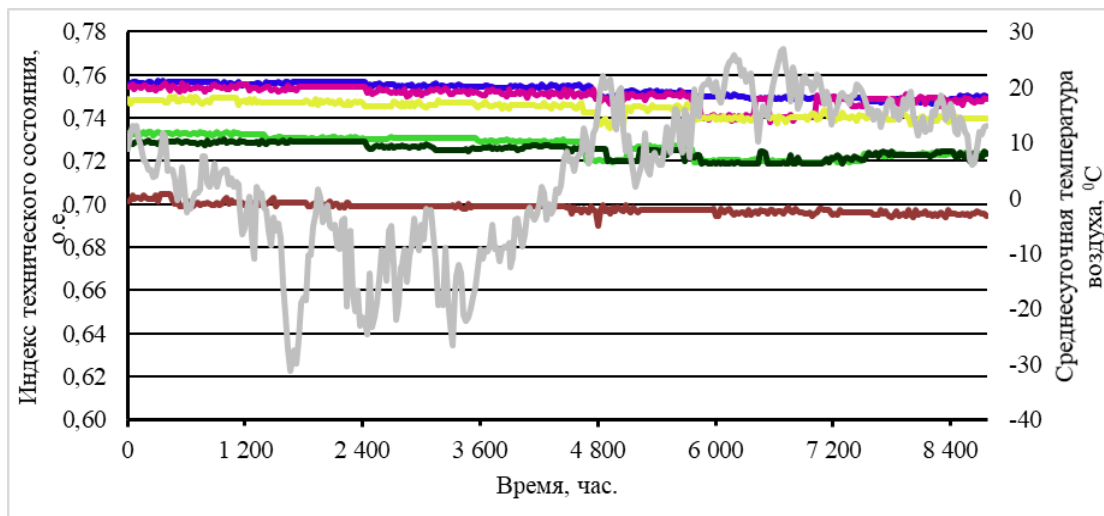


Рисунок 14 – Динамика изменения индекса технического состояния: — ГПЭА №1; — ГПЭА №2; — ГПЭА №3; — ГПЭА №4; — ГПЭА №5; — ГПЭА №6; — среднесуточная температура воздуха, °C

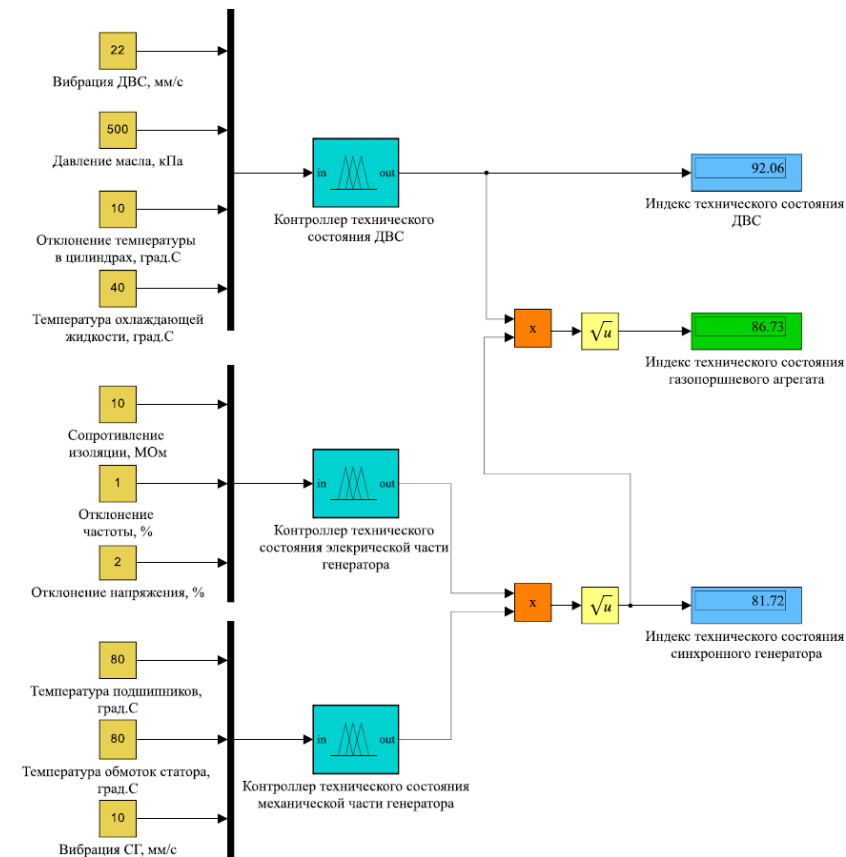


Рисунок 13 – Компьютерная модель вычисления индекса технического состояния ГПЭА