

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

На правах рукописи

Зайниев Азат Венерович



СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКИ
ГАЗОПОРШНЕВЫХ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Хакимьянов М.И.

Уфа – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ГПЭА КАК ОБЪЕКТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГПЭА.....	14
1.1 Применение ГПЭА с СГ на нефтегазовых промыслах	15
1.2 Структурная схема электротехнического комплекса ГПЭА	20
1.3 Классификация неисправностей электротехнического комплекса ГПЭА....	21
1.4 Анализ современных методов диагностики ГПЭА	23
1.4.1 Вибродиагностика	23
1.4.2 Диагностика по изменению внешнего магнитного поля	26
1.4.3 Спектродиагностика	28
1.4.4 Ограничения индивидуальных методов диагностики.....	29
1.4.5 Обзор зарубежного опыта диагностики ГПЭА	32
1.5 Методы мониторинга и управления техническим состоянием	33
1.5.1 Применение метода анализа иерархий	34
1.5.2 Алгоритм нечеткого вывода.....	37
1.5.3 Методы прогнозирования технического состояния электротехнических комплексов	38
1.6 Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СГПМ НА ИСКАЖЕНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ СГПМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	41
2.1 Многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ	41
2.1.1 Выбор программных средств и разработка цифровой тени	41
2.1.2 Построение базовой модели генератора и моделирование магнитного поля в исправном состоянии	46
2.2 Моделирование дефектов в СГПМ	51
2.2.1 Принцип моделирования дефектов	51
2.2.2 Размагничивание постоянных магнитов.....	51
2.2.3 Эксцентриситет ротора.....	53
2.2.4 Межвитковые замыкания в обмотке статора	55

2.2.5 Дефекты подшипников	57
2.2.6 Дисбаланс ротора	58
Сигналы на всех шести датчиках Холла практически идентичны значениям в нормальном режиме. Таким образом, для выявления дисбаланса ротора требуются дополнительные методы диагностики, в первую очередь, вибродиагностика. .	
2.3 Оценка нижнего предела обнаружения дефектов	59
2.3.1 Оценка нижнего предела обнаружения межвитковых замыканий	59
2.3.2 Оценка нижнего предела обнаружения размагничивания постоянных магнитов	61
2.4 Параметрический метод синтеза на основе суперпозиции эффектов нескольких типов повреждений	62
2.5 Проверка моделей дефектов и диагностические признаки дефектов.....	64
2.6 Оптимальное размещение датчиков Холла для измерения внешнего магнитного поля	65
2.6.1 Определение областей максимальных изменений магнитной индукции ..	65
2.6.2 Коэффициент асимметрии внешнего магнитного поля	66
2.7 Выводы по главе 2.....	67
ГЛАВА 3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГПЭА С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА С ИНТЕГРАЦИЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ	69
3.1 Концепция мультифизической диагностики ГПЭА	69
3.2 Основные диагностические признаки.....	70
3.3 Цифровая тень ГПЭА для диагностики неисправностей на основе мультифизического подхода	74
3.4 Методика определения неисправностей ГПЭА с помощью цифровой тени	76
3.5 Исследование кросс-корреляционных зависимостей диагностических признаков с использованием цифровой тени.....	79
3.5.1 Реализация вычисления корреляции в цифровой тени	79
3.5.2 Примеры корреляционных признаков	81
3.5.3 Корреляционная интерпретация спектральных характеристик	83
3.6 Выводы по главе 3.....	85

ГЛАВА 4 МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ГПЭА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ

4.1 Применение метода анализа иерархий для оценки надежности элементов ГПЭА	86
4.2 Математическая модель оценки технического состояния ГПЭА методами нейро-нечеткого логического вывода	91
4.3 Прогнозирование технического состояния ГПЭА.....	97
4.4 Выводы по главе 4.....	101

ГЛАВА 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГПЭА С СГПМ.....

5.1 Объект диагностирования и его характеристики	103
5.2 Результаты оценки технического состояния ГПЭА	103
5.3 Поиск неисправностей ГПЭА с помощью цифровой тени.....	105
5.4 Результаты прогнозирования технического состояния ГПЭА на основе анализа исторических данных.....	110
5.5 Расчет экономического эффекта реализации разработанных моделей и методик.....	114
5.6 Выводы по главе 5.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123

ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты моделирования внешнего магнитного поля СГПМ.....

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Пример диагностического отчета цифровой тени Диагностический отчёт цифровой тени ГПЭА №6

ПРИЛОЖЕНИЕ В.....

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на изобретение

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....

Патент на изобретение

ПРИЛОЖЕНИЕ Е	157
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	158
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	158
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	159
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	159
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	160
Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Башнефть-Добыча»	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Л.....	161
Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Башнефть-Добыча»	161
ПРИЛОЖЕНИЕ М.....	162
Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «РН-Ванкор»	162

ВВЕДЕНИЕ

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 и. 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

русские 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 русские, 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 соответствуют 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 электромеханические, 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 № 202568830, Приложение В).

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 (патент на изобретение № 2851765, Приложение Г; патент на изобретение № 2837784, Приложение Д; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662535, Приложение Е).

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, Приложение Ж, и № 2024689233, Приложение И).

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

Методология и методы исследования. Проведение исследований 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 (пункты списка литературы № 19-30, 138, 139), 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. 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ГПЭА КАК ОБЪЕКТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГПЭА

В соответствии с «Отчетом о функционировании и развитии ТЭК России в 2020 году» Министерства энергетики Российской Федерации, объем сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на факеле в России за 2020 год составил 16478,46 млн м³ [40], что эквивалентно выработке электрической энергии с использованием газопоршневых электроагрегатов (ГПЭА) в объеме 70798,97 млн кВт·ч.

Согласно «ИТС 50-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка природного и попутного газа» (утв. Приказом Росстандарта от 14.11.2017 № 2423) и «ИТС 38-2024. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (утв. Приказом Росстандарта от 23.12.2024 № 3041), одной из наилучших доступных технологий является использование ГПЭА с синхронными генераторами переменного тока (СГ) и двигателями внутреннего сгорания (ДВС), получивших широкое распространение на нефтегазодобывающих предприятиях для утилизации ПНГ и выработки электрической энергии.

ГПЭС включает в себя газопоршневые двигатели внутреннего сгорания, синхронные генераторы, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов, и вспомогательное электрооборудование. ГПЭС рассматривается в диссертации как единый электротехнический комплекс. Особенностью такого комплекса является связь между механическими, электрическими и электромагнитными подсистемами. Данная связь проявляется, в первую очередь, в переходных режимах, связанных с «набросами» нагрузки либо снижением нагрузки при пуске и останове скважин, изменениях состава топливного газа, что характерно для эксплуатации в условиях нефтегазодобывающего предприятия.

В качестве объекта исследования выбран ГПЭА с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов. Высокие эксплуатационные нагрузки ГПЭА, характерные для нефтегазодобывающего предприятия, неизбежно

приводят к возникновению неисправностей. Остановки ГПЭС могут привести к простоям скважин, авариям и значительным экономическим потерям. Таким образом, диагностика технического состояния ГПЭА, эксплуатируемых на нефтегазодобывающих промыслах, является критически важной задачей, направленной на обеспечение надежности добычи нефти.

1.1 Применение ГПЭА с СГ на нефтегазовых промыслах

ГПЭА получили широкое распространение на нефтегазодобывающих предприятиях, таких как ПАО «НК Роснефть», ПАО «Газпром нефть», ПАО «Лукойл», как одна из наилучших технологий для утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) и выработки электрической энергии [31, 32].

ГПЭА обладают рядом преимуществ, в частности:

- минимальное время запуска в работу;
- относительно невысокие капитальные затраты за счет блочно-модульной конструкции;
- возможность расширения ГПЭС и увеличения установленной мощности благодаря блочно-модульной конструкции.

Кроме того, сама блочно-модульную конструкция позволяет обеспечить быструю транспортировку и мобильность.

В состав ГПЭА входят машины, основанные на разных физических принципах действия, в ДВС и СГ. Данные машины имеют разные показатели надежности. Это обстоятельство усложняет диагностику ГПЭА.

Работа ГПЭС изначально на этапе проектирования может предусматривать один из двух режимов: параллельно с сетью и автономно.

На рисунке 1.1 представлена схема электротехнического комплекса нефтегазодобывающего промысла с ГПЭС, работающей параллельно с сетью. При данной схеме газожидкостная смесь из нефтяных скважин, проходя через автоматизированную групповую замерную установку, дожимную насосную станцию и установку предварительного сброса воды, поступает в установку подготовки нефти, где разделяется на нефть и ПНГ. Предварительно подготовленный в мембранном газоразделительном блоке ПНГ поступает в

ГПЭС, где вырабатывается электроэнергия. ГПЭС подключается в электрическую сеть через устройство синхронизации.

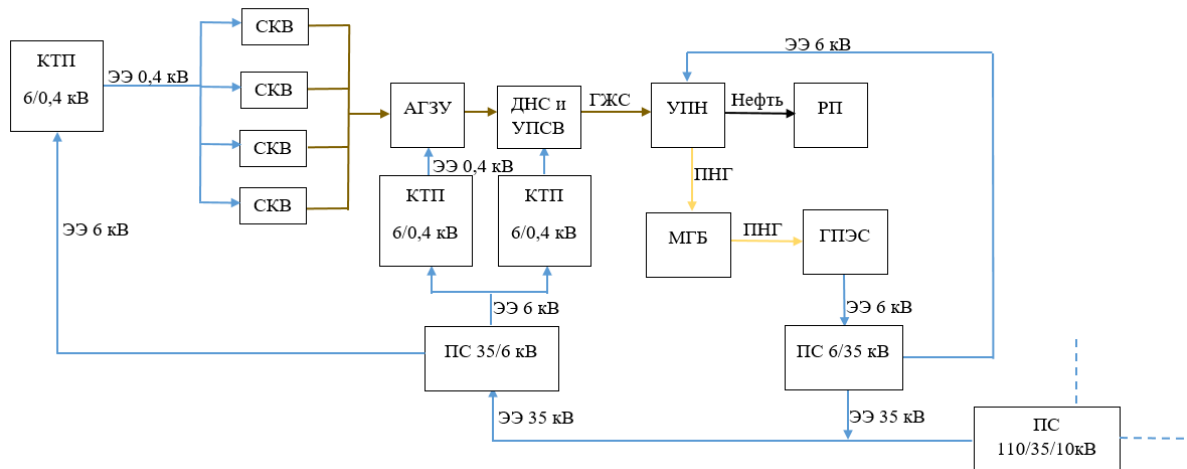


Рисунок 1.1 – Схема электротехнического комплекса нефтегазодобывающего промысла с ГПЭС, работающей параллельно с сетью: СКВ – скважины; АГЗУ – автоматизированная групповая замерная установка; ДНС и УПСВ – дожимная насосная станция и установка предварительного сброса воды; УПН – установка подготовки нефти; РП – резервуарный парк; ГПЭС – газопоршневая электростанция; ПНГ – попутный нефтяной газ; МГБ – мембранный газоразделительный блок; ГЖС – газожидкостная смесь; ПС – подстанция; ЭЭ – электроэнергия; КТП – комплектная трансформаторная подстанция

— газожидкостная смесь; — попутный нефтяной газ;
— электроэнергия — нефть

(составлено автором)

Очевидно, что данная схема обладает неоспоримыми преимуществами. Во-первых, отказ ГПЭС не приводит к остановке фонда скважин. Во-вторых, ГПЭС обладают низкой перегрузочной способностью, что отрицательно сказывается на динамических характеристиках в переходных режимах при внезапных «набросах» нагрузки. При параллельной работе с сетью такие «набросы» компенсируются мощностью внешней сети.

На рисунке 1.2 представлена схема электротехнического комплекса нефтегазодобывающего промысла с ГПЭС, работающей автономно. Данная схема в основном применяется в отдаленных районах при отсутствии инфраструктуры. ГПЭС в этом случае является единственным источником электроснабжения потребителей промысла.

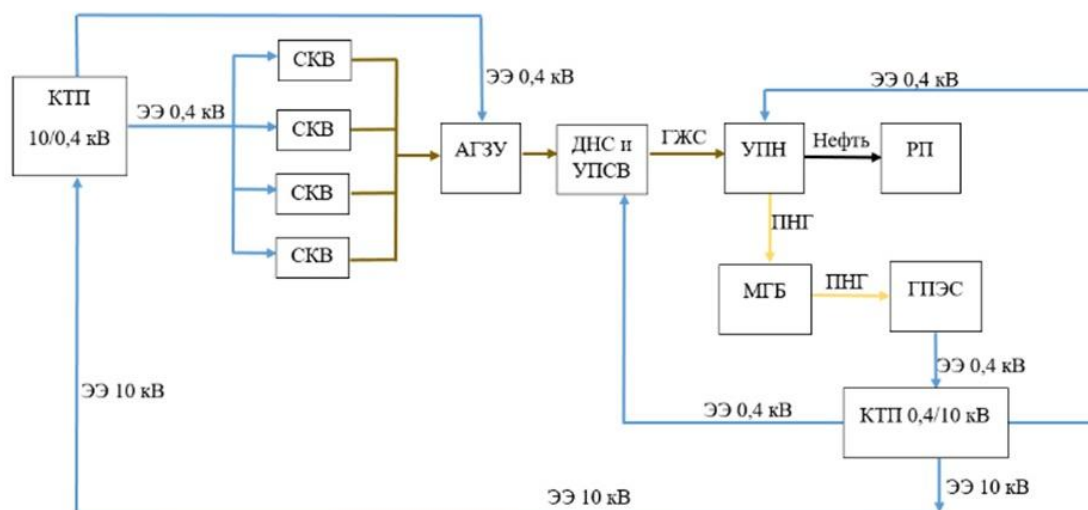


Рисунок 1.2 – Схема электротехнического комплекса нефтегазодобывающего промысла с ГПЭС, работающей автономно: СКВ – скважины; АГЗУ – автоматизированная групповая замерная установка; ДНС и УПСВ – дожимная насосная станция и установка предварительного сброса воды; УПН – установка подготовки нефти; РП – резервуарный парк; ГПЭС – газопоршневая электростанция; ПНГ – попутный нефтяной газ; МГБ – мембранный газоразделительный блок; ГЖС – газожидкостная смесь; ЭЭ – электроэнергия; КТП – комплектная трансформаторная подстанция

— газожидкостная смесь; — попутный нефтяной газ;

— электроэнергия — нефть

(составлено автором)

В таблице 1.1 приведены технические характеристики некоторых типов ГПЭА, применяемых на объектах добычи нефти.

Таблица 1.1 – Технические характеристики ГПЭА, применяемых на объектах добычи нефти (составлено автором)

Параметр	Тип, марка ГПЭА					
	CUMMINS QSV91–G (США)	CATERPILLAR G3520C (США)	ГДГ–90 (Россия)	WARTSILA 20V34SG (Финляндия)	WARTSILA 9L34SG (Финляндия)	MWM TCG 2032V16 (Германия)
Номинальная электрическая мощность, кВт	1540	2016	500	8730	4343	4300
Число цилиндров ДВС	18	20	6	20	9	16
Общий рабочий объем цилиндров, л	91,6	86,2	43,62	726	326,7	271,8
Расположение цилиндров ДВС	V–образное расположение под углом 60 ⁰	V–образное расположение под углом 60 ⁰	Рядное	V–образное расположение под углом 60 ⁰	Рядное	V–образное
Номинальная частота вращения, об/мин	1500	1500	1000	750	750	1000
Напряжение на выводах генератора, кВ	6,3	6,3	0,4	10,5	10,5	6,3
Частота вырабатываемой электроэнергии, Гц	50	50	50	50	50	50
Генератор	Синхронный, Stamford P80	Синхронный, SR4B	Синхронный, 1FC2 454– 6LB43	Синхронный	Синхронный	Синхронный AVK
Система возбуждения генератора	От постоянных магнитов	От постоянных магнитов	Бесщеточная	Бесщеточного типа с вращающимся якорем/ выпрямителем	Бесщеточного типа с вращающимся якорем/ выпрямителем	Бесщеточного типа с вращающимся якорем/ выпрямителем
Число пар полюсов	2	2	3	4	4	3

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Тип, марка ГПЭА					
	CUMMINS QSV91–G (США)	CATERPILLAR G3520C (США)	ГДГ–90 (Россия)	WARTSILA 20V34SG (Финляндия)	WARTSILA 9L34SG (Финляндия)	MWM TCG 2032V16 (Германия)
Ротор генератора	Явнополюсный	Явнополюсный	Неявнополюс ный с демпферной обмоткой	Явнополюсный	Явнополюсный	Явнополюсный
Номинальный коэффициент мощности, о.е.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Система охлаждения генератора	Воздушная	Воздушная	Воздушная	Воздушная	Воздушная	Воздушная
Электрический КПД при полной нагрузке, %	37,9	41,2	н/д	46,3	45,9	44,1

1.2 Структурная схема электротехнического комплекса ГПЭА

На рисунке 1.3 представлена структурная схема ГПЭА в виде взаимодействующих подсистем: газопоршневого двигателя внутреннего сгорания, синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, системы управления и нагрузочной части.

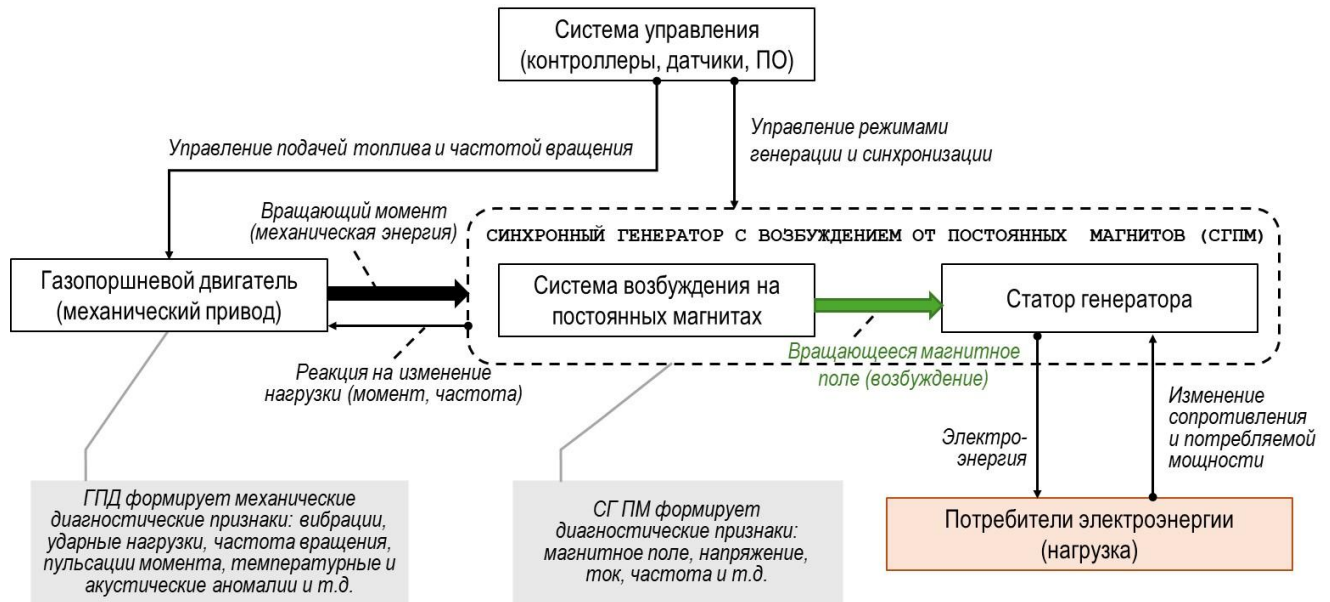


Рисунок 1.3 – Структурная схема электротехнического комплекса ГПЭА (составлено автором)

Рисунок 1.3 иллюстрирует преобразование механической энергии вращения в электрическую, генерацию электромагнитного поля в статоре и роторе, а также динамику реакций на изменения сопротивления нагрузки и частоты вращения.

Представленная на рисунке 1.3 структурная схема является основой для моделирования поведения комплекса и построения комплекса диагностики.

Основные эксплуатационные режимы электротехнического комплекса ГПЭА:

- режим холостого хода;
- режим пуска;
- номинальный режим при расчетной нагрузке;
- режим перегрузки (кратковременный режим при работе с нагрузкой выше номинального);
- переходные режимы при изменении нагрузки.

В условиях нефтегазодобычи комплекс подвергается воздействию ряда факторов: колебания температуры окружающей среды (от минус 40 °С до 50 °С); изменения нагрузки в связи с изменениями режимов работы добывающих скважин; вибрация, вызванная, например, остаточным дисбалансом ротора; колебания давления и состава попутного нефтяного газа.

Очевидно, что данные факторы влияют на комплекс в целом, т.е. как на ДВС, так и на генератор. Анализ данных факторов необходим в том числе при техническом диагностировании.

1.3 Классификация неисправностей электротехнического комплекса ГПЭА

При разработке классификации неисправностей электротехнического комплекса ГПЭА был применен анализ его структуры на основе данных из научно-технической литературы и соответствующих стандартов [11-13].

Основные компоненты ГПЭА:

- двигатель внутреннего сгорания (ДВС): поршневая группа, кривошипно-шатунный механизм, системы подачи топлива, охлаждения и управления.
- синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ): ротор с магнитами, статор с обмотками, подшипники, системы охлаждения и управления.
- стык: муфта или прямое соединение.

Полный перечень неисправностей должен охватывать все возможные дефекты в этих частях системы. Классификация неисправностей представлена на рисунке 1.4. Выделены четыре основные категории дефектов: электрические, магнитные, механические и прочие. Эти категории охватывают неисправности, связанные как с СГПМ, так и с ДВС, а также с их взаимодействием.



Рисунок 1.4 – Классификация неисправностей ГПЭА (составлено автором)

На рисунке 1.5 показана диаграмма статистики отказов ГПЭА ПАО «НК «Роснефть», приведших к остановке фонда скважин, по видам, за 2021 – 2023 годы.



Рисунок 1.5 – Диаграмма статистики распределения отказов ГПЭА (составлено автором)

Из рисунка 1.5 видно, что 46,59% отказов связаны с внешними факторами (внешняя электрическая сеть и внешние газопроводы). Можно также отметить, что СГ, на долю которого приходится 6,82% отказов, обладает большей надежностью, чем ДВС, на долю отказов систем которого суммарно приходится 20,45%. Сложившийся тренд на усложнение состава ГПЭА и комплексных средств автоматизации объектов нефтедобычи, как и любой сложной технической системы, приводит, как правило, к увеличению интенсивности отказов. Так, на

долю систем автоматизации ГПЭА приходится в общей сложности 26,17 % отказов.

Отказы ГПЭА, в конечном итоге, приводят к простоям фондов скважин, снижению доли утилизации ПНГ, вызванных ремонтом оборудования, и связанные с ними убытки существенно возрастают. Снизить их можно, внедряя методы, модели, алгоритмы и средства технического диагностирования.

1.4 Анализ современных методов диагностики ГПЭА

Несмотря на большую актуальность, поставленные задачи по исследованию эксплуатационной надёжности и диагностики состояния электрических машин решаются медленно, так как процессы деградации элементов электрических машин достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов. Кроме того, исследования надёжности электрических машин связаны с необходимостью проведения натурных испытаний (в том числе и разрушающих) на дорогостоящем действующем оборудовании.

Среди современных подходов к диагностированию ГПЭА и СГ можно выделить тепловые методы диагностики, вибродиагностику, метод регистрации частичных разрядов (ЧР), трибодиагностику, спектродиагностику, визуально измерительный контроль, измерение сопротивления изоляции, сопротивления обмоток и т.д. [20].

1.4.1 Вибродиагностика

В работе [88] показано, что методы, основанные на анализе вибрации, получили наибольшее распространение для диагностики электрических машин, поскольку показатели виброскорости, виброускорения и виброперемещения напрямую связаны как с электрическим, так и с механическим состоянием электрической машины.

Так, серия международных стандартов *ISO 8528* [93] и идентичных им ГОСТ *ISO 8528* [15], регламентирующих эксплуатацию электроагрегатов генераторных переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания, не предполагает других методов диагностирования, кроме вибродиагностики.

При использовании метода вибродиагностики степень развития дефекта определяют, сравнивая измеренные параметры вибрации с нормативными значениями для определенного механизма. Механизм признается дефектным, если уровень его вибрации превышает нормативное значение. Если уровень вибрации превышает допустимые нормы, то персоналу необходимо принимать решение о возможности дальнейшей эксплуатации агрегата, узла или механизма. Оценка общего уровня вибрации, как правило, осуществляется по среднеквадратичному значению (СКЗ) виброскорости. Пересчет виброскорости должен производиться с учетом сложения всех гармонических составляющих [6].

Вид сигнала на временном интервале $0...T$ после вибропреобразователя можно представить в виде выражения (1.1) [3]:

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T S(\omega) e^{i\omega t} dt, \quad (1.1)$$

а спектр сигнала в виде выражения (1.2):

$$S(\omega) = \int_0^T S(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1.2)$$

где ω – угловая частота, рад/с; t – время, с.

Модуль функции $|S(\omega)|$ характеризует распределение интенсивности гармонических составляющих сигнала $S(t)$ по частотам, а величина $|S(\omega)d\omega|$ соответствует амплитуде синусоидального колебания с частотой ω , содержащегося в сигнале $S(t)$.

При обработке выходного сигнала вибропреобразователя с помощью анализатора спектра с необходимой шириной полосы пропускания на выходе получают амплитудный спектр.

Разложение сложного сигнала в ряд Фурье позволяет получить составляющие спектра, представляющие собой при узкополосном анализе гармонические составляющие сложного сигнала. Зная частоты, на которых проявляются неисправности кинематических пар механизмов, по амплитуде составляющих спектра можно оценить их состояние.

Эффективность мониторинга зависит от количества компонент спектра вибрации, доступных для измерения и анализа. Чтобы увеличить их число, в машинах с вращающимися узлами производится узкополосный спектральный анализ вибрации, наиболее эффективный для анализа периодических компонент сигнала [60].

Спектральный анализ вибрации электрических машин на низких и средних частотах, измеряемый в разных направлениях, дает возможность идентифицировать практически все дефекты электромагнитной системы электрических машин, кроме старения изоляции, так как до момента пробоя изоляции электромагнитное поле и вибрация машины не изменяются [4, 60]. На рисунке 1.6 изображен спектр вибрационного сигнала при дисбалансе ротора.

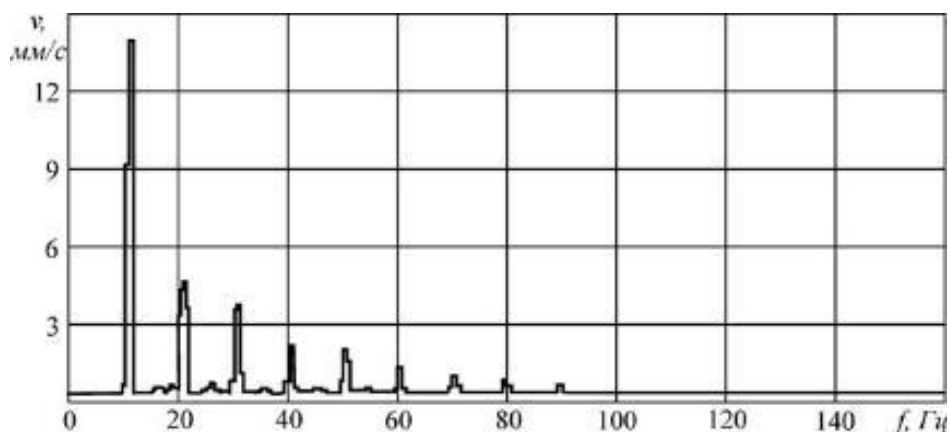


Рисунок 1.6 – Гармонические составляющие вибрационного сигнала при дисбалансе ротора [1]

Характеристики применяемых современных переносных виброанализаторов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики переносных виброанализаторов (составлено автором)

Марка	Рабочий диапазон частот, Гц	Линий в спектре	Погрешность измерения
Диана-2М	3–10000	51200	< 5%
ViAna-4	3–10000	12800	< 5%
Корсар+	10–1000	1600	< 5%
Вибротест-МГ4.01	5–1000	1600	< 5%
Falcon OneProd	0–40000	102400	< 5%

Системы вибродиагностики должны быть максимально специализированными для конкретных машин и типов оборудования [48].

В стандартах, касающихся оценки вибрационного состояния машин и оборудования, основное внимание уделяется критериям, которые чаще всего основаны на СКЗ одной из величин, характеризующих вибрацию в определённом частотном диапазоне [15, 92]. Это значение является ключевым для количественной оценки вибрации на заданном интервале времени, что позволяет специалистам быстро и эффективно анализировать состояние машин. СКЗ представляет собой статистическую меру, которая позволяет учитывать, как амплитуду, так и продолжительность вибрационного сигнала, что делает его универсальным инструментом для мониторинга. Применение других параметров может вызвать трудности, если сигнал вибрации содержит множественные частотные составляющие или модуляционные компоненты.

Несмотря на все преимущества, вибродиагностика имеет свои существенные недостатки. Существующие методы вибродиагностики требовательны к креплению датчиков физических величин вибрации и при этом не всегда позволяют поставить достоверный диагноз вследствие затруднений, связанных с необходимостью отстроиться от вибраций, вызванных соседним оборудованием [88]. В исследованиях [18, 72] было выявлено, что существует ограничение в возможности обнаружения и классификации различных дефектов, способных вызвать сбои в работе машин, исключительно при помощи методов вибродиагностики. Было показано, что однократные измерения вибрации не позволяют однозначно решать задачи диагностирования и прогнозирования технического состояния всех узлов электрических машин, за исключением подшипников качения.

1.4.2 Диагностика по изменению внешнего магнитного поля

В работах [64, 97] было определено одно из перспективных направлений диагностики электрических машин. Было показано, что большинство вращающихся электрических машин симметричны и генерируют равномерно распределённый магнитный поток. Любая неисправность в машине приводит к асимметричному распределению магнитного потока, что приводит к увеличению локальных магнитных напряжений. Определено, что эти факты делают

диагностические алгоритмы, основанные на регистрации изменений внешнего электромагнитного поля (ВЭМП), неинвазивными и открывают широкие возможности для обработки сигналов и технологические приемы, которые могут быть использованы для контроля состояния электрических машин.

При повреждении синхронного генератора, различных дефектах в обмотке возбуждения и обмотке якоря происходит перераспределение токов по областям, изменение насыщения элементов магнитной системы, возникают магнитные асимметрии [33, 38].

На рисунке 1.7 представлено распределение индукции внешнего электромагнитного поля синхронного генератора в режиме холостого хода.

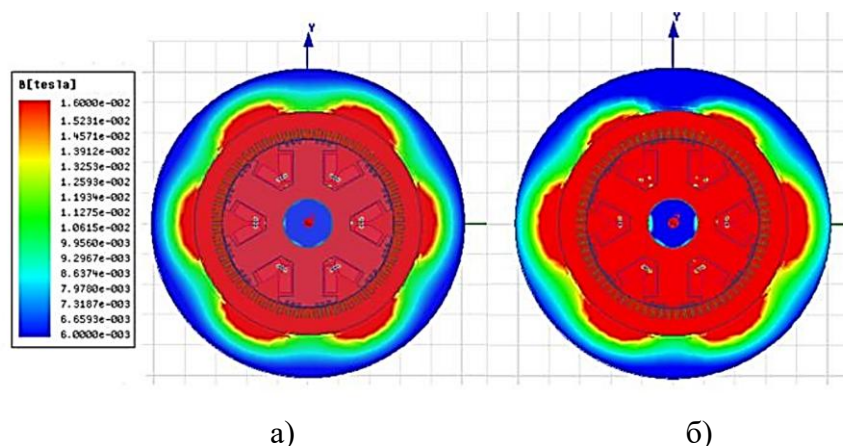


Рисунок 1.7 – Распределение индукции внешнего электромагнитного поля синхронного генератора в режиме холостого хода а) обмотка возбуждения без повреждения; б) повреждено 50 % витков в обмотке возбуждения одного из полюсов [33]

В таблице 1.3 приведены характеристики некоторых современных приборов для измерения и спектрального анализа электромагнитного поля.

Таблица 1.3 – Технические характеристики приборов для анализа электромагнитного поля (составлено автором)

Марка	Диапазон частот	Диапазон измерений среднеквадратических значений напряженности магнитного поля (магнитной индукции)
ВЕ–метр–АТ–004	от 5 Гц до 400 кГц	от 5 нТл до 10 мкТл
ПЗ–80	от 5 Гц до 2000 Гц	от 1,0 А/м до 1,8кА/м
ИПМ–101М	от 0,03 до 3 МГц	от 0,5 А/м до 75 А/м
ТМ–190	от 50 Гц до 3,5 ГГц	от 0,02 до 200 мкТл

К недостаткам данного метода можно отнести сложности интерпретации измерений при наличии искажений измеряемого сигнала от внешних помех,

трудности при локализации дефектов, высокие требования к измерительному оборудованию. Кроме того, исследования данного метода направлены на выявление единичных дефектов, тогда как в реальных условиях электрические машины зачастую подвержены одновременному воздействию нескольких неисправностей.

1.4.3 Спектродиагностика

Появление быстродействующих датчиков электрических величин и аналогово-цифровых преобразователей привело к появлению метода спектродиагностики – анализу состояния электрических машин путем измерения спектра электрических сигналов (активной мощности, тока и напряжения) [44]. Неисправности электротехнического и связанного с ним механического оборудования приводят к появлению дополнительных гармоник в электрических сигналах, анализ спектров которых позволяет идентифицировать дефекты. На рисунке 1.8 приведен спектр тока электрической машины с эксцентриситетом ротора.

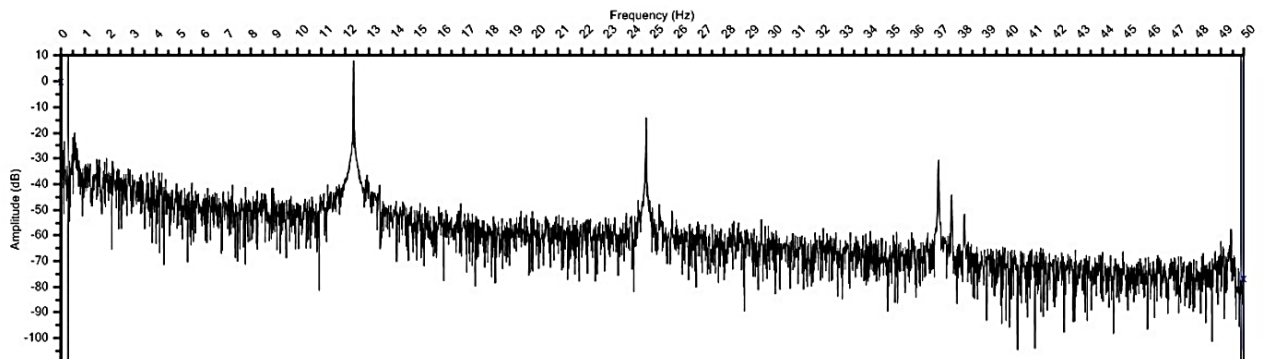


Рисунок 1.8 – Спектр тока электрической машины с эксцентриситетом ротора [56]

К преимуществам спектральных методов диагностики относятся измерение сигналов с помощью датчиков электрических величин (трансформаторов тока и напряжения), возможность удаленного контроля и диагностики, их непрерывность.

Сложность применения спектральных методов заключается в том, что высокочастотные гармоники могут как генерироваться электрической машиной, так и поступать от сети. Отделить гармоники сети от гармоник электрической

машины достаточно сложно. Для измерения высокочастотных гармоник требуется установка специальных дорогостоящих датчиков, использование АЦП с высокой частотой дискретизации и анализ больших массивов данных. Другим существенным недостатком данного метода является «размытие» спектра при нестационарных условиях работы машины и связанная с этим сложность идентификации гармоник дефектов [41].

На рисунке 1.9 показан спектр мощности электродвигателя компрессора, измеренный с помощью диагностического комплекса АО «Приборостроительный завод «Вибратор» [58].

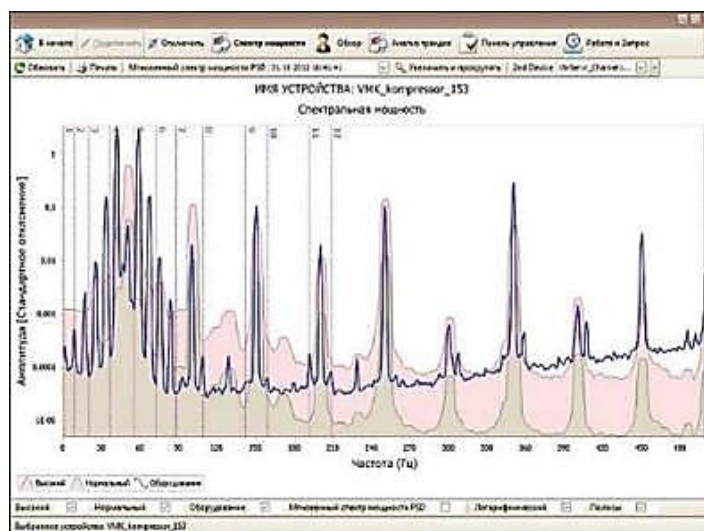


Рисунок 1.9 – Экран диагностического комплекса роторных машин производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор» [58]

1.4.4 Ограничения индивидуальных методов диагностики

Диагностические методы, применяемые для оценки технического состояния ГПЭА, можно условно классифицировать на механические, электрические, магнитные, тепловые и комбинированные. Каждый из них охватывает определённый класс неисправностей, но не обеспечивает полной картины функционирования системы [20]. Это наглядно представлено в таблице 1.4.

Таким образом, целесообразна разработка новых комплексных систем диагностики неисправностей вращающихся электрических машин, в том числе ГПЭА, в которых совместное применение нескольких методов диагностики потенциально может дать синергетический эффект и в итоге получить более точную и комплексную оценку состояния объекта исследования.

Таблица 1.4 – Неисправности ГПЭА с СГ, выявляемые отдельными методами диагностики (составлено автором)

Вид неисправности	Вибро- диагно- стика	Диагности- ка по ВЭМП	Спектро- диагно- стика	Тепловые методы	Метод ЧР	Трибо- диагно- стика	Визуально- измеритель- ный контроль	Измерение сопротив- ления изоляции	Измерение сопротив- ления обмоток
Механические неисправности									
Дисбаланс ротора [109, 125, 126]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Несоосность валов [50, 69, 116]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Износ или повреждение подшипников [62, 137]	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет
Эксцентриситет ротора [45, 62, 76, 100]	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Дефекты цилиндрико-поршневой группы [84, 117]	Да	Нет	-	Нет	Нет	Да	Да	Нет	Нет
Вибрации от неравномерной подачи топлива или сгорания [66, 134]	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Электрические неисправности									
Короткое замыкание в обмотках [45, 125, 126]	Нет	Да	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Обрыв обмотки [51, 118]	Нет	Да	Да	Нет	-	Нет	Нет	Нет	Да
Проблемы с изоляцией [98, 113]	Нет	Да	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Нет
Межвитковые замыкания обмотки подвозбудителя [78, 85]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Электрический дисбаланс статора [45]	–	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Магнитные неисправности									
Размагничивание постоянных магнитов [61, 109, 126, 136]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Неравномерность магнитного поля [29, 75, 89]	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Прочие неисправности									
Проблемы с системой охлаждения [73, 122]	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Неисправности в системе управления (Неравномерность магнитного поля) [114, 132]	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Проблемы с топливной системой [102]	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет

Продолжение таблицы 1.4

Вид неисправности	Вибро- диагно- стика	Диагности- ка по ВЭМП	Спектро- диагно- стика	Тепловы е методы	Метод ЧР	Трибо- диагно- стика	Визуально- измеритель- ный контроль	Измерение сопротив- ления изоляции	Измерение сопротив- ления обмоток
Неисправности системы зажигания [39, 99]	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Дефекты в системе возбуждения генератора [76]	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет

Как видно из таблицы 1.4, наиболее перспективными методами, охватывающими наиболее полный спектр возможных неисправностей, и при этом, обладающими взаимодополняемостью, являются методы спектрального анализа, анализа магнитного поля и вибродиагностики.

1.4.5 Обзор зарубежного опыта диагностики ГПЭА

Зарубежные авторы не концентрируются на диагностике ГПЭА, в большинстве случаев научные публикации посвящены диагностике судовых и дизельных генераторных установок.

В то же время, зарубежные производители ГПЭА дают свои рекомендации по техническому диагностированию, основанные на серии международных стандартов *ISO 8528* [93], регламентирующих эксплуатацию электроагрегатов генераторных переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания.

Серия международных стандартов *ISO 8528* [93] не предполагает других методов диагностирования ГПЭА, кроме вибродиагностики.

Инструкциями Компании «*Caterpillar*» [99, 128] предусмотрена ежегодная вибродиагностика. В таблице 1.5 приведены данные о частотах гармоник вибрации ГПЭА *Caterpillar*, характерных для дефектов этих машин.

Таблица 1.5 – Данные о частотах гармоник вибрации ГПЭА *CATERPILLAR*, характерных для дефектов этих машин [99]

Неисправности	Частота гармоники виброскорости, характеризующая неисправность
Дисбаланс, несоосность, переполнение картера	$f_{unb} = f_r$, где f_r – частота вращения ротора, Гц
Дисбаланс ротора вследствие потери балансировочных грузов	$f_{unb} = 2f_r$
Пропуск зажигания в одном или нескольких цилиндрах ДВС	$f_{cyl} = \frac{1}{2} f_r$
Резонанс	Резкое и значительное увеличение виброскорости
Реакция на крутящий момент – ненадежный монтаж или неподходящий фундамент	Возрастание виброскорости по мере увеличения нагрузки

Из таблицы 1.5 видно, что заводские инструкции не учитывают множество возможных неисправностей ГПЭА, рассмотренных в подразделе 1.3, например, повреждение подшипников.

Помимо вибродиагностики, инструкцией [128] предусмотрено ежегодное измерение сопротивления изоляции, которое также не может быть методом выявления целого ряда возможных неисправностей ГПЭА.

Аналогичные требования к диагностике ГПЭА предъявляет Компания «Cummins» [82].

Суммируя вышесказанное, необходимо отметить, что заводские руководства по эксплуатации и техническому обслуживанию ГПЭА, как правило, предусматривают применение стратегии планово-предупредительного ремонта с использованием исключительно заводских запасных частей и комплектующих.

1.5 Методы мониторинга и управления техническим состоянием

В современных условиях к техническим системам предъявляются высокие требования как в части безопасности, так и надежности.

Оценка надежности и технического состояния технических систем необходима для предотвращения непредвиденных отказов и определения узлов и деталей, требующих приоритетного технического воздействия.

Достоверное знание о фактическом техническом состоянии оборудования позволяет выявлять потенциальные отказы на ранних стадиях, тем самым снижая риск аварий и простоев.

Кроме того, показатели действительного технического состояния объекта в некоторый дискретный момент времени несут в основном информацию о функционировании объекта в прошлом и не позволяют сказать о поведении объекта в предстоящий период эксплуатации. В то же время эффективность диагностирования существенно возрастает, когда при этом решается задача прогнозирования изменения состояния объекта в будущие моменты времени. Возможность предсказать неуправляемые аспекты эксплуатации объекта перед принятием решения о выводе его в ремонт позволяет сделать наилучший выбор сроков и объемов ремонта.

Основная трудность в оценке надёжности ГПЭА, эксплуатируемых в составе электротехнических комплексов нефтедобывающих промыслов, состоит в том, что процесс их эксплуатации характеризуется нестабильностью. Это связано

с рядом факторов: сезонным и суточным изменением состава топливного газа (ПНГ), переменной нагрузкой, в т.ч. резкими ее «набросами», человеческим фактором. Кроме того, ГПЭА представляют собой агрегаты, объединяющие машины, основанные на разных физических принципах действия (ДВС и синхронный генератор переменного тока), элементы которых имеют существенно отличающиеся показатели надежности.

Для оценки надежности электромеханического оборудования в настоящее время применяют такие методы, как системный анализ, статистические методы, метод вложенных цепей Маркова, математическое моделирование.

Главными недостатками перечисленных методов являются существенная стоимость либо большая трудоемкость их реализации, связанные с необходимостью обработки большого объема статистических данных.

Особенности математического аппарата теории нечётких множеств позволяют, с одной стороны, использовать имеющуюся неформализованную информацию для настройки модели при отсутствии обучающей выборки, а с другой стороны, без усложнения структуры модели учитывать нелинейный характер влияния различных факторов в задачах оценки технического состояния и анализа надёжности технических систем.

Таким образом, для оценки надежности, оценки и прогнозирования технического состояния ГПЭА целесообразно рассмотреть применение методов, использующих аппарат теории нечётких множеств, а именно метод анализа иерархий (МАИ) и нечеткий логический вывод.

1.5.1 Применение метода анализа иерархий

В традиционной формулировке МАИ человеческие суждения представлены как точные числа в выбранной шкале оценок, однако во многих практических случаях модель человеческого предпочтения отличается неуверенностью, и лицо, принимающее решение, может быть не в состоянии назначить точное числовое значение, поэтому МАИ может быть отнесен к нечетким методам.

Иерархия МАИ, отражающая понимание проблемы со стороны лица, принимающего решение, приведена на рисунке 1.10 [25, 34]. Структура,

представленная на рисунке 1.10, объединяет цель F , критерии $K = \{K^j\}$ и альтернативы $A = \{A_i\}$, т.е. те объекты иерархии $O = \{O_p^l\}$ (l – номер уровня иерархии, p – номер объекта на уровне l), которые по существу влияют на выбор наилучшего варианта решения A^* согласно поставленной цели F [25].

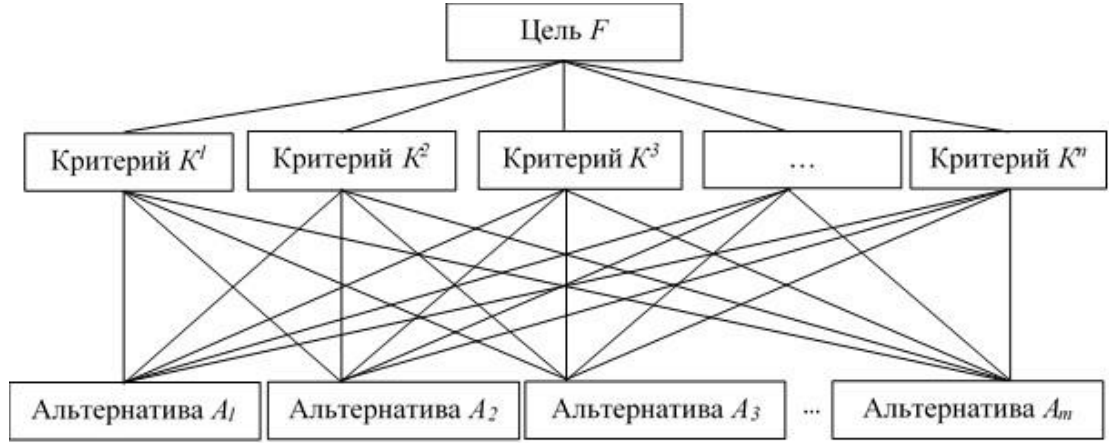


Рисунок 1.10 – Иерархия МАИ [25, 34]

Следующим этапом анализа является последовательное, начиная со второго уровня, поуровневое ранжирование значимости влияния объектов O_p^l текущего уровня l на объекты O_r^{l-1} более высокого уровня иерархии $l-1$, с помощью процедуры парных сравнений [25].

Процесс парных сравнений ранжируемых объектов O_p^l (альтернатив A и критериев K) сопровождается построением матрицы парных сравнений X . При этом числа, отвечающие сравнительной значимости объектов, заполняют соответствующие элементы матрицы X .

Матрица парных сравнений второго уровня иерархии, представленной на рисунке 1.10, имеет вид (1.3) [25]:

$$X_2 = \begin{pmatrix} O_1^1 & K^1 & \dots & K^j & \dots & K^n \\ K^1 & 1 & \dots & {}_2R_{1j}^1 & \dots & {}_2R_{1n}^1 \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots & \ddots & \vdots \\ K^j & ({}_2R_{1j}^1)^{-1} & \dots & 1 & \dots & {}_2R_{jn}^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & 1 & \vdots \\ K^n & ({}_2R_{1n}^1)^{-1} & \dots & ({}_2R_{jn}^1)^{-1} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.3)$$

где ${}_2R_{ji}^1$ – результаты попарных сравнений на втором уровне иерархии.

Матрицу парных сравнений третьего уровня иерархии можно представить в виде (1.4) [25]:

$$X_3 = \begin{pmatrix} K^j & A_1 & \dots & A_i & \dots & A_m \\ A_1 & 1 & \dots & {}_3R_{1j}^j & \dots & {}_3R_{1m}^i \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots & \ddots & \dots \\ A_i & ({}_3R_{1i}^j)^{-1} & \dots & 1 & \dots & {}_3R_{im}^j \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & 1 & \dots \\ A_m & ({}_3R_{1m}^i)^{-1} & \dots & ({}_3R_{im}^j)^{-1} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.4)$$

где ${}_3R_{ij}^j$ – результаты попарных сравнений на третьем уровне иерархии.

Далее выполняется вычисление главного собственного вектора для каждой матрицы. После нормализации он становится вектором приоритетов. С точки зрения матричного анализа эта операция выполняется путем вычисления главного собственного вектора матрицы, который после нормализации становится вектором приоритетов v . Координаты вектора приоритетов $v^j = \{v_i^j\}$ отражают степень приоритета или значимость расположенного на l -м уровне иерархии i -го ранжируемого объекта-альтернативы O_i^l , оцениваемого с позиций j -го объекта-критерия O_j^{l-1} , занимающего более высокий $(l-1)$ уровень. Опуская для краткости индекс j , получаем для сравниваемых по рангу трех объектов O_i^l формулу определения вектора приоритетов (1.5) [25]:

$$v = (v_1, v_2, v_3)', \quad (1.5)$$

где $'$ – символ транспонирования.

Главный собственный вектор матрицы служит критерием степени согласованности полученных суждений: чем ближе значение главного собственного вектора к размерности матрицы, тем большей степенью согласованности она обладает [25].

Отклонение от согласованности выражается величиной, которая называется индексом согласованности (ИС) и определяется соотношением (1.6) [47, 124]:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (1.6)$$

где λ_{max} – максимальное собственное значение матрицы; n – размерность матрицы.

Согласованность суждений для каждой конкретной задачи оценивают путем сравнения ИС и случайного индекса согласованности (СИ), который представляет собой ИС, сгенерированный случайным образом [47, 124].

Отношение ИС к среднему значению СИ называется отношением согласованности (ОС) и определяется по формуле (1.7):

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}. \quad (1.7)$$

Отношение согласованности считается приемлемым, если оно лежит в пределах $0 \dots 0,1$ включительно [47, 124].

На заключительном этапе осуществляется иерархический синтез. Он заключается в перемножении матрицы локальных приоритетов на вектор-столбец приоритетов критерия вышестоящего уровня.

1.5.2 Алгоритм нечеткого вывода

Нечеткое моделирование – это простой и естественный подход для преобразования лингвистического описания в математическую модель. Нечетким логическим выводом в задаче аппроксимации называют преобразование вида $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ каждой выходной лингвистической переменной от входных лингвистических переменных и получение заключения в виде нечеткого множества, соответствующего текущим значениям входов, с использованием нечеткой базы знаний и нечетких операций [2, 57, 133].

Для того чтобы обрабатывать согласованную информацию, необходимо либо преобразовывать поступающие от датчиков сигналы в лингвистические описания, допускающие обработку методами нечеткой логики, либо переводить лингвистическое описание процесса на язык цифр. Эти процедуры, называемые соответственно фаззификация и дефаззификация, выполняются при помощи функций принадлежности и совокупности правил [57, 133]. На рисунке 1.11 приведена обобщенная схема нечеткой системы определения индекса технического состояния ГПЭА [2, 24].

Для настройки правил нечётких моделей самыми распространенными алгоритмов являются алгоритм Мамдани и алгоритм Сугено, [24, 23].

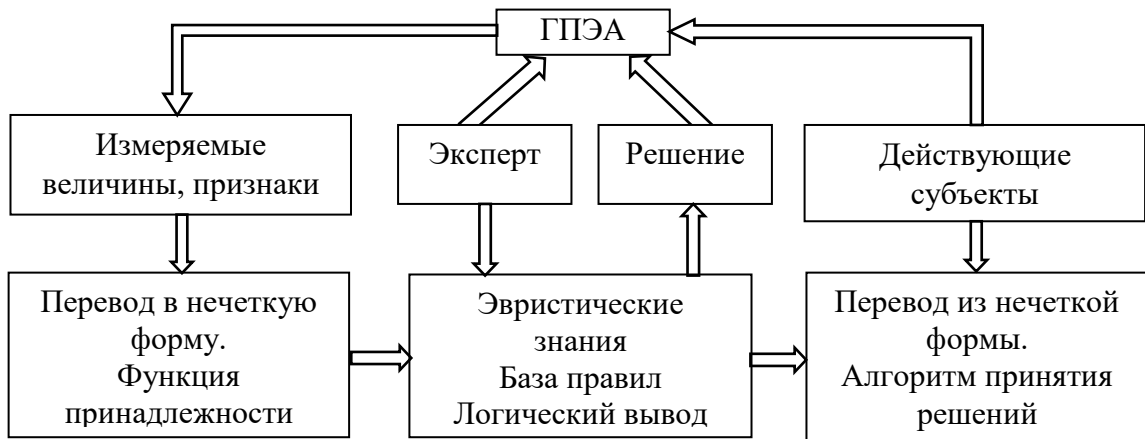


Рисунок 1.11 – Схема нечеткой системы определения индекса технического состояния ГПЭА [24, 23]

1.5.3 Методы прогнозирования технического состояния электротехнических комплексов

При прогнозировании технического состояния сложных технических систем, в том числе электротехнических комплексов, можно выделить три характерных подхода к решению поставленной задачи [46, 49, 86], а именно подходы, основанные на моделях, подходы, основанные на обработке измеряемых данных и подходы, основанные на анализе исторических данных.

Методы, основанные на моделях, предполагают создание математических или физических моделей для описания процессов деградации систем [86, 90]. Недостатками данных методов являются большая трудоемкость создания моделей, необходимость экспертных знаний [135], а также необходимость оптимизации моделей при изменении внешних факторов [105].

В основе методов, использующих обработку данных, лежит функциональное описание процессов физического износа оборудования при помощи измеряемых параметров, с использованием методов машинного обучения [104]. Преимуществом данных методов является их универсальность т.к. они не требуют глубоких экспертных знаний о структуре исследуемого объекта [96]. В то же время, эти методы не лишены недостатков, таких как зависимость от

количества и качества накопленных данных [103] и низкая точность при обработке сложных систем с множеством входных параметров [108].

Подходы, основанные на анализе исторических данных позволяют учитывать влияние влияющих внешних факторов, например сезонных изменений окружающей среды. [57].

1.6 Выводы по главе 1

1.Проведён анализ электротехнического комплекса ГПЭА, определены связи основных структурных элементов, выполнена классификация возможных неисправностей.

2.Использование отдельных методов не позволяет обеспечить полноту технического диагностирования ГПЭА, в состав которых входят машины, основанные на разных физических законах. Дефекты таких машин могут иметь как механическую, так и электрическую природу. Техническое диагностирование ГПЭА требует комплексного подхода.

3.Для достоверной оценки технического состояния ГПЭА необходим комплексный подход, основанный на сочетании нескольких методов. На основе сравнительного анализа определены наиболее перспективные методы: спектрального анализа, анализа магнитного поля и вибродиагностики. Эти методы обладают высокой информативностью и взаимодополняемостью, что позволяет идентифицировать широкий спектр дефектов как механической, так и электрической природы.

4.Определение причинно-следственных связей между неисправностями и диагностическими признаками может быть осуществлено экспериментально на ГПЭА с реальным или искусственным дефектом, либо на основе цифровой тени, которая позволяет определить эту связь теоретически. При этом для установления причинно-следственных связей требуется теоретически проанализировать диагностические признаки ГПЭА при эксплуатации с неисправностями, с учетом конструктивных особенностей.

5.Для оценки надежности, оценки и прогнозирования технического состояния ГПЭА целесообразно применение методов, использующих аппарат

теории нечётких множеств, которая позволяет использовать имеющуюся неформализованную информацию для настройки модели при отсутствии обучающей выборки, а также учитывать нелинейный характер влияния различных факторов без усложнения структуры модели.

6.Полученные результаты будут использованы в следующих главах для построения комплексной системы мониторинга технического состояния и диагностики на основе многоканальных диагностических признаков.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СГПМ НА ИСКАЖЕНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ СГПМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1 Многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ

2.1.1 Выбор программных средств и разработка цифровой тени

Для анализа магнитного поля СГПМ в настоящее время применяются специализированные инструменты численного моделирования. Наиболее распространёнными являются *FEMM* (*Finite Element Method Magnetics*), *Pyleecan* (*Python Library for Electrical Engineering Computational Analysis*) и *PyFEMM* (*Python-интерфейс к FEMM*). Данные программные средства выполняют расчёт магнитных полей на основе геометрических и физических характеристик машины [131]. Инструменты численного моделирования позволяют моделировать магнитные поля как в исправном состоянии, так и при неисправностях электрических машин [87].

В *FEMM* используется метод конечных элементов. Данная программа позволяет учитывать нелинейность магнитной проницаемости, утечки магнитного потока, температурные и геометрические искажения. Недостатком *FEMM* является низкая автоматизация.

PyFEMM является программным интерфейсом к *FEMM* и предоставляет более широкие по сравнению с *FEMM* возможности для автоматизации моделирования, включая программное построение геометрии, настройку материалов, запуск расчётов и извлечение результатов [106].

Pyleecan является *Python*-библиотекой, которая предназначена для параметрического анализа электрических машин, включая СГПМ. *Pyleecan* позволяет задавать топологию, физические параметры, режимы работы, а также взаимодействовать с *FEMM* через встроенные интерфейсы, формируя готовую к расчёту модель. Сравнительная характеристика возможностей этих программных средств представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение возможностей *FEMM*, *PyFEMM* и *Pyleecan* (составлено автором)

Характеристика	<i>FEMM</i>	<i>PyFEMM</i>	<i>Pyleecan</i>
Тип моделирования	2D FEM	2D FEM	Параметрическое + 2D FEM
Интерфейс	GUI (Windows)	Python API	Python API
Работа с магнитами	Да	Да	Да
Учёт насыщения стали	Да	Да	Да (через FEMM)
Утечка потока	Да	Да	Да
Визуализация поля	Поддерживается	Да (через Python-обработку)	Ограничена (вызов FEMM)
Поддержка автоматизации	Ограниченная	Полная	Полная
Поддержка многопараметрических расчётов	Нет	Да	Да
Диагностический потенциал	Высокий (ручной анализ)	Очень высокий (цифровая тень)	Высокий (автоматический анализ)

Модульная архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ (рисунок 2.1) основана на принципе разделения физических задач моделирования на две взаимосвязанные подсистемы: симулятор внутреннего магнитного поля и блок проверки внешнего поля. Такой подход обеспечивает как физическую достоверность модели, так и возможность количественной проверки диагностических алгоритмов на основе сравнения с экспериментальными измерениями [19, 52].

Центральным элементом системы является модуль управления режимами, обеспечивающий выбор сценариев работы (симуляция, проверка, сравнение), конфигурацию геометрии, дефектов и материалов, а также адаптацию к среде исполнения (локально или в облаке).

Ядро расчётов разделено на два компонента. Основной симулятор реализован на базе *PyFEMM* и предназначен для высокоточного моделирования поля $B(x, y)$ внутри генератора. Используется численный метод конечных элементов с возможностью наложения различных типов дефектов (например, размагничивание и эксцентриситет) и анализа их влияния на поле. Параметры поля считываются с виртуальных датчиков Холла, размещённых на радиусе 400 мм внутри корпуса.

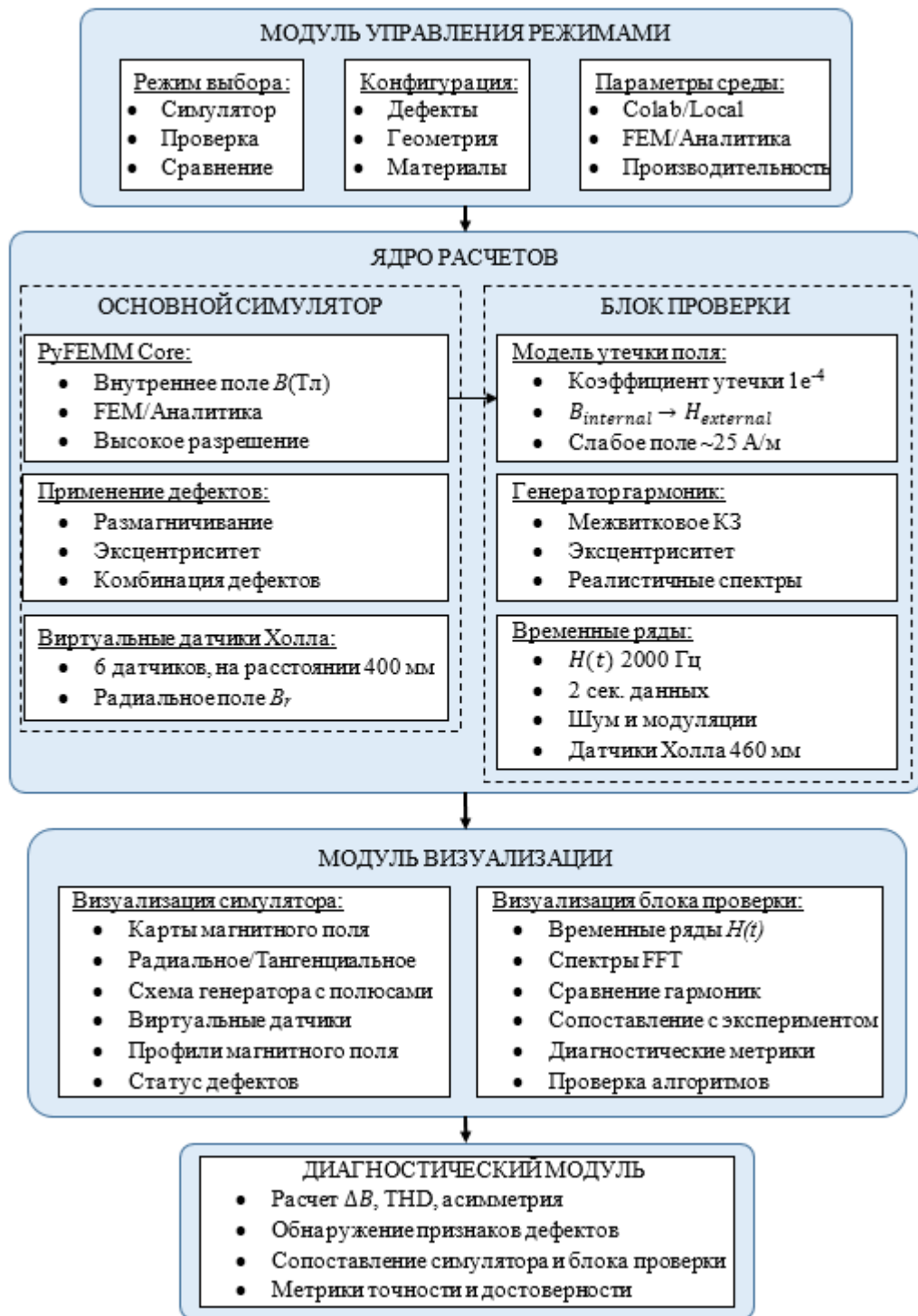


Рисунок 2.1 – Модульная многоуровневая архитектура цифровой тени магнитного поля СГПМ
(составлено автором)

Визуализация ядра расчетов представлена на рисунке 2.2.

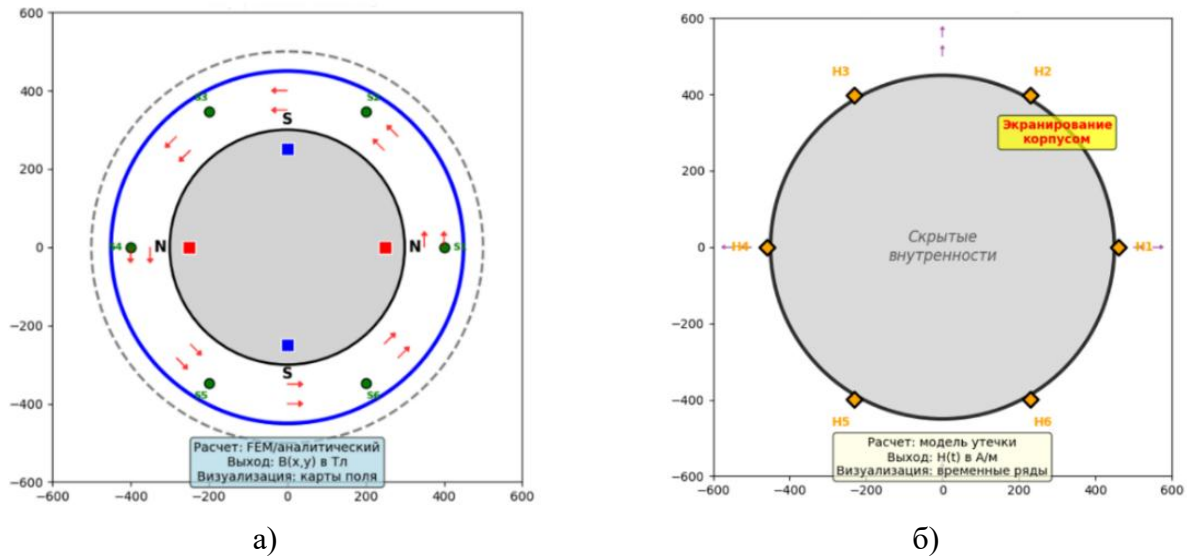


Рисунок 2.2 – Визуализация ядра расчетов: а) основной симулятор (внутреннее поле B_{int}); б) блок проверки (внешнее поле H_{ext}) (составлено автором)

Блок проверки анализирует ослабление магнитного поля при его распространении через металлический корпус генератора. Преобразование внутреннего поля во внешнее осуществляется с учётом коэффициента утечки. Коэффициент утечки зависит от геометрии, частоты, магнитной проницаемости и электропроводности материала корпуса. Модель позволяет формировать временные ряды напряженности поля $H(t)$ с частотой дискретизации 2 кГц, спектральными искажениями и шумом.

Взаимодействие симулятора и блока проверки предусмотрено через преобразование внутреннего поля B_{int} во внешнее H_{ext} с учетом коэффициента утечки и деления на магнитную проницаемость воздушного зазора μ_0 . Далее формируются спектры и моделируется влияние дефектов.

Блок проверки содержит базу данных реальных измерений внешнего магнитного поля действующих генераторов. Измерения напряженности внешнего магнитного поля СГПМ проводились на корпусе синхронного генератора в фиксированных точках с использованием датчика Холла и измерителя напряженности электрических и магнитных полей «ПЗ–80». Переход из временной области в частотную (25...675 Гц) производился при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) во встроенном программном комплексе $P3-80-DSP$. Фрагмент результатов измерений показан в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Фрагмент результатов измерений внешнего магнитного поля СГПМ при нагрузке 1486 кВт (составлено автором)

Частота, Гц	Напряженность магнитного поля по точкам, дБ											
	H1		H2		H3		H4		H5		H6	
	СКЗ	Макс.	СКЗ	Макс.	СКЗ	Макс.	СКЗ	Макс.	СКЗ	Макс.	СКЗ	Макс.
25	53,6	56,6	53	53,4	57,5	57,6	49,3	55,2	45,6	48,1	45,1	52,5
50	87,4	87,9	94,9	95,4	91,6	93,2	80,8	85	79,6	80,2	88,3	88,9
75	39,8	40,4	45,6	46,2	47,3	47,5	35,8	37,6	30,7	31,9	41,2	48,3
100	36,2	41,3	27,4	30	45,3	45,6	33,5	35,5	35,9	37,1	48,7	49,5
125	29,3	30,6	29,0	31,5	32,3	35,7	22,5	24,1	22,9	24,6	30,9	41,5
150	46,6	48	57,2	57,2	62,5	68,3	42,6	43,8	53,9	55,7	78,4	79,0

Модуль предоставляет карты поля $B(x, y)$, профили, распределения по датчикам, а также временные ряды и спектры $H(t)$, формируемые блоком проверки. Диагностический модуль обрабатывает эти данные, извлекая метрики, такие как ΔB , THD и коэффициенты асимметрии, а также сопоставляя выходы симулятора и блока проверки.

Фундаментальная особенность предложенной архитектуры заключается в физическом различии между моделируемыми полями: внутреннее поле (до 0,3–1,5 Тл) обладает сложной пространственной структурой, в то время как внешнее поле (до 25 А/м) доступно для измерений, но ослаблено корпусом генератора. Эффективность экранирования корпуса может быть оценена коэффициентом ослабления корпуса на основе классической теории экранирования [81, 83, 127] по формуле (2.1):

$$k_{\text{ослаб}} = \left(\frac{R_{\text{ст}}}{R_{\text{корп}}} \right)^{2p} \times \exp \left(- \frac{t_{\text{корп}}}{\sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_{\text{ст}} \sigma_{\text{ст}}}}} \right), \quad (2.1)$$

где $k_{\text{ослаб}}$ – коэффициент ослабления магнитного поля; $R_{\text{ст}}$ – наружный радиус статора, м; $R_{\text{корп}}$ – наружный радиус корпуса, м; p – число пар полюсов машины; $t_{\text{корп}}$ – толщина стенки корпуса, м; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с; $\mu_{\text{ст}}$ – относительная магнитная проницаемость стали (≈ 2000); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; $\sigma_{\text{ст}}$ – электрическая проводимость стали, См/м.

Первый множитель описывает геометрическое ослабление поля согласно закону мультипольного рассеяния (для диполя, квадруполь и т.д.) [83]. Фактор $2p$ отражает влияние числа пар полюсов на пространственное распределение поля [81]. Второй множитель учитывает экспоненциальное затухание поля при прохождении через ферромагнитную оболочку, описываемое скин-эффектом [127].

Применение формулы для генератора *Caterpillar SR4BHV* с параметрами $R_{ст} = 0,45$ м, $R_{корп} = 0,48$ м, $t_{корп} = 0,025$ м, $p=2$, $f=50$ Гц, $\mu_{ст} = 2000$, $\sigma_{ст} = 2 \times 10^6$ См/м, даёт оценку $k_{ослаб} \approx 2 \times 10^{-4}$, что соответствует ослаблению магнитной индукции в 5000 раз. Таким образом, при типичной индукции в зазоре 0,3 Тл, внешнее поле составит порядка 60 мкТл, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (например, напряжённость 24 А/м при 50 Гц).

Цифровая тень обеспечивает высокую точность, т.к. содержит экспериментальные данные.

2.1.2 Построение базовой модели генератора и моделирование магнитного поля в исправном состоянии

Цифровая тень построена для синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов *Caterpillar SR4BHV*. Данные генераторы широко применяются в составе ГПЭА. Основные технические характеристики генератора, представленные в таблице 2.3 соответствуют технической документации компании *Caterpillar* на генераторы серии *SR4B HV* [71].

Таблица 2.3 – Технические характеристики генератора *Caterpillar SR4BHV* [71]

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Электрические параметры			
Номинальная мощность	$P_{ном}$	2000	кВт
Номинальное напряжение	$U_{ном}$	6300	В
Номинальный ток	$I_{ном}$	229,1	А
Частота	f	50	Гц
Синхронная скорость	n_c	1500	об/мин
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,8	—
Число полюсов	$2p$	4	—
Геометрические параметры			
Диаметр ротора	D_r	600	мм

Продолжение таблицы 2.3

Толщина ярма ротора	h_{yr}	80	мм
Полюсное деление	τ_p	0,7	—
Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Высота полюса	h_p	60	мм
Ширина полюсного наконечника	b_{ps}	120	мм
Высота полюсного наконечника	h_{ps}	15	мм
Внутренний диаметр статора	D_{si}	610	мм
Наружный диаметр статора	D_{so}	900	мм
Толщина ярма статора	h_{ys}	100	мм
Ширина зубца статора	b_t	20	мм
Ширина паза статора	b_s	15	мм
Глубина паза статора	h_s	80	мм
Воздушный зазор	δ	5	мм
Активная длина	l_a	500	мм
Параметры обмоток			
Пазов на полюс и фазу	q	3	—
Витков в катушке статора	w_c	10	—
Площадь проводника	S_{np}	25	мм ²
Коэффициент заполнения	k_z	0,6	—
Витков обмотки подвозбудителя	w_f	100	—
Ток возбуждения	I_f	13,82	А
Магнитные материалы			
Сталь ротора и статора	—	M-19 Steel	—
Материал магнитов	—	NdFeB N42	—
Остаточная индукция	B_r	1,32	Тл
Коэрцитивная сила	H_c	955	кА/м

Геометрическая модель генератора строится на основе технических параметров с учетом симметрии конструкции. Так как машина четырехполюсная, достаточно рассмотреть четверть модели (90°) и соответствующие граничные условия.

Ротор цилиндрический с явно выраженными полюсами. На полюсах размещены постоянные магниты из материала NdFeB N42. Геометрия полюса: полюсное деление: $\tau_p=0,7$ от полного шага полюса, трапецевидная форма профиля полюсного наконечника для обеспечения синусоидального распределения поля в зазоре, поверхностное расположение магнитов с радиальной намагниченностью.

Граничные условия были заданы следующим образом:

- на внешней границе области: $A = 0$ (векторный магнитный потенциал);
- на границах симметрии: $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ (производная по нормали равна нулю);
- в области постоянных магнитов: источники поля с заданной намагниченностью.

Расчёт магнитного поля в генераторе основан на решении уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала A , Вб/м, в двумерной постановке (2.2) [95]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J + \nabla \times M, \quad (2.2)$$

где ∇ – дифференциальный оператор набла; μ – магнитная проницаемость материала, Гн/м; J – плотность тока в обмотках, А/м²; M – намагниченность постоянных магнитов, А/м.

Для двумерной задачи с осевой симметрией уравнение (2.2) упрощается до скалярного вида (2.3) [95]:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - \frac{\partial M_y}{\partial x} + \frac{\partial M_x}{\partial y}, \quad (2.3)$$

где A_z – составляющая векторного магнитного потенциала по оси z , Вб/м; M_y, M_x – намагниченность постоянных магнитов по осям координат y и x , А/м.

Характеристика намагничивания электротехнической стали М–19 Steel задается кривой $B(H)$, аппроксимированной функцией Фрёлиха (2.4) [5]:

$$B = \mu_0 H + \frac{aH}{1 + b|H|}, \quad (2.4)$$

где $a = 0,002$ м/А, $b = 1,5 \times 10^{-4}$ м/А.

Постоянные магниты NdFeB N42 моделируются как источники поля с линейной характеристикой размагничивания: $B = \mu_r \mu_0 H + B_r$ при $H < H_c$, где $\mu_r = 1,05$, $B_r = 1,32$ Тл, $H_c = 955$ кА/м.

Результаты моделирования исправного состояния показаны на рисунке 2.3.

При номинальном режиме работы ($I_f = 13,82$ А, нагрузка $P = 2000$ кВт) максимальная радиальная индукция составит $B_{r\max} = 0,95$ Тл;

среднеквадратичное значение $B_{r\,RMS} = 0,67$ Тл, коэффициент гармонических искажений $THD < 5\%$.

Распределение магнитного поля в ярме статора: максимальная индукция $B_{max} = 1,65$ Тл, средняя индукция $B_{cp} = 1,2$ Тл, степень насыщения стали умеренная ($\mu_r \approx 800$). В зубцах статора максимальная индукция: $B_{z\,max} = 1,8$ Тл.

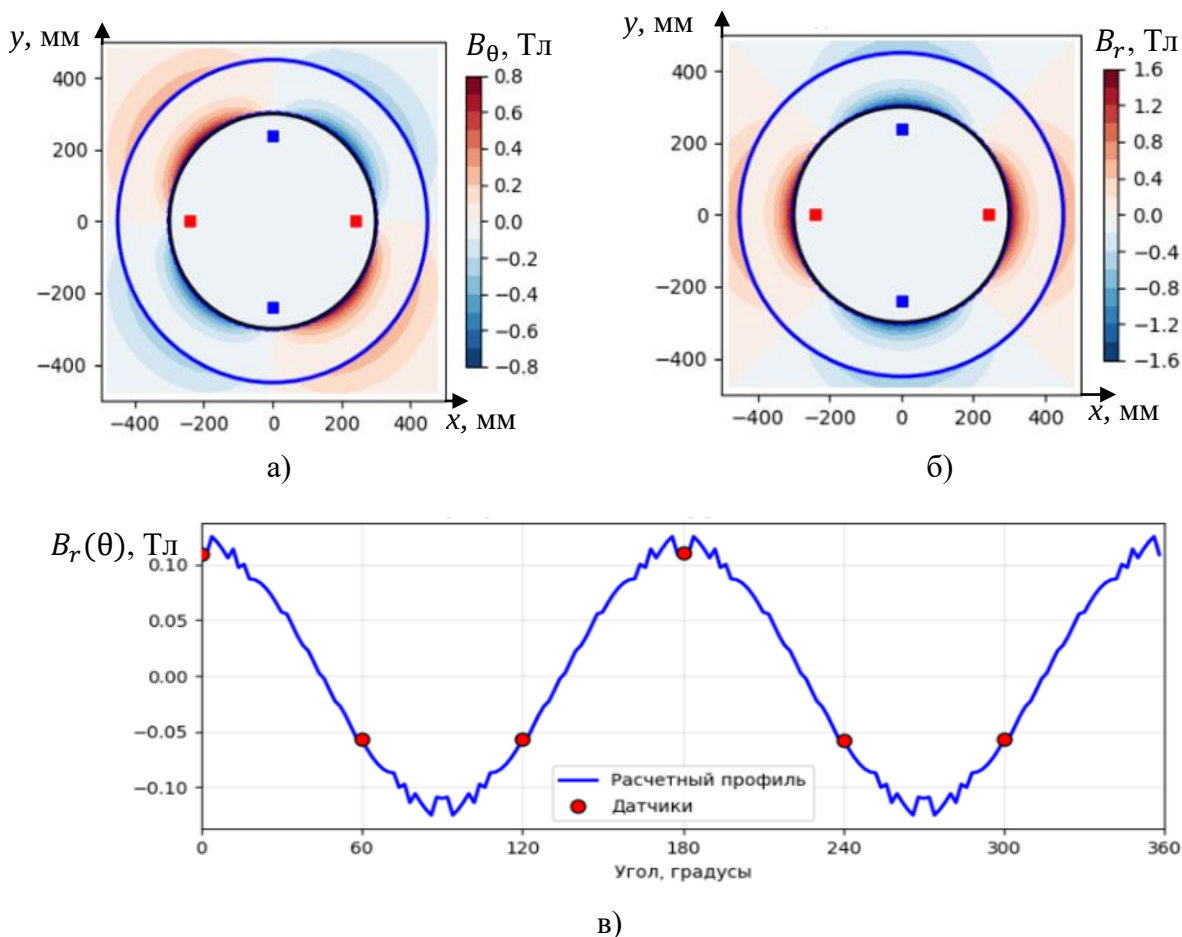


Рисунок 2.3 – Результаты моделирования распределения магнитного поля в модели исправного состояния генератора: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ ; в) профиль радиальной составляющей по окружности (составлено автором)

Амплитуда основной гармоники составляет 94,2% от общей амплитуды, амплитуда 5-ой гармоники 2,8%, амплитуда 7-ой гармоники 1,4%, амплитуды высших гармоник ($n > 7$) менее 1,6%.

Потокосцепление фазы статора:

$$\Psi_s = \int_{S_{\text{фазы}}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 2,84 \text{ [Вб]}.$$

Индукцированная ЭДС (действующее значение):

$$E = \frac{\omega \cdot \Psi_s}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \cdot \Psi_s}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \times 50 \times 2,84}{\sqrt{2}} \approx 6308 \text{ [В]}.$$

Электромагнитный момент рассчитывается по тензору напряжений Максвелла:

$$M_{\text{эм}} = \frac{l_a}{\mu_0} \oint_S r \times \left(B_r B_\theta - \frac{B^2}{2} \delta_{r\theta} \right) dS \approx 12740 \text{ [Н·м]}.$$

При номинальной скорости ($n=1500$ об/мин) механическая мощность составит:

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{эм}} \omega = 12740 \times \frac{2\pi \times 1500}{60} \approx 1999,9 \text{ кВт}.$$

Отличие от номинальной мощности (2000 кВт) составляет 0,005%, что находится в пределах погрешности численного моделирования.

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными представлено в таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными (составлено автором)

Параметр	Результаты расчета	Экспериментальные данные	Погрешность расчета
ЭДС холостого хода, В	6308	6300	0,13%
Электромагнитный момент, Н·м	12740	12800	0,5%
Максимальная индукция в зазоре, Тл	0,95	0,92	3,3%
Коэффициент гармонических искажений магнитного поля, %	4,8	5,2	7,7%

Максимальная погрешность не превышает 7,7%, что является приемлемой точностью для задач диагностики.

При исследовании симулятора был проведён анализ влияния основных параметров на характеристики поля:

- воздушный зазор ($\pm 10\%$): изменение $B_{r\max}$ на $\pm 15\%$;
- намагниченность магнитов ($\pm 5\%$): изменение $B_{r\max}$ на $\pm 5\%$;
- ток возбуждения ($\pm 10\%$): изменение потокосцепления на $\pm 8\%$.

Наибольшее влияние оказывает величина воздушного зазора, что подчёркивает важность точного геометрического моделирования.

Таким образом, разработанная базовая модель генератора *Caterpillar SR4BHV* обеспечивает достаточную точность (погрешность не превышает 7,7%).

2.2 Моделирование дефектов в СГПМ

2.2.1 Принцип моделирования дефектов

Математически процесс моделирования описывается следующим образом:

- для единичного дефекта по формуле (2.5):

$$B_{\text{дефект}} = f_i(B_{\text{норм}}, P_i), \quad (2.5)$$

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

- для комбинированных дефектов по формуле (2.6):

$$B_{\text{комб}} = B_{\text{норм}} + \sum_{i=1}^N \Delta B_i, \quad (2.6)$$

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

Система включает следующие пять основных типов дефектов:

- размагничивание постоянных магнитов;
- эксцентриситет ротора;
- межвитковое замыкание в обмотке статора;
- дефекты подшипников;
- дисбаланс ротора.

2.2.2 Размагничивание постоянных магнитов

Размагничивание может быть вызвано несколькими факторами:

- температурное размагничивание (превышение рабочей температуры магнита выше критического значения ($\approx 150^\circ\text{C}$ для NdFeB N42));
- размерные эффекты (локальные перегревы на границах магнитных доменов);
- демагнетизирующее воздействие (сильные противоположно направленные магнитные поля от токов короткого замыкания).
- механические повреждения (сколы, трещины, отслоение от ротора).

Размагничивание описывается локальным снижением намагниченности магнита в пораженной области формулой (2.7) [123]:

$$M_{\text{дефект}}(\theta) = M_0 \cdot \left(1 - S_{\text{демаг}} \cdot G(\theta, \theta_{\text{дефект}}, \sigma)\right), \quad (2.7)$$

где M_0 – номинальная намагниченность магнита (1,32 Тл для NdFeB N42); $S_{\text{демаг}}$ – степень размагничивания ($0 \leq S_{\text{демаг}} \leq 1$); $G(\theta, \theta_{\text{дефект}}, \sigma)$ – функция пространственного распределения дефекта; θ – угловая координата, рад; $\theta_{\text{дефект}}$ – угловое положение пораженного полюса, рад; σ – параметр локализации дефекта.

Функция пространственного распределения моделируется гауссовым профилем по формуле (2.8) [63]:

$$G(\theta, \theta_{\text{дефект}}, \sigma) = \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_{\text{дефект}})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.8)$$

Радиальная составляющая магнитной индукции в области размагниченного полюса определяется выражением (2.9) [130]:

$$B_r(\theta) = B_{r0} \cdot (1 - S_{\text{демаг}}) \cdot \cos(p\theta + \phi_{\text{дефект}}), \quad (2.9)$$

где B_{r0} – амплитуда основной гармоники поля, Тл; p – число полюсных пар; $\phi_{\text{дефект}}$ – фазовый сдвиг, обусловленный положением дефектного полюса, рад.

Моделирование дефекта в виде 50 % размагничивания одного полюса (снижение намагниченности относительно номинальной намагниченности магнита на 50%) выполнено в среде *Colab* и представлено на рисунке 2.4.

На распределении радиальной и тангенциальной составляющей поля отчётливо видно локальное снижение индукции в области дефектного полюса (отмечено красным крестом).

В отличие от профиля в исправном состоянии, наблюдается существенное снижение амплитуды вблизи угла $\theta = 0^\circ$ (точка *H1*), где расположен дефектный полюс (значение 0,0544 Тл), против 0,11 Тл на противоположной стороне (точка *H4*). Асимметрия профиля связана с неравномерным распределением остаточной намагниченности.

Такие искажения позволяют использовать коэффициент симметрии и профиль поля в качестве диагностических признаков.

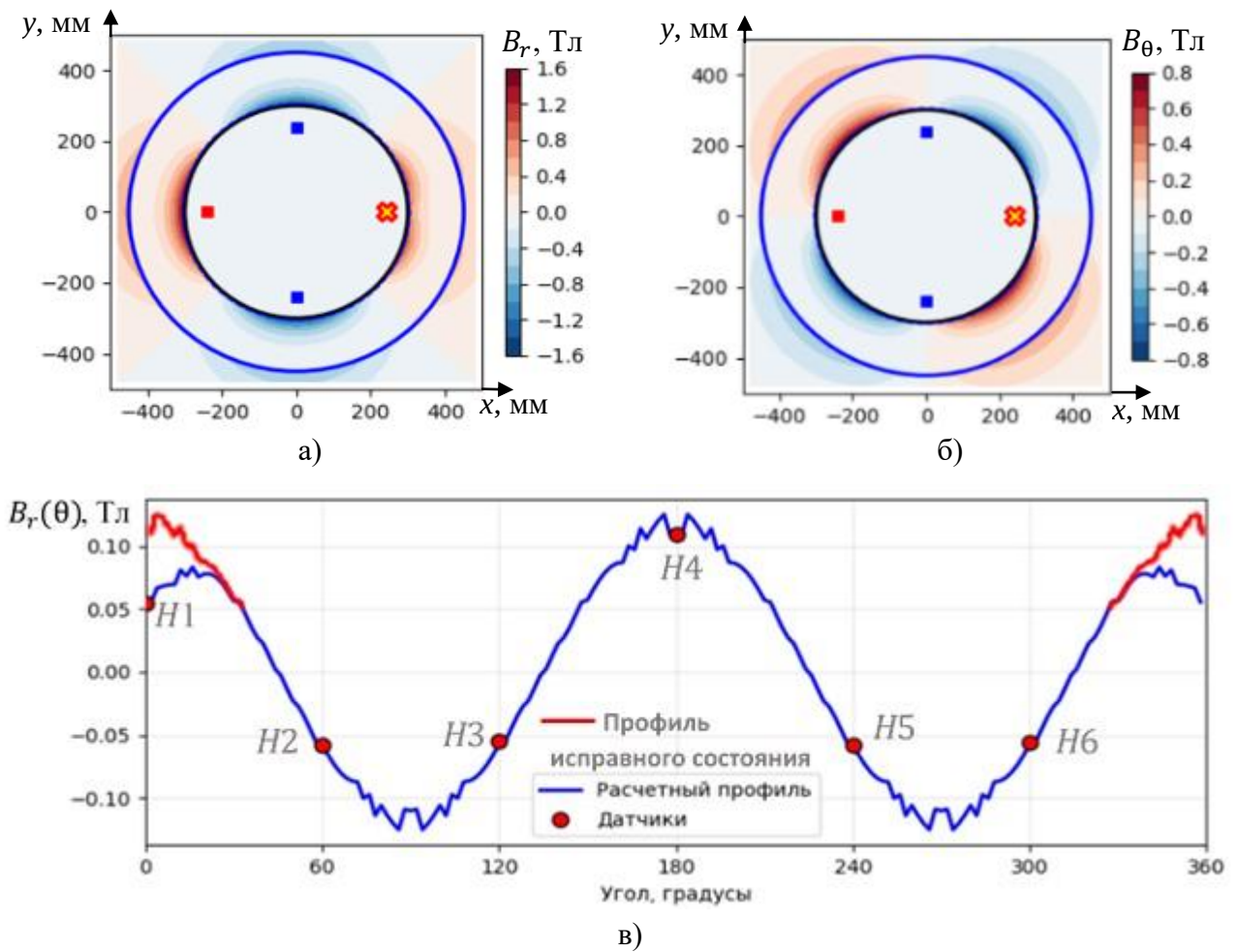


Рисунок 2.4 – Моделирование эффекта размагничивания: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ ; в) профиль радиальной составляющей по окружности (составлено автором)

2.2.3 Эксцентриситет ротора

Для статического эксцентриситета воздушный зазор описывается выражением (2.10) [80, 120]:

$$\delta(\theta) = \delta_0(1 + \varepsilon_s \cos(\theta - \alpha_s)), \quad (2.10)$$

где δ_0 – номинальный воздушный зазор (5 мм); ε_s – относительная степень статического эксцентриситета ($\varepsilon_s = e_s/\delta_0$); e_s – абсолютное смещение центра ротора; α_s – угол направления смещения.

Для динамического эксцентриситета воздушный зазор определяется формулой (2.11) [80, 120]:

$$\delta(\theta, t) = \delta_0(1 + \varepsilon_d \cos(\theta - \omega t - \alpha_d)), \quad (2.11)$$

где ε_d – относительная степень динамического эксцентриситета; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; α_d – начальная фаза динамического смещения, рад.

Изменение воздушного зазора приводит к модуляции магнитного поля по закону (2.12) [80, 120]:

$$B_r(\theta) = B_{r0} \cdot \frac{\delta_0}{\delta(\theta)} \cdot \cos(p\theta). \quad (2.12)$$

При статическом эксцентриситете в спектре магнитного поля появляются компоненты с частотой, определяемой выражением (2.13):

$$f_{\text{эксц}} = f \pm f_r, \quad (2.13)$$

где $f_r = n/60$ – частота вращения ротора в Гц.

При эксцентриситете изменяется также коэффициент экранирования корпуса. Для учета этого эффекта вводится поправочный коэффициент в соответствии с выражением (2.14) [111, 112]:

$$k_{\text{экр}}(\theta) = k_0 \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{\delta(\theta) - \delta_0}{\delta_0} \right), \quad (2.14)$$

где k_0 – номинальный коэффициент экранирования ($k_0 = 2 \times 10^{-4}$); β – коэффициент чувствительности экранирования к изменению зазора ($\beta \approx 0,3$) [115].

При моделировании эксцентриситета на уровне 40 % (смещение оси ротора на 40% от номинального значения воздушного зазора) наблюдается пространственная асимметрия в распределении магнитного поля.

Эти искажения отчётливо проявляются на векторных картах радиальной B_r (рисунок 2.5, а) и тангенциальной составляющих поля B_θ (рисунок 2.5, б).

В то же время профиль поля $B_r(\theta)$ по окружности датчиков Холла сохраняет синусоидальную форму и практически не отличается от исправного состояния (рисунок 2.3, в). Таким образом, диагностика эксцентриситета на основе использования датчиков Холла затруднена.

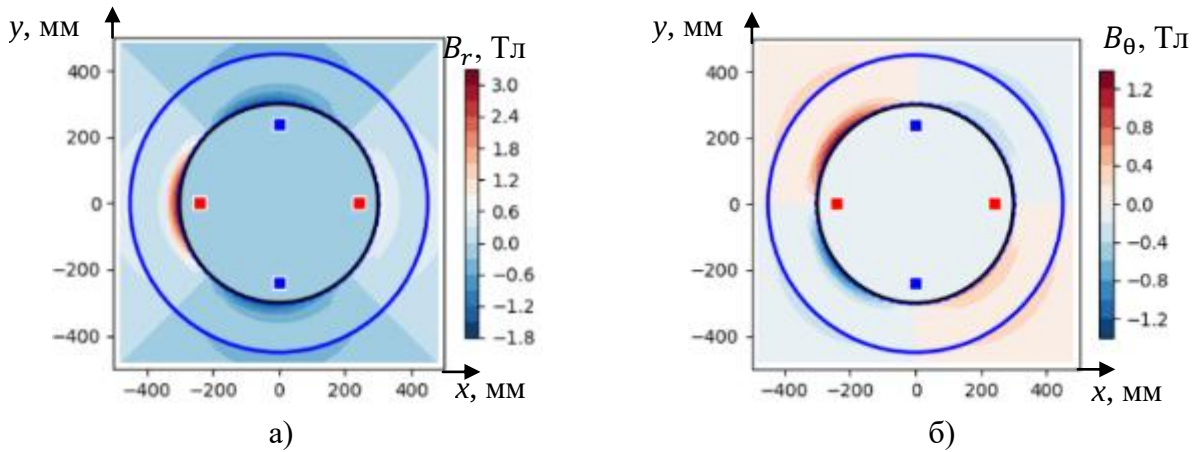


Рисунок 2.5 – Моделирование эксцентриситета: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ (составлено автором)

2.2.4 Межвитковые замыкания в обмотке статора

Межвитковое замыкание моделируется как снижение эффективного числа витков $w_{\text{эфф}}$ в пораженной фазе по формуле (2.15) [110]:

$$w_{\text{эфф}} = w_0 \cdot (1 - S_{\text{КЗ}} \cdot k_{\text{вит}}), \quad (2.15)$$

где w_0 – номинальное число витков катушки; $S_{\text{КЗ}}$ – степень межвиткового замыкания ($0 \leq S_{\text{КЗ}} \leq 1$); $k_{\text{вит}}$ – доля замкнутых витков.

Эквивалентное сопротивление короткозамкнутого контура определяется выражением (2.16) [110]:

$$R_{\text{КЗ}} = R_{\text{вит}} \cdot \frac{w_{\text{КЗ}}^2}{w_0^2} + R_{\text{переход}}, \quad (2.16)$$

где $R_{\text{вит}}$ – сопротивление одного витка, Ом; $w_{\text{КЗ}}$ – число замкнутых витков, $R_{\text{переход}}$ – переходное сопротивление в месте замыкания, Ом.

Межвитковое замыкание приводит к появлению четных гармоник в спектре магнитного поля, определяемых формулой (2.17) [101, 107]:

$$B_r(\theta) = B_{r1} \cos(p\theta) + \sum_{k=2,4,6\dots} B_{rk} \cos(kp\theta + \phi_k). \quad (2.17)$$

Амплитуды четных гармоник определяются степенью замыкания по выражению (2.18) [85, 101, 107]:

$$B_{r2k} = S_{\text{КЗ}} \cdot \alpha_k \cdot B_{r1}, \quad (2.18)$$

где α_k – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров обмотки.

Типичные значения:

- 2-я гармоника: $\alpha_2 = 0,2$;
- 4-я гармоника: $\alpha_4 = 0,1$;
- 6-я гармоника: $\alpha_6 = 0,05$.

При межвитковом коротком замыкании с замыканием 30% витков в обмотках СГПМ наблюдаются выраженные искажения магнитного поля, проявляющиеся в асимметрии распределения как радиальной, так и тангенциальной составляющих, (рисунок 2.6, а, б).

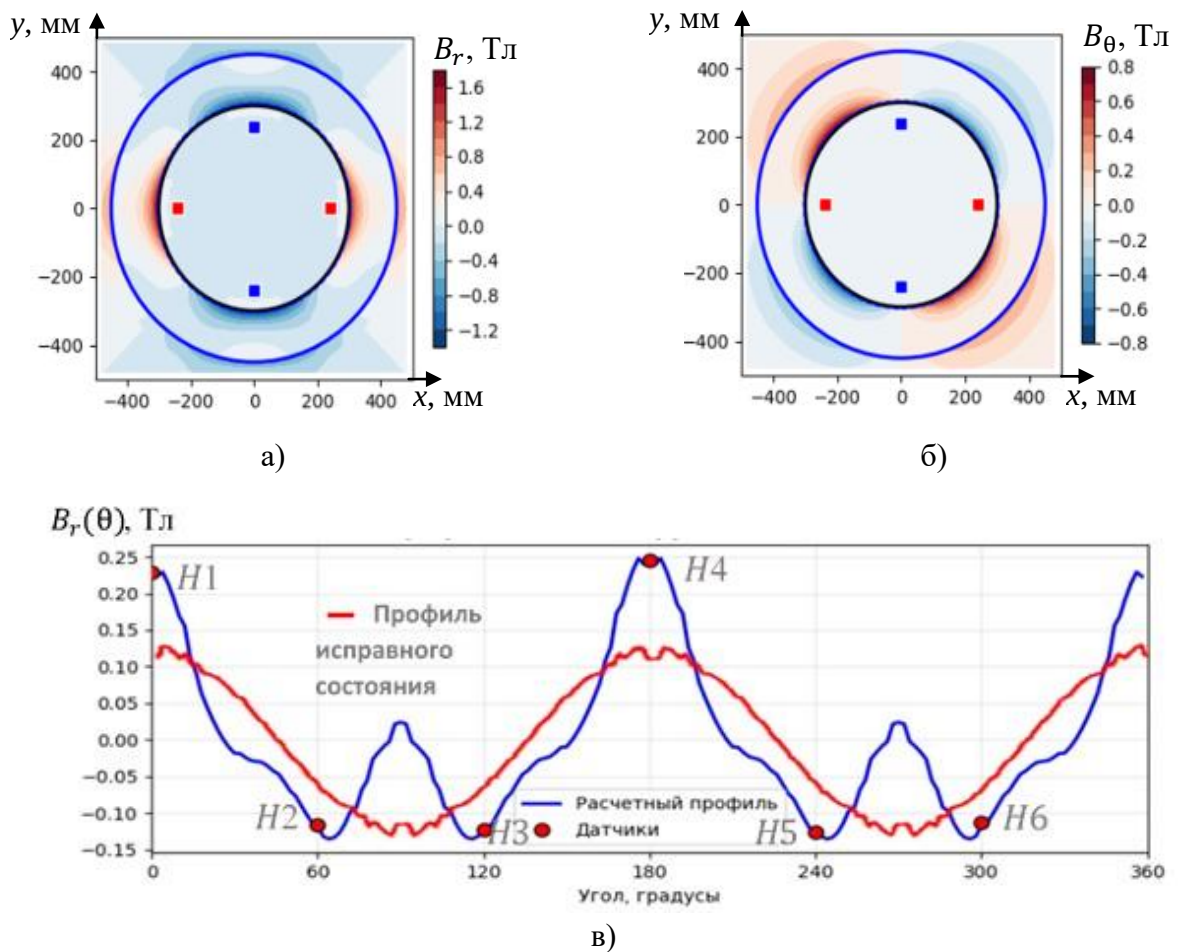


Рисунок 2.6 – Моделирование межвиткового замыкания: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ ; в) профиль радиальной составляющей по окружности (составлено автором)

По сравнению с нормальным режимом профиль поля по окружности расположения датчиков теряет синусоидальный характер, что указывает на нарушение симметрии магнитного потока (рисунок 2.6, в). Существенный рост

амплитуды сигналов от датчиков Холла (до 0,24 Тл) и усиление их расхождения делают такой дефект хорошо различимым при использовании датчиков Холла.

2.2.5 Дефекты подшипников

Каждый тип дефекта характеризуется частотой проявления в соответствии с выражениями (2.19–2.21) [22]:

- дефект внутреннего кольца:

$$f_{BPFI} = \frac{n \cdot Z}{60 \cdot 2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right), \quad (2.19)$$

где n – частота вращения, об/мин; Z – число тел качения; d – диаметр тел качения, мм; D – диаметр дорожки качения, мм; α – угол контакта, градусы,

- дефект внешнего кольца:

$$f_{BPFO} = \frac{n \cdot Z}{60 \cdot 2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right), \quad (2.20)$$

- дефект тел качения:

$$f_{BSF} = \frac{n \cdot D}{60 \cdot 2d} \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right). \quad (2.21)$$

Дефекты подшипников проявляются как амплитудная модуляция основного магнитного поля по формуле (2.22) [79]:

$$B_r(\theta, t) = B_{r0} \cdot (1 + m_{\text{мод}} \cos(2\pi f_{\text{дефект}} t)) \cdot \cos(p\theta), \quad (2.22)$$

где $m_{\text{мод}}$ – глубина модуляции, пропорциональная степени дефекта; $f_{\text{дефект}}$ – характерная частота дефекта подшипника, Гц.

При сравнении результатов моделирования исправного состояния синхронного генератора *SR4BHV* и состояния с дефектом подшипника на уровне 35 % ($m_{\text{мод}} = 0,35$ – амплитуда боковых полос модуляции магнитного поля на характерной частоте дефекта составляет 35 % от основной гармоники) наблюдаются минимальные отличия в распределениях магнитного поля (рисунок 2.7, а, б).

Значения сигналов Холла по всем шести датчикам практически идентичны исправному случаю.

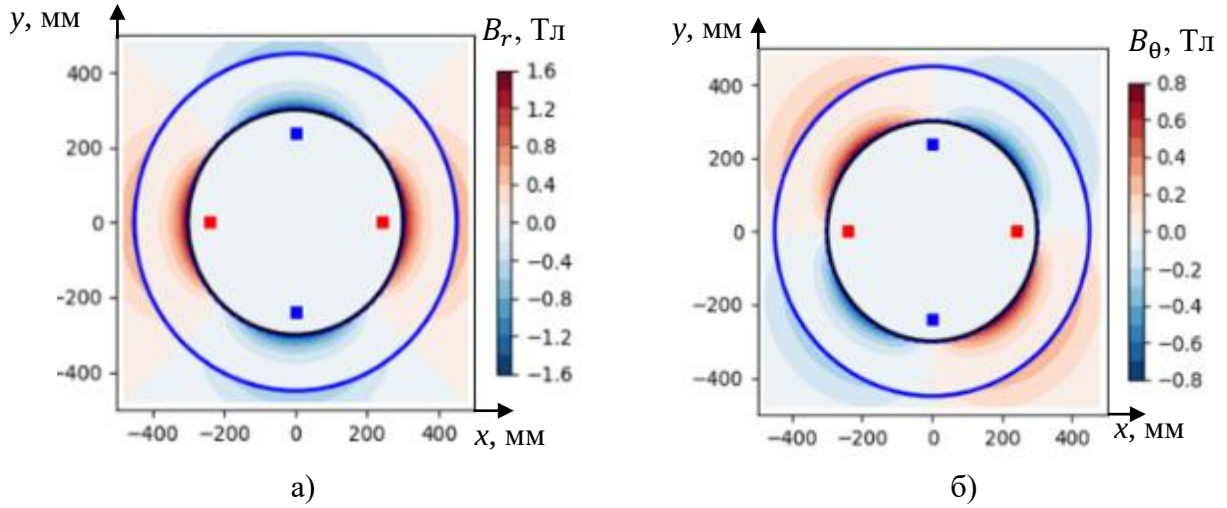


Рисунок 2.7 – Моделирование дефекта подшипника: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ (составлено автором)

Профиль радиального поля по окружности также значительно не изменяется. Это указывает на низкую чувствительность магнитной диагностики к дефектам подшипников, что требует дополнительных методов диагностики, например, вибромониторинга.

2.2.6 Дисбаланс ротора

Дисбаланс $F_{\text{центр}}$ характеризуется эксцентрической массой $m_{\text{дисб}}$ на радиусе $r_{\text{дисб}}$ выражением (2.23) [65, 77]:

$$F_{\text{центр}} = m_{\text{дисб}} \cdot r_{\text{дисб}} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t + \phi_{\text{дисб}}). \quad (2.23)$$

Дисбаланс проявляется в магнитном поле как синхронная компонента с частотой, равной частоте вращения и определяется формулой (2.24) [65, 77]:

$$B_r(\theta, t) = B_{r0} \cos(p\theta) + B_{\text{дисб}} \cos(\omega t + \theta + \phi_{\text{дисб}}). \quad (2.24)$$

Амплитуда составляющей, обусловленная дисбалансом с определяется с помощью выражения (2.25) [65, 77]:

$$B_{\text{дисб}} = k_{\text{дисб}} \cdot \frac{m_{\text{дисб}} \cdot r_{\text{дисб}}}{m_{\text{ротор}} \cdot R_{\text{ротор}}} \cdot B_{r0}, \quad (2.25)$$

где $k_{\text{дисб}} \approx 0,15$ – коэффициент передачи дисбаланса в магнитное поле; $R_{\text{ротор}}$ – радиус ротора.

В случае дисбаланса ротора синхронного генератора *SR4BHV* наблюдаются незначительные искажения распределения магнитного поля, проявляющиеся в слабой асимметрии радиальной и тангенциальной компонент (рисунок 2.8, а, б).

Сигналы на всех шести датчиках Холла практически идентичны значениям в нормальном режиме. Таким образом, для выявления дисбаланса ротора требуются дополнительные методы диагностики, в первую очередь, вибродиагностика.

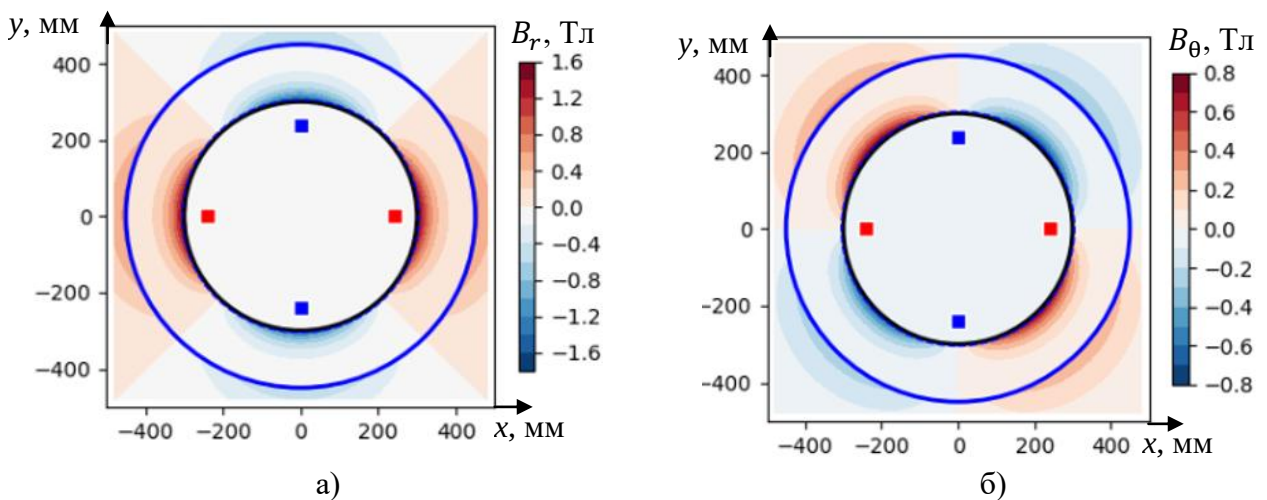


Рисунок 2.8 – Моделирование дефекта дисбаланса ротора: а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ (составлено автором)

2.3 Оценка нижнего предела обнаружения дефектов

2.3.1 Оценка нижнего предела обнаружения межвитковых замыканий

Порог принятия решения определяется по критерию Неймана–Пирсона определяемому формулой (2.26):

$$x_{\text{порог}} = \mu_0 + k_{\text{ЛТ}} \times \sigma_0, \quad (2.26)$$

где μ_0 и σ_0 – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение признака для исправного состояния, $k_{\text{ЛТ}}$ – квантиль нормального распределения, соответствующий допустимой вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$ (при $k_{\text{ЛТ}}=3$ вероятность ложной тревоги составляет $P_{\text{ЛТ}} \approx 0,13\%$).

Минимально обнаружимая степень межвиткового замыкания при вероятности правильного обнаружения P_D , задаваемой квантилем k_D , определяется выражением (2.27):

$$S_{K3min} = (k_{ЛТ} + k_D) \cdot \frac{\sigma_0}{\alpha_2}. \quad (2.27)$$

Параметры фона исправного состояния определены экспериментально по результатам измерений внешнего магнитного поля пяти однотипных ГПЭА, работавших под нагрузкой от 1486 кВт до 1668 кВт, в шести точках по окружности корпуса каждого агрегата ($n=30$ измерений).

В качестве признака использовано отношение напряжённости поля на частоте второй гармоники к основной, H_{100}/H_{50} .

Полученные значения: $\mu_0=0,39\%$, $\sigma_0=0,32\%$, максимальное $H_{100}/H_{50}=1,11\%$; порог $3\sigma=1,34\%$.

Подстановка экспериментальных значений в формулу (2.27) при $P_{ЛТ} = 0,13\%$ и $P_D = 99,9\%$ даёт оценки нижнего предела обнаружения, представленные на рисунке 2.9.

При использовании единого порога по парку минимально обнаруживаемая степень замыкания составляет $S_{K3min} \approx 10\%$.

Индивидуальная калибровка порога для каждой точки измерения снижает предел обнаружения до $S_{K3min} \approx 5\%$.

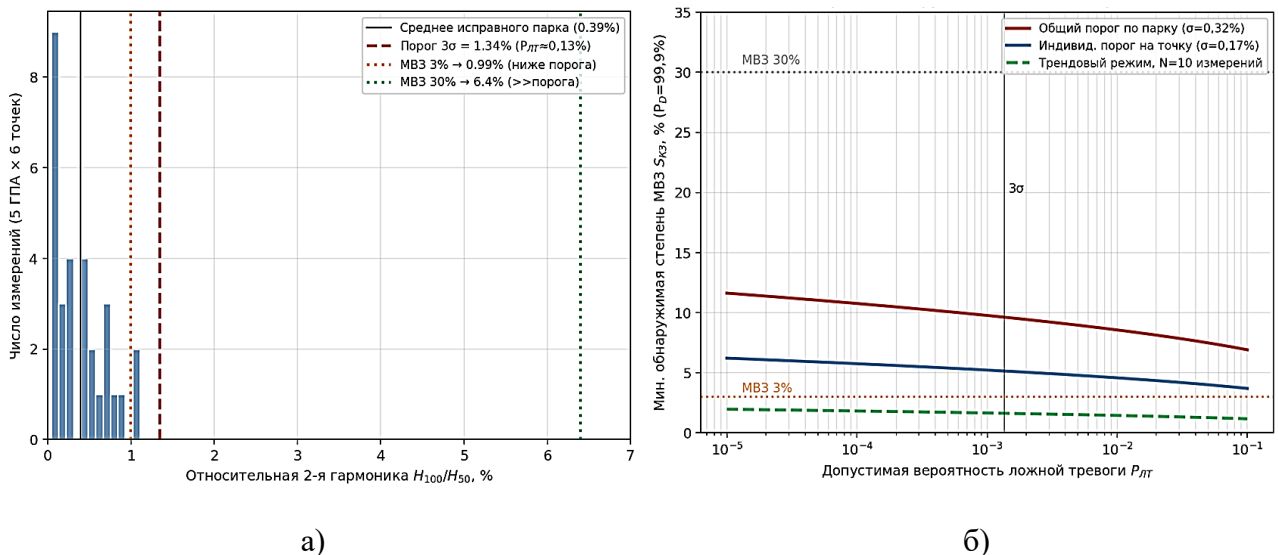


Рисунок 2.9 – Экспериментальное обоснование нижнего предела обнаружения межвитковых замыканий: а) распределение относительной второй гармоники внешнего магнитного поля по исправному парку (30 точек измерения) и положение порога 3σ ; б) зависимость минимально обнаружимой степени замыкания от допустимой вероятности ложной тревоги для трёх режимов контроля (составлено автором)

В режиме трендового мониторинга, предел обнаружения снижается до $S_{K3min} \approx 2\%$.

У приведенной выше оценки имеется ограничение, связанное положительной асимметрией распределения (критерий Шапиро–Уилка, $p=0,011$). Это связано с малым объёмом выборки и означает, что оценка σ_0 подлежит уточнению по мере накопления данных.

В то же время, межвитковое замыкание относится к саморазвивающимся дефектам, поэтому можно считать, что трендовый мониторинг обеспечивает требуемую полноту диагностирования.

2.3.2 Оценка нижнего предела обнаружения размагничивания постоянных магнитов

Аналогичным образом, порог принятия решения предела обнаружения размагничивания постоянных магнитов определяется отношением (2.26):

$$S_{\text{демаг}_{min}} = (k_{\text{ЛТ}} + k_D) \cdot \frac{\sigma_0}{\alpha_{\text{демаг}}}, \quad (2.28)$$

где $\alpha_{\text{демаг}}$ – коэффициент чувствительности.

Для четырёхполюсного генератора ($p = 2$, 1500 об/мин) оборотная частота составляет 25 Гц (0,5 относительно частоты сети), поэтому в качестве диагностического признака принято отношение H_{25}/H_{50} .

В линейном приближении амплитуда оборотной составляющей связана со степенью размагничивания соотношением:

$$H_{25}/H_{50} \approx \alpha_{\text{демаг}} \cdot S_{\text{демаг}_{min}}, \alpha_{\text{демаг}} \approx 0,15, \quad (2.29)$$

причём коэффициент слабо растёт с глубиной дефекта (0,154 при $S_{\text{демаг}} = 0,1$; 0,172 при $S_{\text{демаг}} = 0,5$).

Фон исправного состояния определён по той же выборке измерений (пять агрегатов под нагрузкой, шесть точек, $n=30$: $\mu_0=2,31\%$, $\sigma_0=1,85\%$ при едином пороге по парку и $\sigma_0=1,48\%$ при индивидуальной привязке порога к точке измерения (рисунок 2.10, а).

Подстановка экспериментальных значений в формулу (2.28) при $P_{\text{ЛТ}} = 0,13\%$ и $P_D = 99,9\%$ даёт пределы обнаружения, представленные на рисунке 2.10, б.

При едином пороге по парку $S_{\text{демаг min}} \approx 75$; при индивидуальном пороге на точку измерения $S_{\text{демаг min}} \approx 60$ %, в режиме трендового мониторинга $S_{\text{демаг min}} \approx 19$ %.

Распределение признака H_{25}/H_{50} здесь также имеет выраженную положительную асимметрию (критерий Шапиро–Уилка, $p < 0,001$). Это связано с малым объёмом выборки и означает, что оценка σ_0 подлежит уточнению по мере накопления данных.

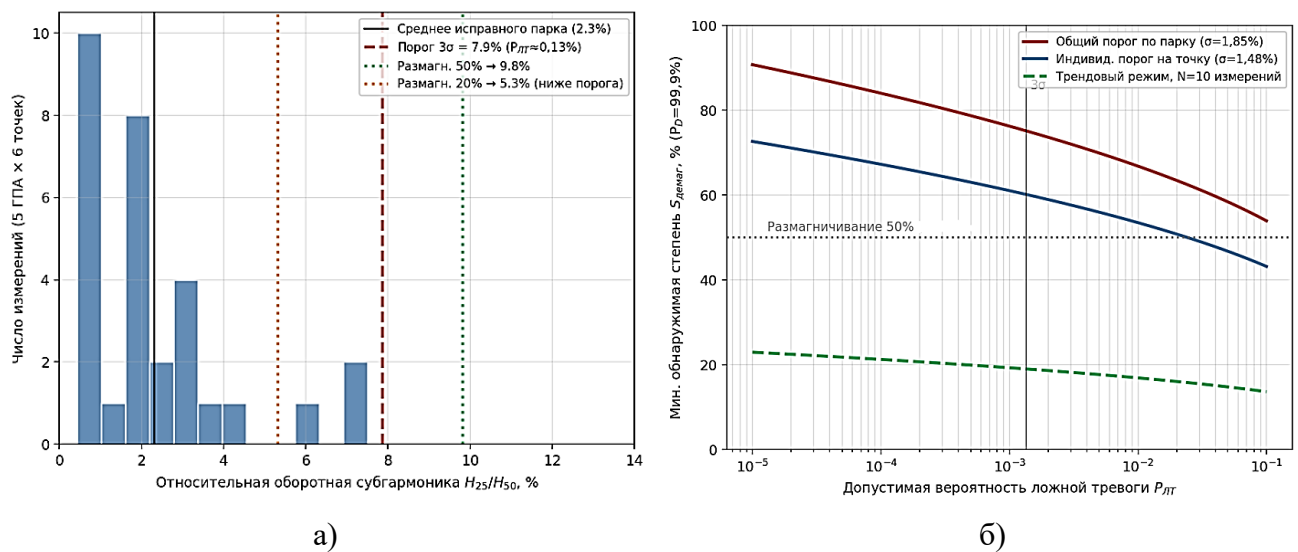


Рисунок 2.10 – Обоснование нижнего предела обнаружения размагничивания постоянных магнитов: а) распределение относительной оборотной субгармоники внешнего магнитного поля по исправному парку и положение порога 3σ ; б) зависимость минимально обнаружимой степени размагничивания от допустимой вероятности ложной тревоги для трёх режимов контроля (составлено автором)

2.4 Параметрический метод синтеза на основе суперпозиции эффектов нескольких типов повреждений

Для N одновременно действующих дефектов результирующее магнитное поле определяется по формуле (2.6).

Комбинированный дефект, включающий в себя частичное размагничивание (40 %) и эксцентриситет (30 %), приводит к значительному усилению локальной асимметрии магнитного поля. Это проявляется в нарушении симметрии распределений радиального B_r и тангенциального B_θ полей, магнитуды $|B|$ (рисунок 2.11).

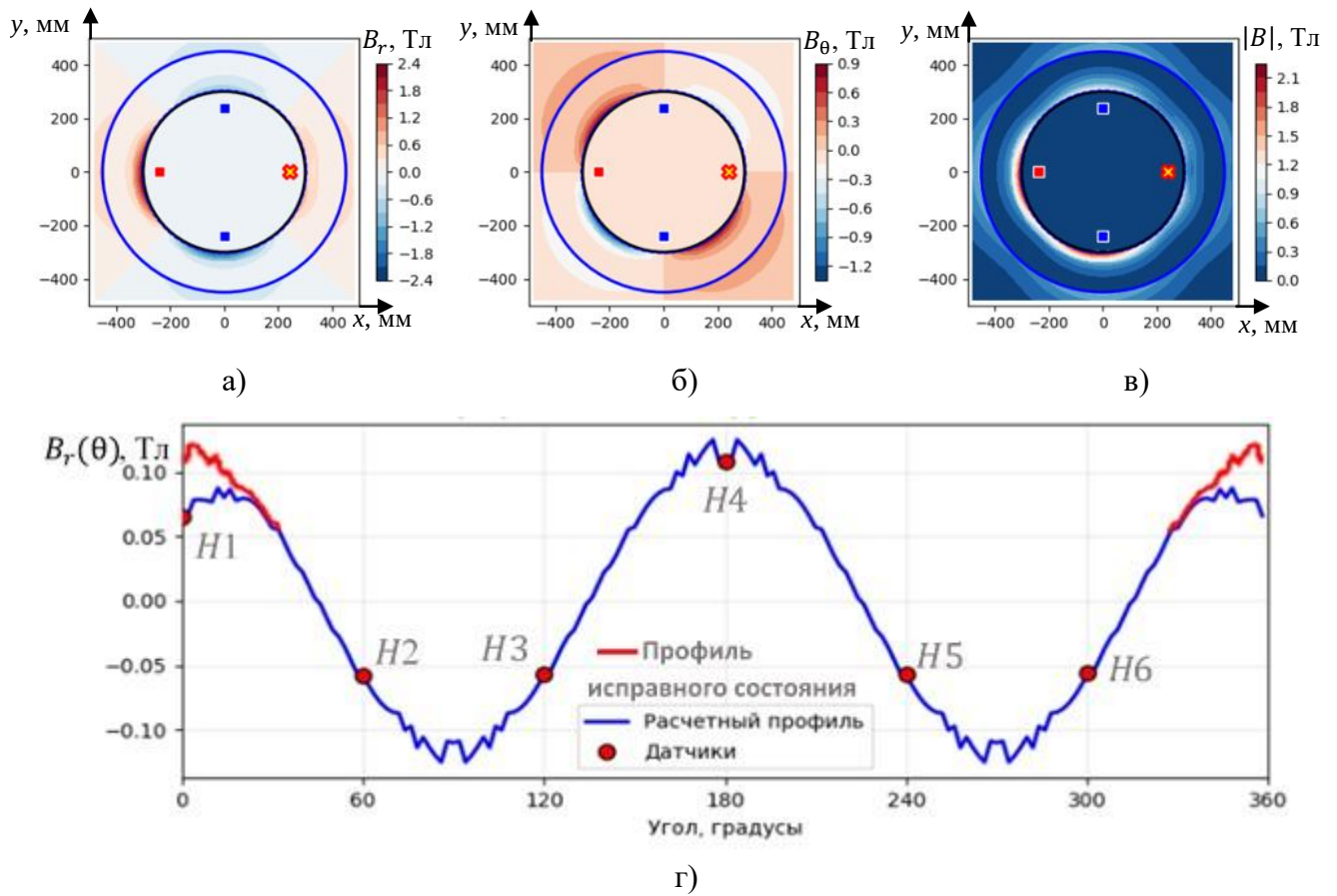


Рисунок 2.11 – Пример комбинированного дефекта (размагничивание 40% и дисбаланс 50%): а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ ; в) магнитуда $|B|$; г) профиль радиальной составляющей по окружности (составлено автором)

Комбинированный дефект, включающий межвитковое короткое замыкание в обмотке статора на 40 % и динамический дисбаланс ротора на 30 %, также приводит к резкому нарушению симметрии магнитного поля и существенным искажениям формы сигнала, как показано на рисунке 2.12.

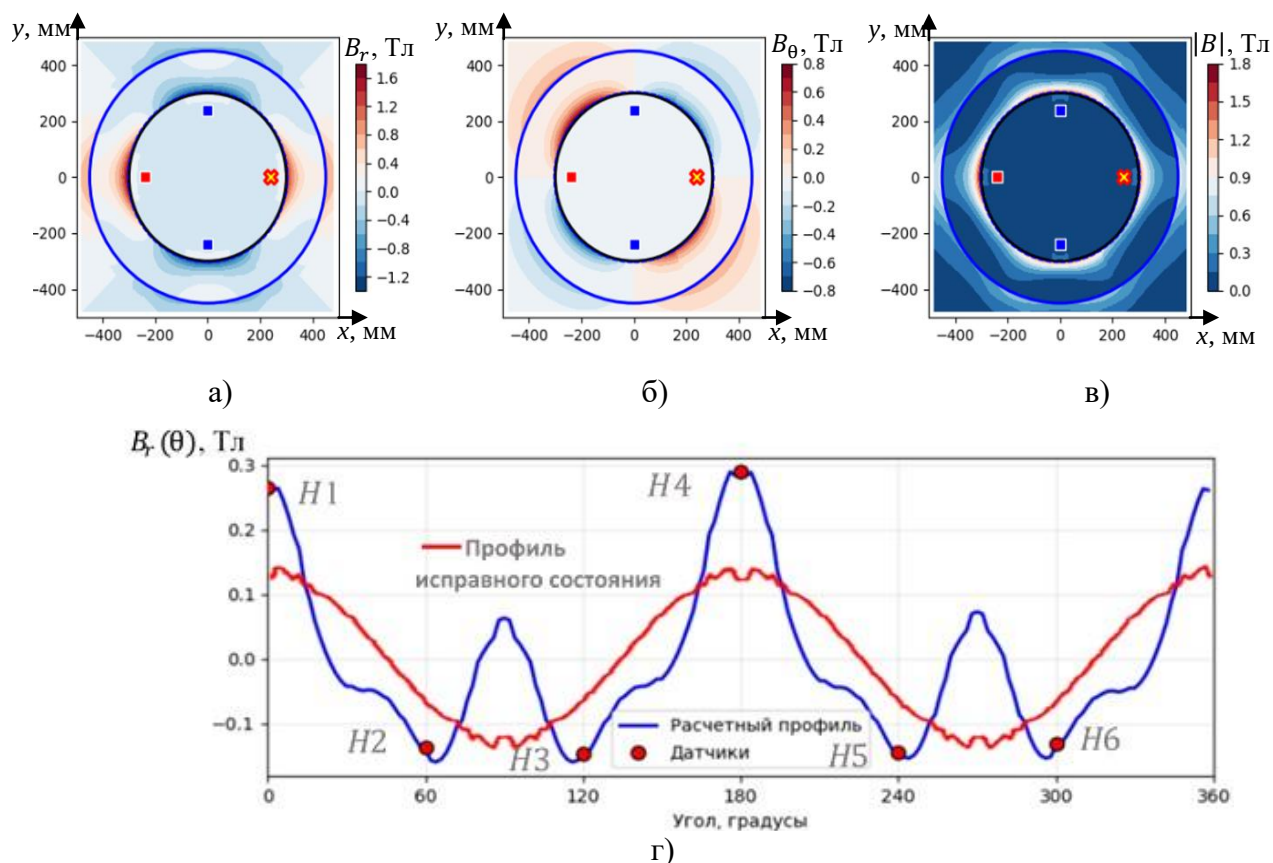


Рисунок 2.12 – Пример комбинированного дефекта (межвитковое КЗ 40% и дисбаланс ротора 30%): а) радиальная составляющая B_r ; б) тангенциальная составляющая B_θ ; в) магнитуда $|B|$; г) профиль радиальной составляющей по окружности (составлено автором)

2.5 Проверка моделей дефектов и диагностические признаки дефектов

Результаты моделирования дефектов приведены в Приложении А.

Корректность математических моделей дефектов подтверждена сопоставлением с данными из научной литературы [59, 68, 119, 123] и теоретическими расчетами (см. таблицу 2.5).

Таблица 2.5 – Количественное сравнение моделей дефектов (составлено автором)

Параметр	Расчетная модель	Литературные данные	Погрешность
<i>Размагничивание (снижение намагниченности относительно номинальной намагниченности магнита) полюса на 40%</i>			
Снижение амплитуды основной гармоники	18%	15–20%	< 15%
Субгармоники (25 Гц)	Присутствуют	Подтверждены	Качественное соответствие
Коэффициент асимметрии	0,42	0,35–0,45	< 20%
<i>Статический эксцентриситет (отличие воздушных зазоров между статором и ротором генератора в диаметрально противоположных точках друг от друга от среднего значения, равного их полусумме) 30%</i>			
Изменение амплитуды	–25%	от –20% до –30%	< 10%

Продолжение таблицы 2.5

Параметр	Расчетная модель	Литературные данные	Погрешность
Боковые полосы	50±25 Гц	$f \pm f_r$	Точное соответствие
Модуляция поля	30%	25–35%	< 15%
<i>Межвитковое короткое замыкание с замыканием 25% витков обмотки:</i>			
Амплитуда 2-й гармоники	3,8% от основной	3–5%	< 12%
Амплитуда 4-й гармоники	2,0% от основной	1,5–2,5%	< 15%
Увеличение коэффициента гармонических искажений THD	+8%	от +5% до +10%	В пределах нормы

На основе результатов моделирования сформированы характерные диагностические признаки для каждого типа дефекта (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Характерные признаки дефектов (составлено автором)

Тип дефекта	Основные признаки	Частотные компоненты
Размагничивание	Снижение амплитуды основной гармоники, локальная асимметрия	Субгармоники f/p
Эксцентриситет	Модуляция амплитуды, периодические изменения	$f \pm f_r$
Межвитковое КЗ	Четные гармоники, увеличение THD	$2f, 4f, 6f$
Дефект подшипника	Амплитудная модуляция	$f_{BPF1}, f_{BPF0}, f_{BSF}$
Дисбаланс	Синхронная компонента	f_r

Эти признаки служат основой для разработки алгоритмов автоматической диагностики в системе технического состояния СГПМ.

2.6 Оптимальное размещение датчиков Холла для измерения внешнего магнитного поля

2.6.1 Определение областей максимальных изменений магнитной индукции

В разработанной модели (рисунок 2.1) реализован функционал симулятора и блока проверки, обеспечивающий расчёт внутреннего поля $B(x,y)$ и внешнего поля H_{ext} .

Для моделирования датчиков Холла используется система виртуальных датчиков. Диагностика состояния генератора осуществляется на основе анализа распределения B и H в этих точках.

Разность магнитной индукции по окружности корпуса генератора рассчитывается по формуле (2.30):

$$\Delta B(\theta_i) = B_{max}(\theta_i) - B_{min}(\theta_i), \quad (2.30)$$

где θ_i – угловая координата датчика, рад.

Области, где наблюдаются наибольшие значения ΔB , указывают на наиболее чувствительные к дефектам зоны.

2.6.2 Коэффициент асимметрии внешнего магнитного поля

Основным диагностическим признаком является пространственная асимметрия магнитного поля, определяемая выражением (2.31):

$$K_{\text{асим}} = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{ср}}}, \quad (2.31)$$

где $B_{\text{max}}, B_{\text{min}}$ – соответственно максимальное и минимальное значения поля среди всех датчиков, А/м; $B_{\text{ср}}$ – среднее значение, А/м.

Как показали модельные расчёты, даже при сокращении числа датчиков с 6 до 3–4, уровень асимметрии остаётся выше 0,6 для дефектных состояний, что делает возможным экономичную реализацию системы.

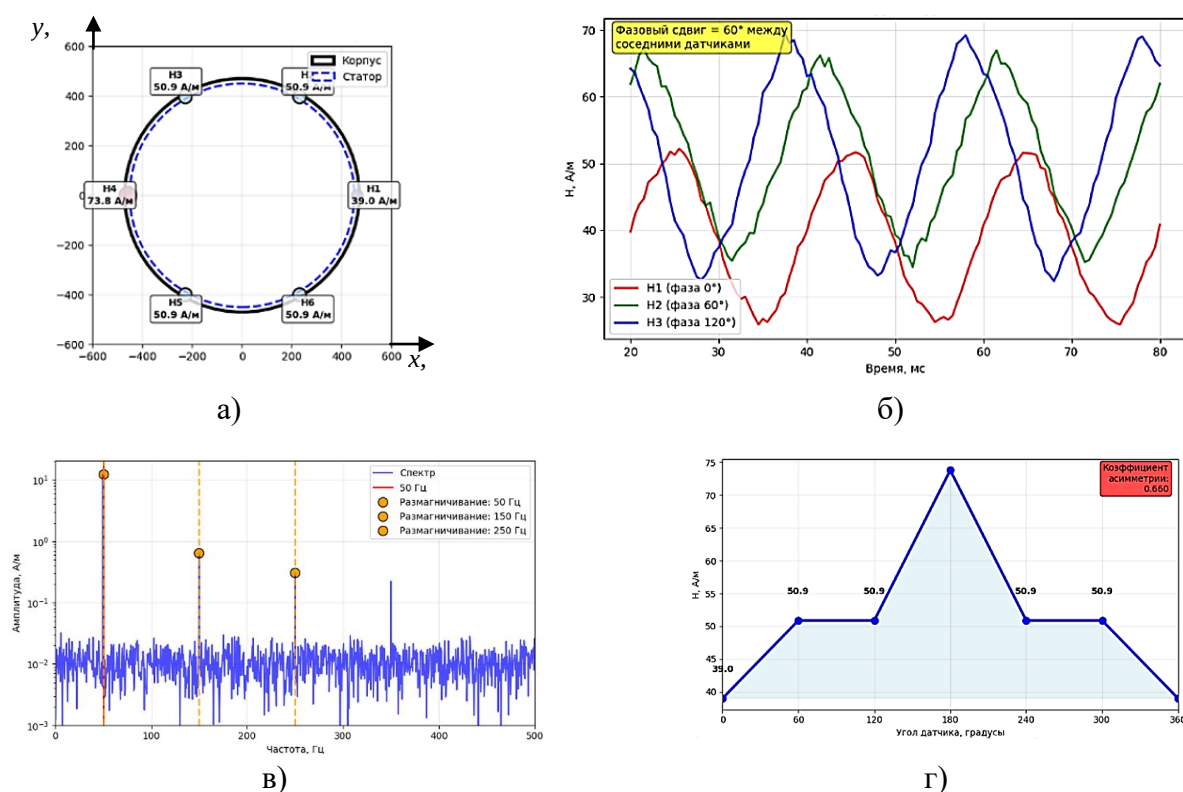


Рисунок 2.13 – Диагностические признаки, полученные на основе анализа внешнего магнитного поля на примере моделирования размагничивания постоянных магнитов одного полюса на 40 %: а) положение датчиков Холла; б) фазовые сдвиги датчиков; в) спектральный анализ с выделением дефектов; г) пространственная асимметрия поля (составлено автором)

2.7 Выводы по главе 2

1. Разработана и реализована многоуровневая архитектура цифровой тени синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ), обеспечивающая согласованное моделирование электромагнитных процессов во внутренней и внешней зонах машины с учётом экранирующих свойств корпуса.

2. Предложен комплексный подход к оценке работоспособности компонентов СГПМ в составе ГПЭА на основе анализа пространственно-временных характеристик внешнего магнитного поля, позволяющий проводить раннюю диагностику локальных повреждений магнитной системы. Выявлены пределы чувствительности магнитного диагностического канала к различным типам отказов. Показано, что к таким видам дефектов, как эксцентриситет, дисбаланс ротора и дефекты подшипников, предложенный подход не чувствителен. Данные типы дефектов требуют дополнительных методов диагностики, в частности, вибродиагностики и диагностики по спектру выходного фазного напряжения.

3. Разработан параметрический метод синтеза дефектных сценариев электромагнитного состояния СГПМ на основе суперпозиции эффектов нескольких типов повреждений. Метод обеспечивает возможность диагностики сложных сочетаний дефектов.

4. Разработана модель оптимального размещения датчиков Холла на корпусе СГПМ, обеспечивающая снижение их количества без потери полноты диагностирования. Диагностический признак – коэффициент асимметрии поля – позволяет количественно оценивать эффективность выбранной конфигурации датчиков и адаптировать её под различные типы дефектов.

5. Разработанная методика и реализованный программный модуль обеспечивают основу для построения интеллектуальной системы мониторинга технического состояния генераторов на основе анализа внешнего магнитного поля.

6. Полученные результаты будут использованы в следующей главе для построения интегрированной системы технического диагностирования ГПЭА и

обоснования алгоритмов принятия решений на основе многоканальных диагностических признаков.

ГЛАВА 3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГПЭА С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА С ИНТЕГРАЦИЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

3.1 Концепция мультифизической диагностики ГПЭА

В главе 1 было показано, что индивидуальные диагностические методы (вибродиагностика, диагностика на основе анализа электрических параметров), несмотря на широкое применение, имеют свои ограничения.

В главе 2 продемонстрировано, что перспективное направление интеллектуальной системы мониторинга технического состояния генераторов на основе анализа внешнего магнитного поля также имеет свои ограничения, в частности, затруднена диагностика эксцентриситета, дисбаланса ротора и дефектов подшипников.

Основные причины недостаточной эффективности индивидуальных подходов заключаются в следующем:

- неполнота диагностических признаков, доступных при анализе только одного физического сигнала;
- неоднозначность интерпретации спектральных проявлений дефектов при их проявлении в разных физических средах;
- сложность раннего обнаружения комбинированных дефектов, признаки которых одновременно проявляются в разных каналах, но с низкой амплитудой.

Анализ научной литературы показывает, что в настоящее время активно развивается направление интегрированной диагностики с использованием корреляционных методов, нейросетевых моделей и ансамблевых алгоритмов машинного обучения [67, 91, 129]. Однако до сих пор отсутствуют завершённые решения, реализующие мультифизический подход применительно к ГПЭА, что и определяет актуальность предложенной концепции.

Синергетический эффект можно определить, как увеличение эффективности системы за счет объединения нескольких подсистем, когда результат совместного

их применения превышает сумму результатов применения каждой подсистемы по отдельности [21, 42, 43].

То есть комплексное использование различных методов за счет синергетического эффекта позволяет получить более полную и точную информацию о состоянии ГПЭА, что способствует своевременному выявлению дефектов и предотвращению аварий [22, 28].

Цель данной главы – разработка метода интеграции разнородных диагностических признаков ГПЭА для обеспечения комплексного подхода к диагностике. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модель интеграции диагностических признаков ГПЭА, в дополнение к спектрам внешнего магнитного поля – в спектрах вибрации и фазного напряжения, базирующуюся на современных алгоритмах обработки данных и машинного обучения.
2. Представить архитектуру системы, алгоритмы обработки диагностических сигналов, особенности программной реализации, а также результаты, подтверждающие эффективность предложенного подхода.
3. Исследовать кросс-корреляционные зависимости диагностических признаков ГПЭА в целях повышения достоверности технического диагностирования.

3.2 Основные диагностические признаки

Преобразование Фурье для вибросигналов определяется выражением (3.1):

$$S_v(f) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad (3.1)$$

где $S_v(f)$ – спектральная плотность вибрационного сигнала, $g^2/\text{Гц}$; A_n – амплитуды гармоник, м/с ; f_n – частоты гармонических составляющих, Гц ; φ_n – фазовые сдвиги, рад .

Спектральный состав напряжения выражается через быстрое преобразование Фурье (БПФ) по формуле (3.2):

$$S_u(f) = \sum_{n=1}^N U_n e^{-j2\pi f_n t}, \quad (3.2)$$

где U_n – амплитуды гармоник фазного напряжения, В; f_n – диагностические частоты, Гц.

Магнитный поток в воздушном зазоре определяется уравнением (3.3):

$$B(t) = B_0 + \sum_{n=1}^N B_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n), \quad (3.3)$$

где B_0 – среднее значение индукции, Тл; B_n – амплитуды гармонических составляющих, Тл; θ_n – фазовые сдвиги, рад.

В таблице 3.1 представлены диагностические признаки для ГПЭА, Значения частотных признаков подобраны с учётом особенностей агрегата *Caterpillar G3520C*, работающего при частоте вращения 1500 об/мин.

Таблица 3.1 – Мультифизические диагностические признаки для ГПЭА (составлено автором)

Метод / Канал	Вид неисправности	Частотный признак / Формула	Условие в спектре	Дополнительные пояснения
Вибродиагностика	Дефект наружной обоймы подшипника (BPFO)	$f_{BPFO} = \frac{nf_r}{2} \times \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha\right)$	Пик вблизи $f_{BPFO} \pm 2$ Гц	Сколы и задиры на наружной обойме подшипника
Вибродиагностика	Дефект внутренней обоймы подшипника (BPFI)	$f_{BPFI} = \frac{nf_r}{2} \times \left(1 + \frac{d}{D} \cos\alpha\right)$	Пик вблизи $f_{BPFI} \pm 2$ Гц	Сколы и задиры на внутренней обойме подшипника
Вибродиагностика	Дефект тел качения подшипника (BSF)	$f_{BSF} = \frac{Df_r}{2d} \times \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos\alpha\right)^2\right)$	Пик вблизи $f_{BSF} \pm 2$ Гц	Трещины или сколы на теле качения подшипника
Вибродиагностика	Дефект сепаратор подшипника (FTF)	$f_{FTF} = \frac{f_r}{2} \times \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha\right)$	Пик вблизи $f_{FTF} \pm 2$ Гц	Повреждение, перекося сепаратора подшипника
Вибродиагностика	Дисбаланс ротора	$f \approx f_r$	Пик на 25–50 Гц (25 Гц для G3520C)	Нарушение балансировки ротора
Вибродиагностика	Эксцентриситет	$f \in [30 \dots 45]$ Гц	Широкополосные пики ($\pm 5 \dots 10$ Гц)	Нарушение центровки, неровности
Вибродиагностика	Резонанс механический	$f \gg f_r$ Гц	Высокочастотные пики (>100 Гц)	Собственные моды конструкции
Спектр напряжения	Нелинейность / асимметрия обмоток	$f = 100 \pm 3$ Гц	Пик вблизи 100 Гц	Увеличение амплитуды 2–ой гармоники
Спектр напряжения	Глубокие искажения формы напряжения	$f = 150 \pm 3$ Гц	Пик вблизи 150 Гц	Увеличение амплитуды 3–й гармоники
Спектр напряжения	Межвитковое замыкание	$f = 3kfs, k = 1, 2, \dots$ ($fs = 50$ Гц)	Дополнительные пики на частотах 150, 300 ... Гц	Межвитковое замыкание обмоток статора
Магнитный спектр	Основной поток	$f = 50 \pm 1$ Гц	Амплитуда нормальна или велика	Работа системы возбуждения от постоянных магнитов / перегрузка
Магнитный спектр	Магнитный эксцентриситет	$f < 45$ Гц	Низкочастотные пики	Неровный зазор между ротором и статором

Продолжение таблицы 3.1

Метод / Канал	Вид неисправности	Частотный признак / Формула	Условие в спектре	Дополнительные пояснения
Магнитный спектр	Размагничивание	Пики около $(1 \pm k/p)fs$	Падение амплитуды основной гармоники, рост амплитуды субгармоник	Ослабление магнитного поля постоянных магнитов
Все каналы	Комбинированные неисправности	Признаки в двух и более каналах	Наличие признаков в спектрах вибрации, напряжения и магнитного поля	Серьезная степень развития дефектов

3.3 Цифровая тень ГПЭА для диагностики неисправностей на основе мультифизического подхода

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 с СГПМ [139].

Реализация цифровой тени опирается на теоретические положения, изложенные в главе 2 и подразделе 3.2 настоящей главы, а также на результаты экспериментальной апробации с использованием как эталонных, так и реальных данных.

Цифровая тень разработана в виде программного модуля на языке *Python* [30, 53].

Используемые программные библиотеки и средства визуализированы на рисунке 3.1. Системная архитектура представлена на рисунке 3.2.

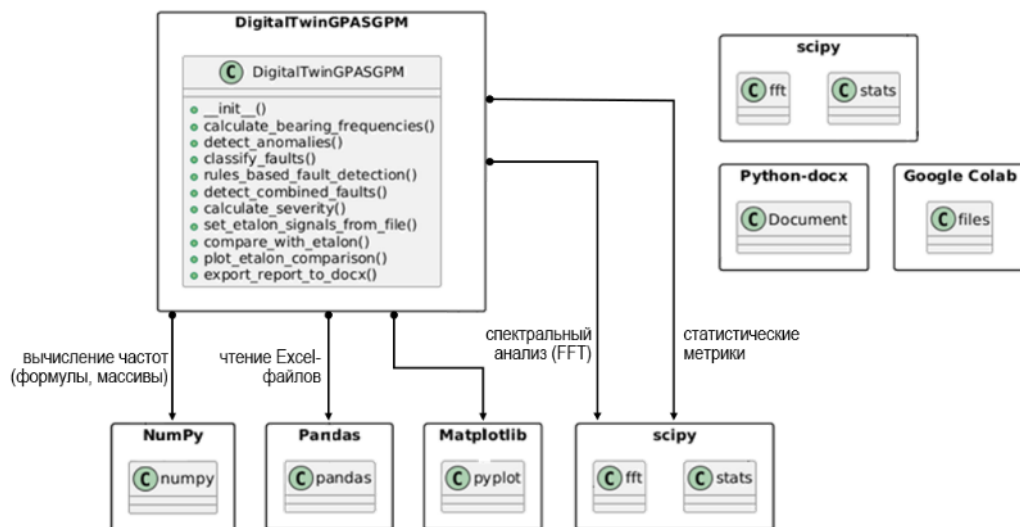


Рисунок 3.1 – Библиотеки, используемые в цифровой тени (составлено автором)

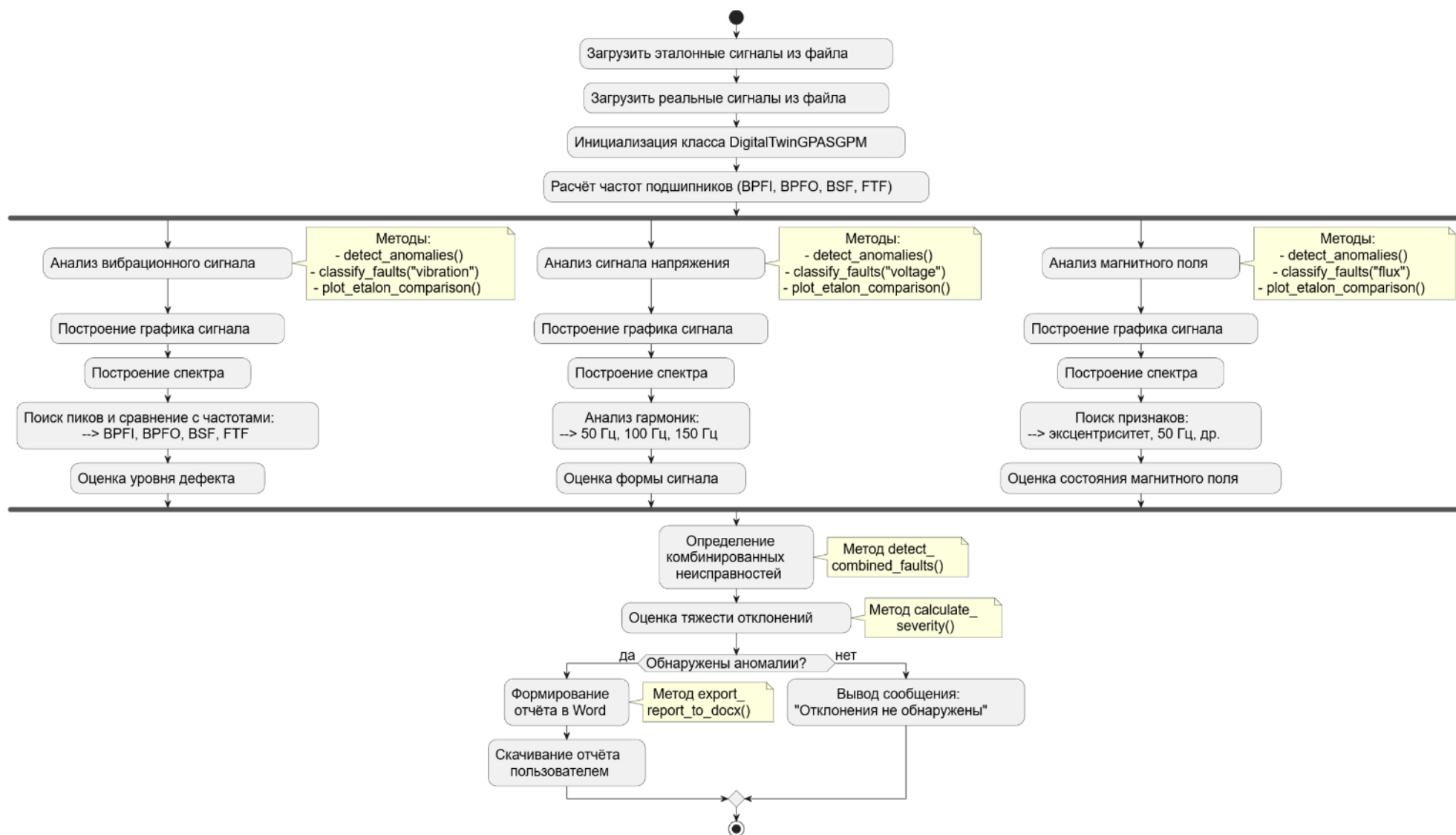


Рисунок 3.2 – UML–диаграмма деятельности цифровой тени для диагностики неисправностей ГПЭА (составлено автором)

3.4 Методика определения неисправностей ГПЭА с помощью цифровой тени

Схема системы комплексной диагностики ГПЭА, реализующая мультифизический подход к интеграции диагностических признаков может быть представлена в виде, показанном на рисунке 3.3.

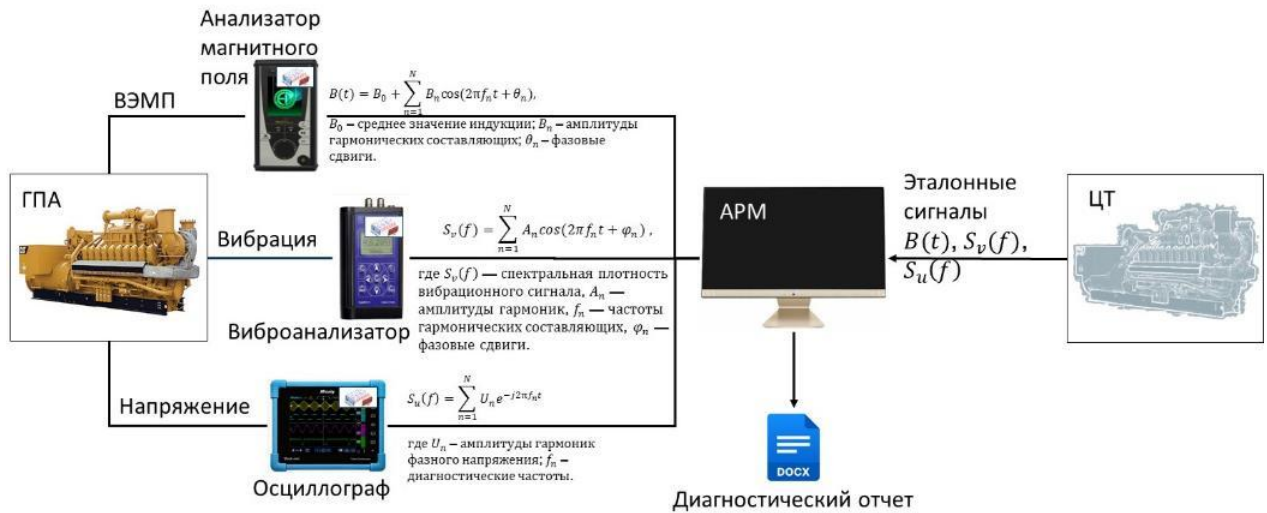


Рисунок 3.3 – Схема системы комплексной диагностики ГПЭА, реализующая мультифизический подход к интеграции диагностических признаков: АРМ – автоматизированное рабочее место; ВЭМП – внешнее электромагнитное поле; ЦТ – цифровая тень (составлено автором)

Данная система обеспечивает синергетический эффект от одновременного использования нескольких методов, позволяет повысить точность постановки диагноза ГПЭА, что дает возможность улучшить качество рекомендаций и указаний по проведению его ремонта и повысить надежность [42, 22].

Для наглядного представления взаимодействия персонала и цифровой тени разработана блок-схема последовательности действий, представленная на рисунке 3.4.

1-й этап: подготовка данных

Сбор эталонных данных производится персоналом в условиях нормальной работы агрегата (сохраняются сигналы вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля). Используется частота дискретизации 1000 Гц и длительность записи 1 секунда. Персонал преобразует полученные данные в файлы формата «*.xls» и загружает их в цифровую тень.



Рисунок 3.4 – Блок-схема последовательности взаимодействия персонала и цифровой тени
(составлено автором)

На рисунке 3.5 представлена схема замеров фазного напряжения. На рисунке 3.6 представлены точки замеров вибрации, на рисунке 2.3, б было представлено расположение точек замеров внешнего магнитного поля с помощью датчиков Холла.

Сбор реальных данных производится в текущих условиях эксплуатации с теми же параметрами (1000 Гц, 1 секунда). Данные по всем трем информационным каналам (фазное напряжение, внешнее магнитное поле и вибрация) собираются в тех же точках измерения.

Преобразование данных: эталонные и реальные сигналы в виде xls файлов загружаются в цифровую тень и преобразуются в массивы для дальнейшей обработки.

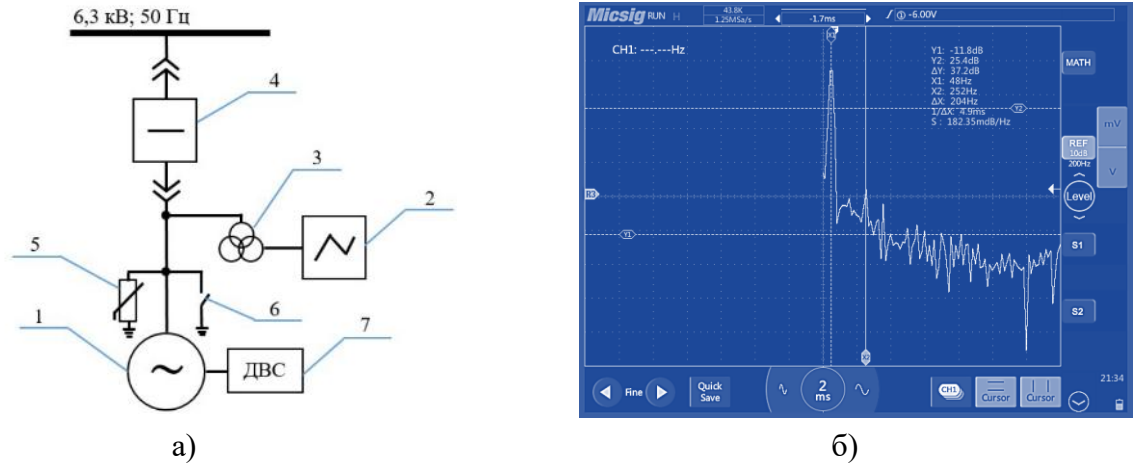


Рисунок 3.5 – Схема замеров фазного напряжения: а) схема подключения осциллографа; б) результаты спектрального анализа выходного фазного напряжения ГПЭА; 1 – генератор; 2 – осциллограф переносной; 3 – трансформатор напряжения; 4 – выключатель 6 кВ; 5 – ограничитель перенапряжений, 6 – заземляющий нож; 7 – двигатель внутреннего сгорания (составлено автором)

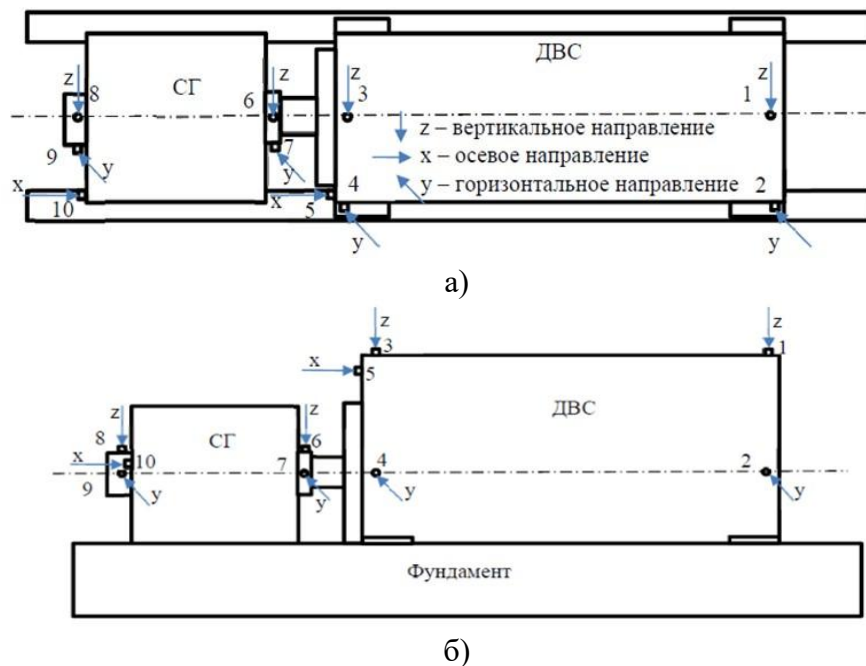


Рисунок 3.6 – Расположение точек измерений вибрации ГПЭА: а) вид сверху; б) вид сбоку (составлено автором)

2-ой этап: инициализация цифровой тени

Настройка параметров: устанавливается частота дискретизации (1000 Гц) и частота вращения ротора (например, 25 Гц) в соответствии с реальным оборудованием (например, G3520C производства фирмы *Caterpillar*).

Расчет характерных частот типичных дефектов (*BPFI*, *BPFO*, *BSF* и *FTF*) производится в программе на основе геометрических параметров подшипников. Эти значения будут использоваться для анализа вибрационных спектров.

3–й этап: формирование оптимальных наборов сигналов

Комбинации сигналов загружаются в цифровую тень персоналом для сравнения с эталонными данными.

4–й этап: спектральный анализ сигналов и обнаружение аномалий.

Цифровая тень автоматически проводит спектральный анализ сигналов, используя быстрое преобразование Фурье.

5–й этап: формирование диагностического отчета

Цифровая тень автоматически генерирует диагностический отчет, включающий выявленные аномалии, их тяжесть, спектральные графики и характерные диагностические частоты. Пример диагностического отчета приведен в Приложении Б.

6–й этап: интерпретация результатов и рекомендации

Персонал проводит анализ сформированного отчета и формирует рекомендации по дальнейшему техническому обслуживанию или ремонту агрегата.

3.5 Исследование кросс-корреляционных зависимостей диагностических признаков с использованием цифровой тени

3.5.1 Реализация вычисления корреляции в цифровой тени

В разработанной цифровой тени ГПЭА были сгенерированы сигналы вибрации, напряжения и магнитного потока для 11 сценариев, соответствующих различным комбинациям неисправностей (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – План эксперимента (описание сценариев) (составлено автором)

Номер сценария	Описание сценария неисправности
1	Дефект наружной обоймы подшипника
2	Дефект внутренней обоймы подшипника
3	Дефект тела качения подшипника
4	Дефект сепаратора подшипника
5	Магнитный дефект (размагничивание)
6	Статический эксцентриситет

Продолжение таблицы 3.2

Номер сценария	Описание сценария неисправности
7	Межвитковое замыкание обмотки статора
8	Дисбаланс ротора
9	Комбинированный дефект наружной обоймы подшипника и размагничивание постоянных магнитов
10	Комбинированный дефект тела качения подшипника и электрический дефект
11	Комбинированный дефект сепаратора подшипника, дисбаланс ротора и размагничивание постоянных магнитов

Для анализа взаимосвязи диагностических признаков используется классический коэффициент корреляции Пирсона, определяемый выражением (3.4):

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.4)$$

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

Сравнение ведётся относительно коэффициентов корреляции в исправном состоянии ρ_0 ; далее анализируются приращения $\Delta\rho = \rho - \rho_0$, где ρ – коэффициент корреляции в рассматриваемом сценарии.

Целью эксперимента является подтверждение специфических кросс-корреляционных признаков дефектов (корреляционные связи вибрации, напряжения и магнитного потока) на синтезированных реалистичных сценариях цифровой тени ГПЭА.

План эксперимента (таблица 3.2) включал поэтапное моделирование сценариев: от однокомпонентных дефектов до их комбинированных сочетаний, что позволило выявить как индивидуальные, так и наложенные корреляционные признаки. Для обеспечения корректности анализа была проверена устойчивость признаков при добавлении шума и вариации амплитуд, что подтверждает робастность диагностических метрик к шумам и позволяет надёжно интерпретировать результаты.

3.5.2 Примеры корреляционных признаков

Как отмечено ранее, сравнение ведётся относительно коэффициентов корреляции в исправном состоянии ρ_0 по формуле (3.5):

$$\Delta\rho_{X,Y} = \rho_{X,Y} - \rho_{X,Y}^0, \Delta\rho_{max} = \max\{|\Delta\rho_{Vib,Volt}|, |\Delta\rho_{Vib,Flux}|, |\Delta\rho_{Volt,Flux}|\}, \quad (3.5)$$

где $\rho_{X,Y}^{(0)}$ – коэффициент корреляции пары каналов X, Y в исправном состоянии; $\rho_{X,Y}$ – 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.

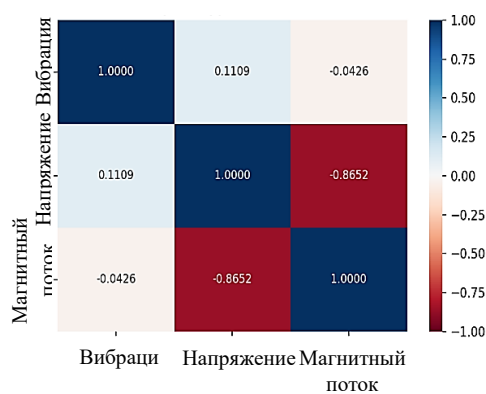
На рисунке 3.7 показаны характерные тепловые карты корреляций для исправного состояния и экспериментов с дефектами.

Отрицательная корреляция между напряжением и магнитным потоком на корреляционной матрице исправного оборудования на рисунке 3.7, а объясняется сдвигом по фазе между сигналами. В синхронном генераторе вектор индуцированной ЭДС сдвинут относительно вектора внутреннего магнитного потока на 90° . Внешнее поле, измеряемое датчиком Холла, синфазно с током статора, который отстаёт от напряжения на угол нагрузки (30° – 50°).

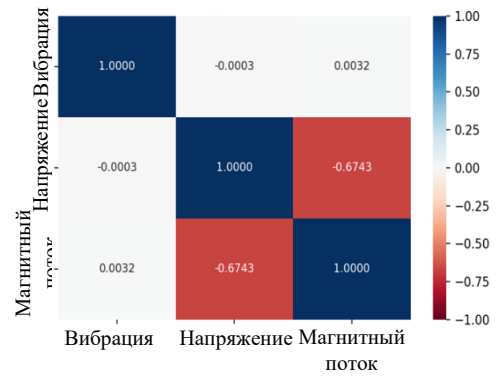
Анализ рисунка 3.7 показывает, что значение приращения $\Delta\rho$ является самостоятельным диагностическим признаком:

- при электрических неисправностях заметно изменяется $\Delta\rho_{Volt,Flux}$; при этом $\Delta\rho_{Vib,Volt}$ и $\Delta\rho_{Vib,Flux}$ изменяются незначительно (рисунок 3.7, б);
- при механических неисправностях изменяются $\Delta\rho_{Vib,Volt}$ и $\Delta\rho_{Volt,Flux}$ (рисунок 3.7, в);
- при неисправностях магнитной системы $\rho_{Volt,Flux}$ смещается к нулю, при этом согласованность $\Delta\rho_{Vib,Volt}$ и $\Delta\rho_{Vib,Flux}$ существенно не изменяется (рисунок 3.7, г);

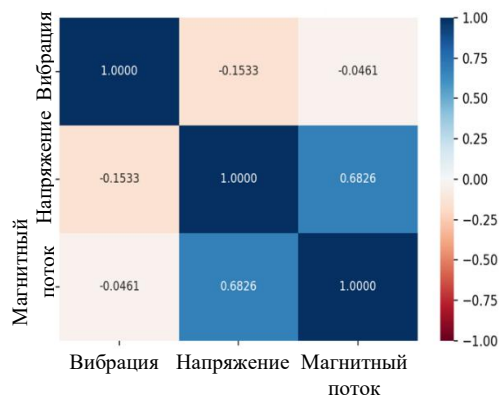
■ при комбинированных дефектах одновременно изменяются несколько коэффициентов корреляции (рисунок 3.7, д).



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.7 – Корреляционные матрицы мультифизических сигналов: а) исправное состояние; б) фазовая асимметрия; в) дефект наружной обоймы подшипника; г) размагничивание постоянных магнитов; д) комбинированный дефект наружной обоймы подшипника и размагничивание постоянных магнитов (составлено автором)

В таблицу 3.4 сведены результаты диагностики по сценариям.

Таблица 3.4 – Сводка результатов диагностики по сценариям (корреляции и характерные признаки) (составлено автором)

Сценарий	Приращения коэффициента корреляции Пирсона $\Delta\rho$ относительно исправного состояния			
	$\Delta\rho_{Vib,Volt}$	$\Delta\rho_{Vib,Flux}$	$\Delta\rho_{Volt,Flux}$	$\Delta\rho_{max}$
Дефект наружной обоймы подшипника	-0,2642	-0,0035	-0,1826	0,2642
Дефект внутренней обоймы подшипника	-0,0138	-0,0246	-0,6275	0,6275
Дефект тела качения подшипника	-0,1105	0,0425	-0,3668	0,3668
Дефект сепаратора подшипника	-0,111	0,0432	-1,7522	1,7522
Магнитный дефект (размагничивание)	-0,1104	0,0430	-0,9023	0,9023
Статический эксцентриситет	0,1934	-0,5355	-1,6307	1,6307
Фазовая асимметрия	-0,1112	0,0458	-1,5395	1,5395
Дисбаланс ротора	0,1127	0,0492	-0,5184	0,5184
Комбинированный дефект наружной обоймы подшипника и размагничивание постоянных магнитов	-0,1105	0,0426	-0,9011	0,9011
Комбинированный дефект тела качения подшипника и электрический дефект	-0,1107	0,0397	-0,3402	0,3402
Комбинированный дефект сепаратора подшипника, дисбаланс ротора и размагничивание постоянных магнитов	0,0607	0,0870	-0,9095	0,9095

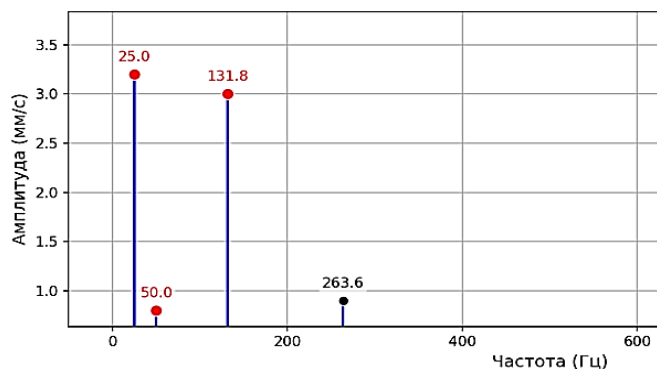
3.5.3 Корреляционная интерпретация спектральных характеристик

На рисунке 3.8 приведены примеры спектральных характеристик дефектов.

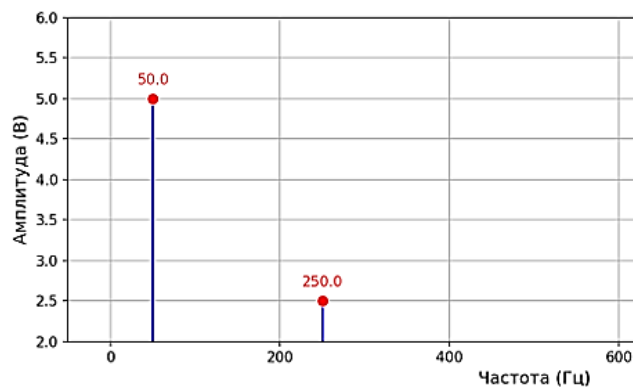
При механических дефектах спектры вибрации характеризуются выраженными компонентами на частоте вращения (25 Гц), а также на частотах дефектов подшипников (рисунок 3.8, а). Компоненты на частотах дефектов подшипников выявляются и в магнитном потоке, тогда как спектр напряжения практически сохраняет характер исправного состояния.

При наличии электрических дефектов в спектрах напряжения и магнитного поля присутствуют как сетевые гармоники 100, 150 Гц так, и селективные составляющие, в частности, на частоте 250 Гц (рисунок 3.8, б). При этом заметна величина $|\Delta\rho_{Volt,Flux}|$ при малых значениях $\Delta\rho_{Vib,Volt}$, $\Delta\rho_{Vib,Flux}$.

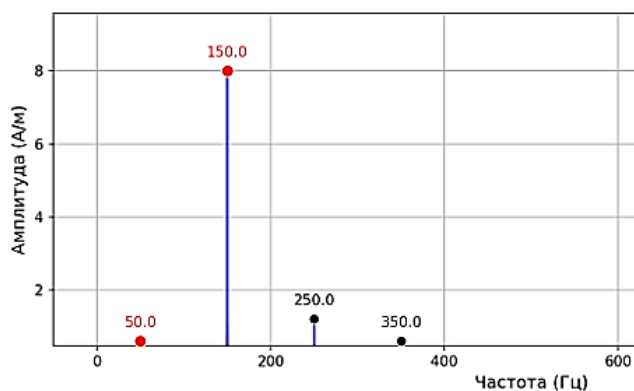
При размагничивании в спектре магнитного сигнала снижается первая гармоника на частоте 50 Гц и одновременно растут амплитуды нечётных гармоник (150, 250, 350 Гц) (рисунок 3.8, в). Корреляция вибрации с напряжением почти не изменяется: $\Delta\rho_{Vib,Volt} \approx 0$. При этом $\rho_{Volt,Flux}$ смещается к нулю.



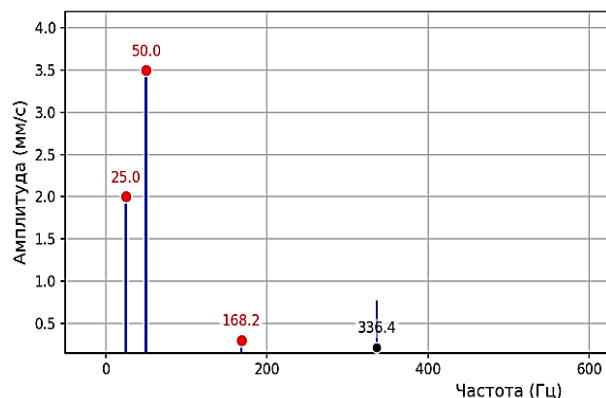
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – 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 (составлено автором)

При наличии комбинированных дефектов наблюдается одновременное изменение нескольких $|\Delta\rho|$ и повышенных значениях $\Delta\rho_{max}$. При этом в спектре вибрации присутствуют гармоники, связанные с механическими неисправностями, а в спектрах напряжения и магнитного потока – гармоники, связанные с электрическими и магнитными неисправностями (рисунок 3.8, г).

Таким образом, совместный учёт спектров вибрации, напряжения магнитного потока с коэффициентами корреляции обеспечивает достаточно точную идентификацию неисправностей ГПЭА, что подтверждено и эмпирическими исследованиями, рассмотренными в главе 5.

3.6 Выводы по главе 3

1. Разработан мультифизический подход к диагностике ГПЭА, основанный на интеграции данных из трёх физических каналов: вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля. Обоснована необходимость комплексной обработки сигналов различной физической природы для повышения точности и надёжности выявления неисправностей.

2. Реализована цифровая тень ГПЭА, обеспечивающая автоматизированную обработку сигналов по трём каналам, выявление отклонений и формирование диагностического отчёта.

3. Экспериментальная апробация цифровой тени на реальных данных подтвердила высокую чувствительность к выявлению как единичных, так и комбинированных неисправностей. Установлено, что мультифизический подход обеспечивает раннюю диагностику и повышение достоверности принимаемых решений по техническому обслуживанию. Результаты эмпирических исследований будут представлены в главе 5.

4. Впервые продемонстрирована возможность надёжной классификации типов дефектов (механических, электрических, комбинированных) в ГПЭА с синхронным генератором на постоянных магнитах на основе анализа коэффициентов корреляции между вибрацией, напряжением и магнитным потоком.

5. Показано, что применение кросс-корреляционного подхода в цифровой тени позволяет эффективно интегрировать данные от разнородных датчиков (вибрационных, электрических, магнитных) в единую систему диагностики. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность к комплексным отказам. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования кросс-корреляционного анализа как ключевого элемента в архитектуре цифровых теней и двойников объектов энергетики.

ГЛАВА 4 МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ГПЭА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ

4.1 Применение метода анализа иерархий для оценки надежности элементов ГПЭА

Применим метод анализа иерархий к определению весовых коэффициентов надежности ГПЭА на основе весовых показателей их элементов.

Для решения нашей задачи единичные показатели надежности будут выступать в качестве критериев.

ГОСТ Р 53176–2008 [9] устанавливает следующие показатели надежности ГПЭА:

- T_0 – средняя наработка на отказ;
- T_b – среднее время восстановления работоспособного состояния;
- $K_{т.и}$ – коэффициент технического использования;
- $R_{к.р.}$ – назначенный ресурс до капитального ремонта;
- $S_{э0,9}$ – 90%–ный срок сохраняемости в эксплуатации.

Выполним декомпозицию ГПЭА на основные элементы (функциональные узлы $\Phi У_1, \Phi У_2, \Phi У_3, \dots \Phi У_n$), обеспечивающие его работоспособность.

Синхронный генератор ГПЭА:

- $\Phi У_1$ – сердечник статора (ССГ);
- $\Phi У_2$ – обмотка статора (ОСГ);
- $\Phi У_3$ – ротор (РГ);
- $\Phi У_4$ – возбудитель на постоянных магнитах (ВГ);
- $\Phi У_5$ – подшипники генератора (ПГ).

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) ГПЭА:

- $\Phi У_6$ – коленчатый вал (КВ);
- $\Phi У_7$ – турбокомпрессор (ТК);
- $\Phi У_8$ – система зажигания (СЗ);
- $\Phi У_9$ – система охлаждения (СО);
- $\Phi У_{10}$ – механизм газораспределения (МГ);
- $\Phi У_{11}$ – система смазки (СС);
- $\Phi У_{12}$ – топливная система (ТС);

- ФУ13 – кривошипно-шатунный механизм (КШМ);
- ФУ14 – цилиндро-поршневая группа (ЦПГ);
- ФУ15 – регулятор частоты вращения (РЧВ);
- ФУ16 – подшипники скольжения ДВС (ПД).

Тогда иерархическую структуру МАИ можно представить в следующем виде (рисунок 4.1):

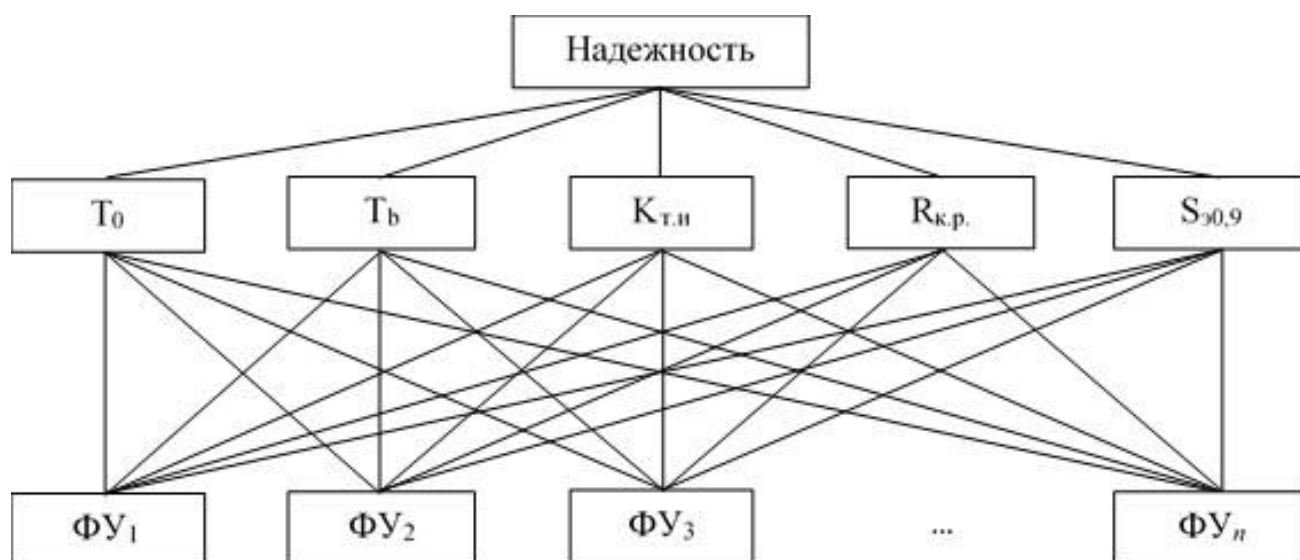


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура определения весовых коэффициентов целевой функции:
 $\Phi Y_1, \Phi Y_2, \Phi Y_3, \dots \Phi Y_n$ – функциональные элементы (составлено автором)

Оценим важность критериев в соответствии со шкалой Саати [47, 124].

С точки зрения надежности ГПЭА после декомпозиции можно рассматривать как систему с последовательным соединением элементов и применить модель «слабейшего звена». Для нормального функционирования такой системы все её элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы [36]. Последовательно соединенными элементами структурных схем надежности являются элементы декомпозиции.

Результирующая вероятность безотказной работы генератора и ДВС P и их элементов P_i в период эксплуатации будет определяться формулами (4.1 – 4.2) [36]:

$$P = e^{-\lambda \sum \alpha_i t}, \quad (4.1)$$

$$P_i = e^{-\lambda \alpha_i t}, \quad (4.2)$$

где α_i – весовой коэффициент i -го элемента; λ – интенсивность отказов, полученная опытным путем или на основании статистических данных об отказах, г.^{-1} ; t – рассматриваемый промежуток времени, г.

Рассматривается период нормальной эксплуатации, когда $\lambda = \text{const}$, что соответствует экспоненциальному распределению отказов. Для проведения расчетного исследования приняты среднестатистические данные об отказах рассматриваемых машин [25]. Для расчета надежности генератора принята удельная повреждаемость $\lambda_r = 0,079 \text{ г.}^{-1}$; для расчета надежности ДВС $\lambda_{\text{ДВС}} = 1,54 \text{ г.}^{-1}$. Соответствующие графики изменения вероятности безотказной работы синхронного генератора и двигателя внутреннего сгорания представлены на рисунке 4.2.

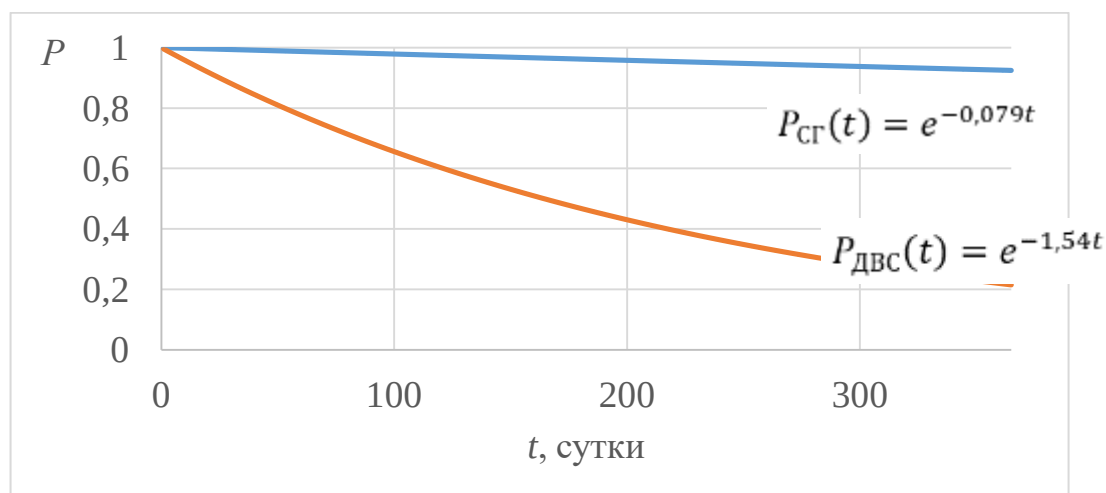


Рисунок 4.2 – Графики изменения вероятности безотказной работы синхронного генератора и двигателя внутреннего сгорания (составлено автором)

Результаты расчетов вероятности безотказной работы для временного интервала, равному одному году, приведены в таблице 4.1 и на рисунках 4.3, 4.4.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов вероятности безотказной работы элементов ГПЭА (составлено автором)

Элементы	Узлы	α_i	$\lambda_i \text{ ч}^{-1}$	P_i	P
Генератор	ПГ	0,173	$1,56 \cdot 10^{-6}$	0,986	0,924
	ССГ	0,113	$1,02 \cdot 10^{-6}$	0,991	
	ОСГ	0,350	$3,16 \cdot 10^{-6}$	0,973	
	РГ	0,222	$2,00 \cdot 10^{-6}$	0,983	
	ВГ	0,142	$1,28 \cdot 10^{-6}$	0,989	

Продолжение таблицы 4.1

Элементы	Узлы	α_i	$\lambda_i \text{ ч}^{-1}$	P_i	P
ДВС	КВ	0,063	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,907	0,214
	ТК	0,072	$1,27 \cdot 10^{-5}$	0,895	
	СЗ	0,123	$2,16 \cdot 10^{-5}$	0,828	
	СО	0,112	$1,98 \cdot 10^{-5}$	0,841	
	МГ	0,090	$1,59 \cdot 10^{-5}$	0,870	
	СС	0,084	$1,48 \cdot 10^{-5}$	0,879	
	ТС	0,077	$1,35 \cdot 10^{-5}$	0,888	
	КШМ	0,113	$1,99 \cdot 10^{-5}$	0,840	
	ЦПГ	0,119	$2,09 \cdot 10^{-5}$	0,833	
	РЧВ	0,065	$1,15 \cdot 10^{-5}$	0,904	
	ПД	0,081	$1,42 \cdot 10^{-5}$	0,883	
ГПЭА					0,198

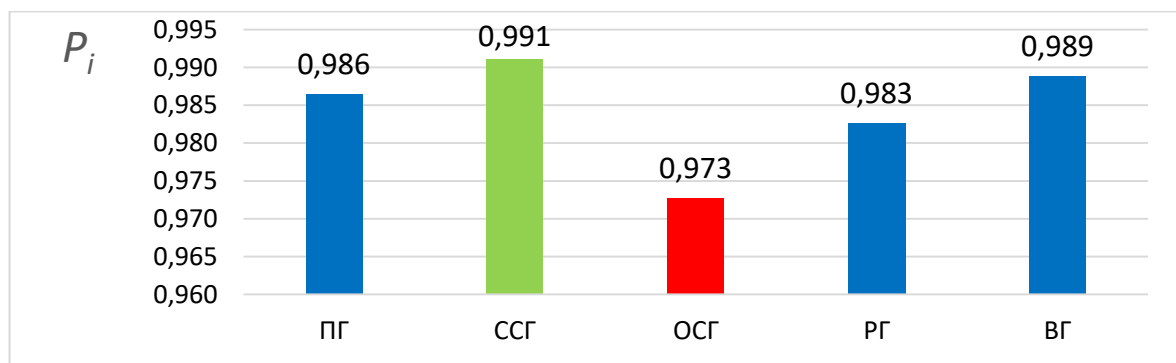


Рисунок 4.3 – Вероятность безотказной работы функциональных элементов синхронного генератора (составлено автором)

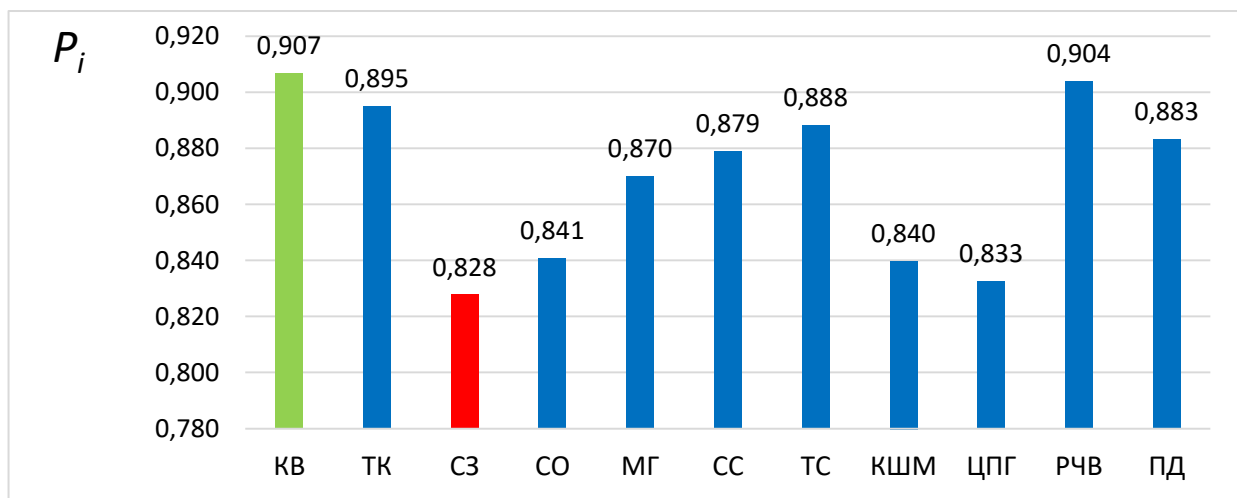


Рисунок 4.4 – Вероятность безотказной работы функциональных элементов ДВС (составлено автором)

Анализ таблицы 4.1 и рисунков 4.3, 4.4, показывает, что «слабейшим звеном» синхронного генератора, требующим приоритетного технического воздействия, является обмотка статора, «слабейшим звеном» двигателя внутреннего сгорания – система зажигания. Наиболее надежными элементами, при этом имеющими наибольшее среднее время восстановления работоспособного состояния, являются сердечник статора генератора и коленчатый вал ДВС.

Полученные результаты подтверждены привлеченной экспертной группой.

Для расчета показателей надёжности ГПЭА методом анализа иерархий разработана программа [54], соответствующая алгоритму, представленному на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Алгоритм МАИ с учетом мнений экспертной группы (составлено автором)

4.2 Математическая модель оценки технического состояния ГПЭА методами нейро-нечеткого логического вывода

Нечетким логическим выводом в задаче аппроксимации называют преобразование вида $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ каждой выходной лингвистической переменной от входных лингвистических переменных и получение заключения в виде нечеткого множества, соответствующего текущим значениям входов, с использованием нечеткой базы знаний и нечетких операций [2, 57, 133].

Для реализации процесса нейро-нечеткого моделирования оценки технического состояния ГПЭА предлагается использовать модуль *Fuzzy Logic Toolbox* системы *MatLab*, поддерживающий все фазы разработки нечетких систем, включая синтез, исследование, проектирование, моделирование и внедрение в режиме реального времени.

Нечеткий логический анализ осуществим в соответствии с алгоритмом Мамдани [24, 37].

В качестве входных переменных выберем параметры ГПЭА, используемые для оценки технического состояния на основании требований ГОСТ ISO 8528-5-2017 [8], ГОСТ ISO 8528-3-2011 [7], ГОСТ Р ИСО 8528-9-2021 [16], ГОСТ Р 53987-2010 (ИСО 8528-1:2005) [10], ГОСТ Р ИСО 8528-2-2007 [14].

Параметры ГПЭА, используемые для оценки технического состояния, представлены в таблице 4.1.

В качестве выходной лингвистической переменной будем использовать индекс технического состояния, который будем оценивать в диапазоне от 0 до 100 (где 0 – минимальное значение, 100 – максимальное значение).

Лингвистические оценки значения переменных с помощью термов представлены в таблице 4.2.

На рисунках 4.6, 4.7, 4.8 представлены структурные схемы оценки технического состояния ДВС, электротехнической и механической частей СГ, составленные с учетом выбора входных переменных.

Таблица 4.2 – Параметры ГПЭА, используемые для оценки технического состояния (составлено автором)

Параметр	Предельные значения	Термы лингвистических оценок значения переменных
Синхронный генератор (СГ)		
Отклонение напряжения установки δU_s , %	≤ 5	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Связанная зона допуска по частоте a_f , %	≤ 2	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Сопротивление изоляции статора (горячее состояние), МОм	≥ 8	{«Очень низкое», «Низкое», «Норма»}
Температура подшипников, $^{\circ}\text{C}$	< 85	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Температура обмоток статора (изоляция класса F), $^{\circ}\text{C}$	< 95	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Среднеквадратичное значение виброскорости подшипников, мм/с	< 20	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Двигатель внутреннего сгорания (ДВС)		
Давление масла P_o , кПа	$240 < P_o < 900$	{«Очень низкая», «Низкая», «Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя T_w , $^{\circ}\text{C}$	$5 < T_w < 109$	{«Очень низкая», «Низкая», «Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Среднеквадратичное значение виброскорости подшипников, мм/с	< 45	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}
Отклонение температуры в цилиндрах от среднего значения, $^{\circ}\text{C}$	< 50	{«Норма», «Высокая», «Очень высокая»}

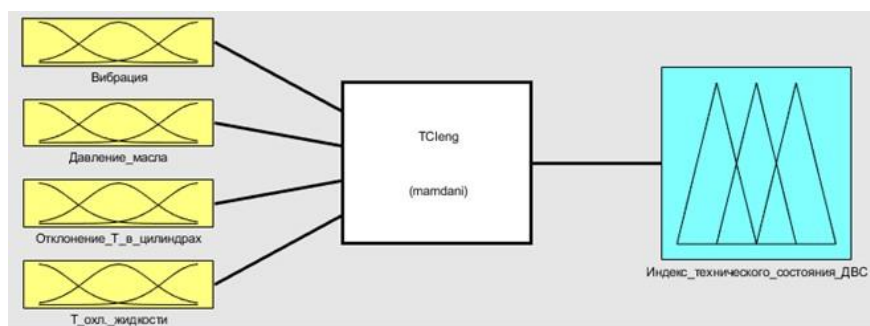


Рисунок 4.6 – Структурная схема оценки технического состояния ДВС (составлено автором)

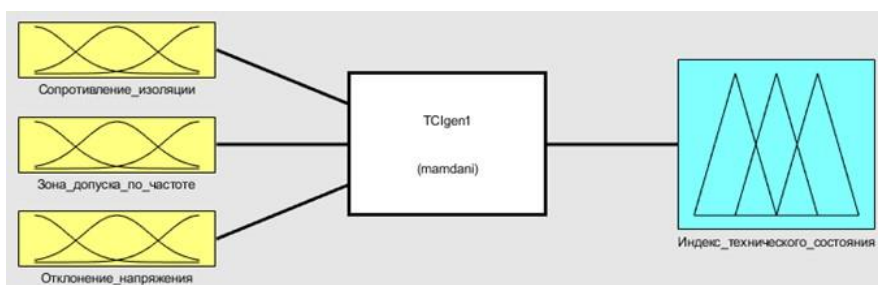


Рисунок 4.7 – Структурная схема оценки технического состояния электротехнической части генератора (составлено автором)

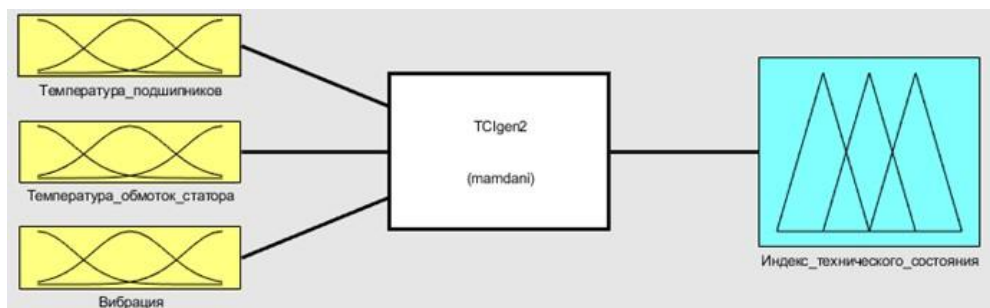


Рисунок 4.8 – Структурная схема оценки технического состояния механической части генератора (составлено автором)

При формировании функций принадлежности надо стремиться к тому, чтобы степени принадлежностей границ интервала крайним термам были равны единице. В этом случае выполняется естественное правило: чем меньше (больше) значение переменной, тем в большей степени оно соответствует крайнему терму «очень низкий» («очень высокий») [57].

Поэтому функции принадлежности крайних терм-множеств (множеств допустимых значений переменной) $\mu(x)$ для входных переменных были заданы трапецевидной функцией принадлежности, аналитический вид которой представлен формулой (4.3):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & d \leq x \leq c \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.3)$$

где a, b, c, d – некоторые числовые параметры $a \leq x \leq b \leq d$.

Для всех остальных терм-множеств входных переменных был задан треугольный закон изменения функции принадлежности, аналитический вид которой представлен формулой (4.4) [37]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (4.4)$$

Для выходной переменной, диапазон изменения которой варьируется в пределах от 0 до 100, функции принадлежности всех терм-множеств были заданы треугольной функцией принадлежности.

В качестве примеров на рисунке 4.9 представлен график функции принадлежности переменной «Сопротивление изоляции статора», на рисунке 4.10 – график функции принадлежности выходной переменной «Индекс технического состояния ДВС».

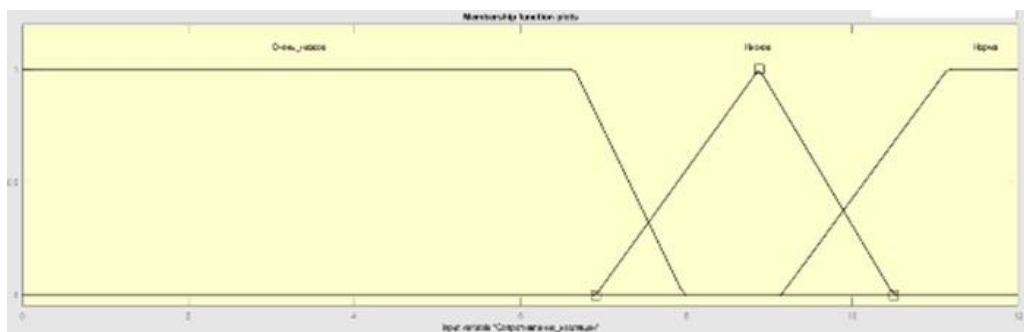


Рисунок 4.9 – График функции принадлежности переменной «Сопротивление изоляции статора» (составлено автором)

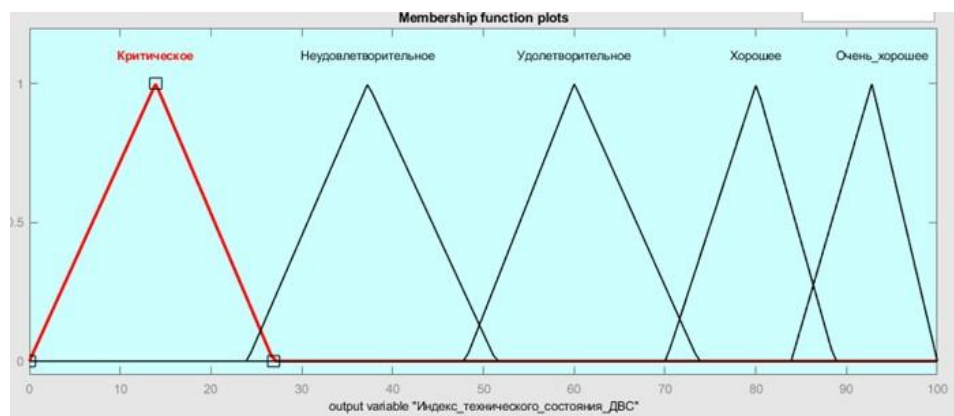


Рисунок 4.10 – График функции принадлежности выходной переменной «Индекс технического состояния ДВС» (составлено автором)

Информация о зависимости значений входных переменных от значений индекса технического состояния может быть представлена в форме правил нечетких продукций [133]. На рисунке 4.11 представлен фрагмент базы правил

для определения индекса технического состояния ДВС, задаваемой в модуле *Fuzzy Logic Toolbox* системы *MatLab*, а на рисунке 4.12 – соответствующий фрагмент интерфейса графического просмотра правил.

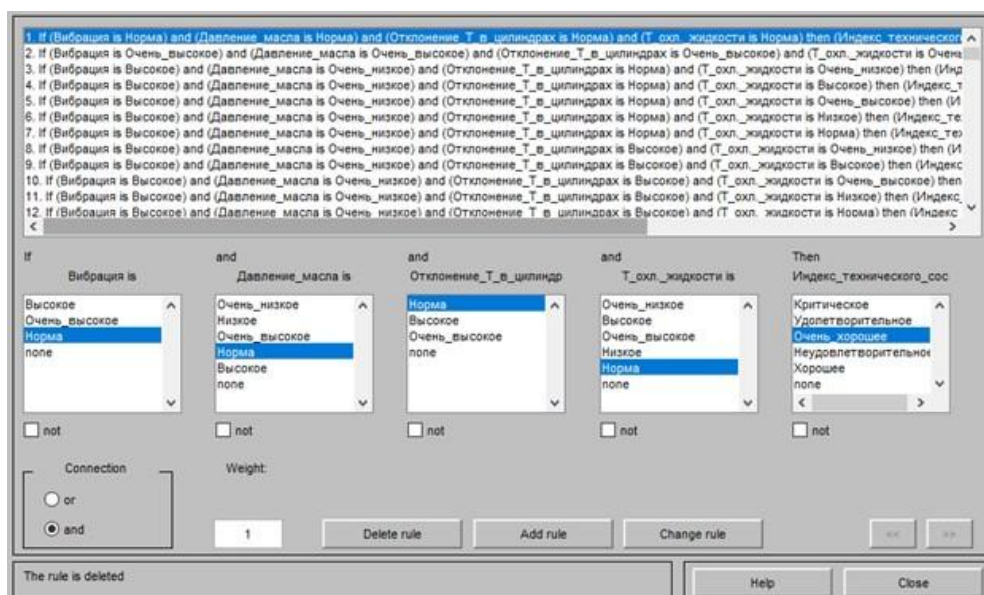


Рисунок 4.11 – Фрагмент базы правил для определения индекса технического состояния ДВС (составлено автором)

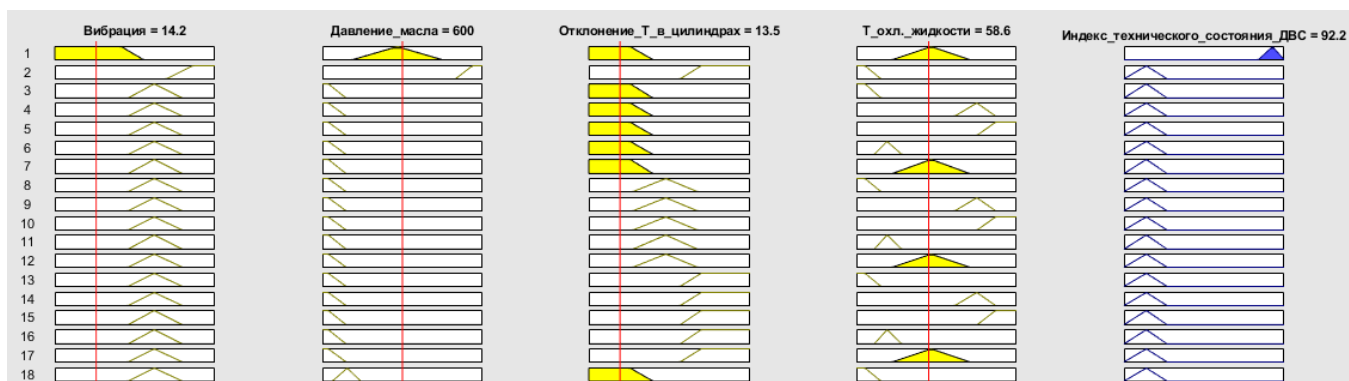


Рисунок 4.12 – Фрагмент интерфейса графического просмотра правил (составлено автором)

Дефаззификацию выполним методом центра тяжести по формуле (4.5) [37]:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}, \quad (4.5)$$

где y – результат дефаззификации; x – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной ω .

Для анализа полученной нейросетевой модели визуализируем поверхность нечеткого вывода, которая позволяет установить зависимость значений выходной

переменной от значений входных переменных нечеткой модели. На рисунке 4.13 приведены примеры зависимости между входными переменными и выходной переменной.

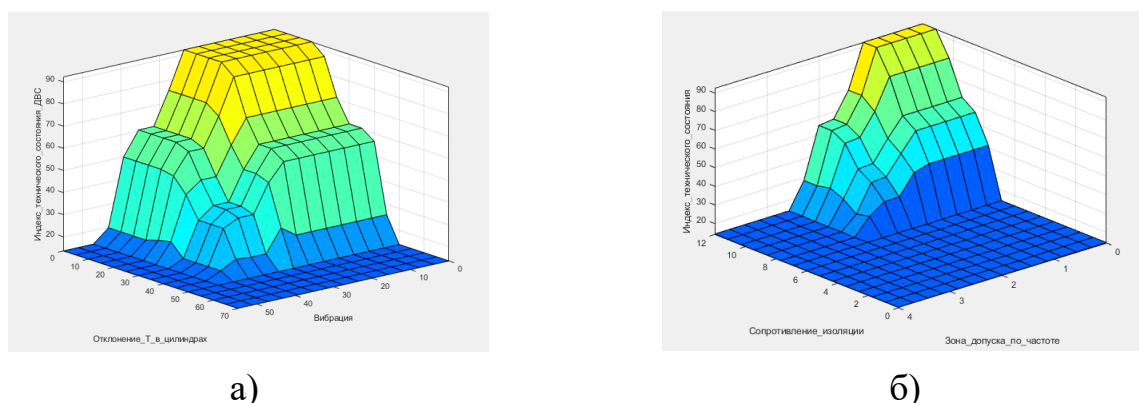


Рисунок 4.13 – Нечеткие функции: а) зависимость выходной переменной «Индекс технического состояния ДВС» от переменных «Вибрация», «Отклонение температуры в цилиндрах от среднего значения»; б) зависимость выходной переменной «Индекс технического состояния электротехнической части СГ» от переменных «Связанная зона допуска по частоте» и «Сопротивление изоляции обмотки статора» (составлено автором)

Индекс технического состояния синхронного генератора $ITC_{сг}$ в целом задается как среднее геометрическое индексов технического состояния его электротехнической $ITC_{сг_{эл}}$ и механической $ITC_{сг_{мех}}$ частей по формуле (4.6) [57]:

$$ITC_{сг} = \sqrt{ITC_{сг_{эл}} \cdot ITC_{сг_{мех}}}. \quad (4.6)$$

Тогда индекс технического состояния ГПЭА в целом $ITC_{ГПЭА}$ будет определяться как среднее геометрическое индексов технического состояния синхронного генератора $ITC_{сг}$ и ДВС $ITC_{двс}$ по формуле (4.7):

$$ITC_{ГПЭА} = \sqrt{ITC_{сг} \cdot ITC_{двс}}. \quad (4.7)$$

Модель вычисления индекса технического состояния ГПЭА, выполненная в пакете *Matlab Simulink*, приведена на рисунке 4.14.

В качестве динамической системы принимается ГПЭА в условиях эксплуатации, для которого определено понятие технического состояния как совокупности некоторых параметров в данный момент времени. Входными переменными $x_1, x_2, \dots, x_n$, где n – число диагностируемых параметров, являются значения, полученные с датчиков системы диагностирования. Значения

параметров подаются на нечёткие контроллеры, вычисляются индексы технического состояния отдельно для электрической и неэлектрической частей СГ и отдельно для ДВС. Затем определяется общая степень работоспособности ГПЭА.

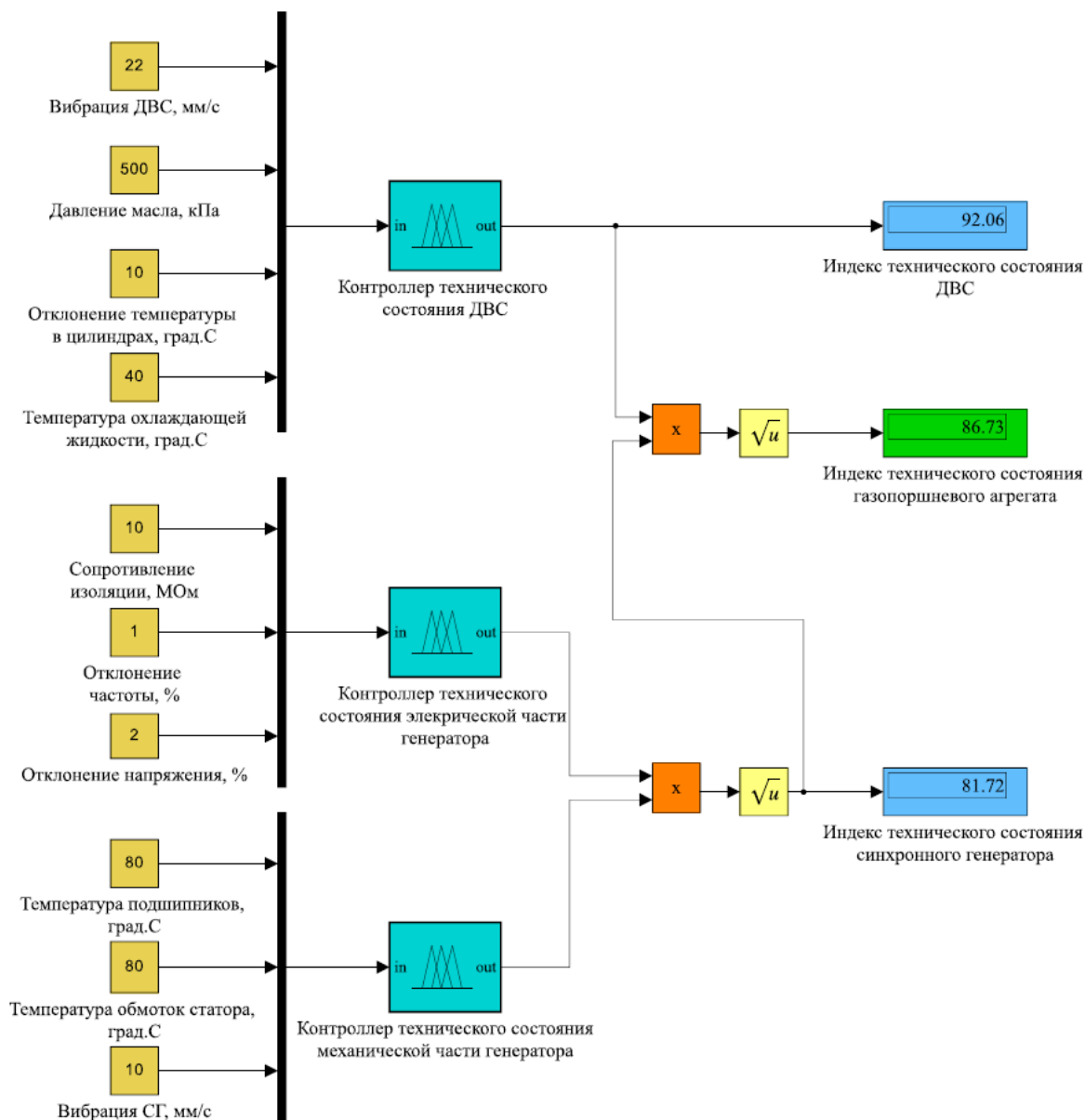


Рисунок 4.14 – Модель вычисления индекса технического состояния ГПЭА (составлено автором)

На основе представленной на рисунке 4.14 модели, для расчета индекса технического состояния ГПЭА разработана программа [55].

4.3 Прогнозирование технического состояния ГПЭА

При прогнозировании технического состояния сложных технических систем, в том числе электротехнических комплексов, можно выделить три

характерных подхода к решению поставленной задачи [46, 49, 86], а именно подходы, основанные на моделях, подходы, основанные на обработке измеряемых данных и подходы, основанные на анализе исторических данных.

Методы, основанные на моделях, предполагают создание математических или физических моделей для описания процессов деградации систем [86, 90]. Недостатками данных методов являются большая трудоемкость создания моделей, необходимость экспертных знаний [135], а также необходимость оптимизации моделей при изменении внешних факторов [105].

В основе методов, использующих обработку данных, лежит функциональное описание процессов физического износа оборудования при помощи измеряемых параметров, с использованием методов машинного обучения [104]. Преимуществом данных методов является их универсальность т.к. они не требуют глубоких экспертных знаний о структуре исследуемого объекта [96]. В то же время, эти методы не лишены недостатков, таких как зависимость от количества и качества накопленных данных [103] и низкая точность при обработке сложных систем с множеством входных параметров [108].

Одним из преимуществ подходов, основанных на анализе исторических данных, является то, что они позволяют учитывать влияние внешних факторов, таких как сезонные изменения влияющих факторов [138].

Для использования подхода, основанного на анализе исторических данных, можно применить адаптивную нейро-нечеткую сетевую модель, разработанную в среде *Matlab* на основе редактора *ANFIS* (*adaptive neuro-fuzzy inference system*) [37].

Для модели рекомендуется задавать четыре входные переменные. В данном случае первая входная переменная соответствует показателю технического состояния на текущий момент времени, вторая – показателю за предыдущий период времени, т.е. за время $(i - 1)$, где текущее время обозначается через i . Тогда третья входная переменная будет соответствовать индексу времени $(i - 2)$, а четвертая – индексу времени $(i - 3)$. Выходной переменной будет являться показатель технического состояния на момент времени $(i + 1)$ [57, 138].

На рисунке 4.15 показана структура сгенерированной адаптивной нейро-нечеткой сети.

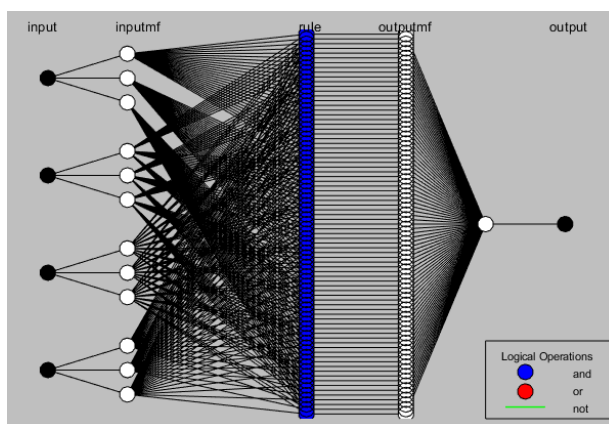


Рисунок 4.15 – Структура сгенерированной адаптивной нейро-нечеткой сети (составлено автором)

Другим решением могут являться регрессионные модели временных рядов (модель линейной регрессии, метод опорных векторов, гауссовский процесс, деревья регрессии), для построения которых может использоваться приложение *Regression Learner* пакета *Matlab*.

Для обучения регрессионных моделей задаются одна входная (время работы) и одна выходная (показатель технического состояния) переменные.

Модель линейной регрессии описывается функцией (4.8) [17]:

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (4.8)$$

где b_j – параметры регрессии (коэффициенты); x_j – регрессоры (модельные факторы); k – количество модельных факторов.

Отклик классификатора $a(x)$ на примере x в методе опорных векторов (*SVM*) определяется зависимостью (4.9) [74]:

$$a(x) = \text{sign}(\langle \vec{\omega}, \vec{x} \rangle + b) = \text{sign} \left(\sum_{j=1}^d \omega_j x_j + b \right), \quad (4.9)$$

где $\vec{\omega} \in \mathbb{R}^d$ – вектор весов; $\mathbb{R}^d(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$ – пространство объектов; d – размерность пространства объектов; b – сдвиг; sign – функция "signum", которая возвращает знак своего аргумента.

Гауссовский процесс может быть описан функцией (4.10) [35]:

$$\begin{pmatrix} f \\ f_* \end{pmatrix} \sim N \left(0, \begin{pmatrix} K(X, X) & K(X, X_*) \\ K(X_*, X) & K(X_*, X_*) \end{pmatrix} \right), \quad (4.10)$$

где $*$ соответствует набору тестов; X – выборка данных; $K(X_*, X_*)$ – априорная ковариация.

Реакция модели в деревьях регрессии описывается как зависимость (4.11) [70]:

$$a(x) = (V_{\text{внутр}}, v_0, V_{\text{лист}}, S_v, \beta_v), \quad (4.11)$$

где $V = V_{\text{ext}} \cup V_{\text{leave}}$ – множество вершин; $v_0 \in V$ – корень дерева; $S_v: D_v \rightarrow V_v$ – функция перехода по значению предиката к множеству дочерних элементов вершины v ; $\beta_v: X \rightarrow D_v$ – предикат ветвления; для в листьях $v_0 \in V_{\text{лист}}$ метка класса определена как $y_v \in Y$.

В качестве параметров точности модели рекомендуется принимать среднеквадратичное отклонение ($RMSE$), коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратичную ошибку (MSE), средняя абсолютную ошибку (MAE) [26, 121].

$RMSE$ определяется по формуле (4.12) [121, 26]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, \quad (4.12)$$

где $e_i = (y_i - \hat{y}_i)$, $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение выходной переменной; y_i – истинное значение выходной переменной.

Коэффициент детерминации определяется по формуле (4.13) [26, 121]:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}}, \quad (4.13)$$

где $SS_{\text{res}} = \sum_{i=1}^n e_i^2$ – сумма квадратов остатков регрессии; $SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ – общая сумма квадратов; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$.

Среднеквадратичная погрешность определяется по формуле (4.14) [26, 121]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}. \quad (4.14)$$

Средняя абсолютная погрешность рассчитывается по формуле (4.15) [26, 121]:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}. \quad (4.15)$$

В целом, регрессионная модель тем точнее, чем ниже значения $RMSE$, MAE , MAE и чем ближе значение R^2 к 1 [26, 27].

Для оценки точности прогнозирования используют относительную погрешность, рассчитанную по формуле (4.16) [26]:

$$\delta_i = \frac{|ITC(t)_i - \widehat{ITC}(t)_i|}{ITC(t)_i} \cdot 100\%, \quad (4.16)$$

где $ITC(t)_i$ – фактическое значение показателя технического состояния в момент времени t ; $\widehat{ITC}(t)_i$ – прогнозируемое значение показателя технического состояния в момент времени t .

4.4 Выводы по главе 4

1. Предложен алгоритм оценки надежности элементов ГПЭА методом анализа иерархий с учетом мнений нескольких экспертов. Применение метода анализа иерархий позволяет быстро и достаточно точно оценить надежность ГПЭА и их функциональных узлов с учетом установленных нормативной документацией критериев. 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.

2. В данной главе предложен комплексный подход к определению индекса технического состояния ГПЭА на основе аппарата нечеткой логики. Разработана математическая модель вычисления оценки технического состояния ГПЭА. Получены поверхности системы нечеткого вывода, позволяющие установить зависимости значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели. Предложенная методика оценки технического состояния ГПЭА

на основе аппарата нечеткой логики, позволяет непрерывно контролировать изменение индекса технического состояния в режиме реального времени, в отличие от методики Минэнерго России, предполагающей ступенчатое изменение индекса. Данное отличие позволяет точнее управлять техническим состоянием объекта путем оперативного принятия решения о необходимости технического воздействия.

3. Исследованы методы прогнозирования изменений технического состояния ГПЭА на основе адаптивной нейро-нечеткой сети и регрессионных моделей временных рядов.

4. Полученные в настоящей главе результаты могут быть основой для совершенствования стратегии технического обслуживания ремонта ГПЭА по техническому состоянию.

ГЛАВА 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГПЭА С СГПМ

5.1 Объект диагностирования и его характеристики

Исследования проводились на шести аналогичных по техническим характеристикам ГПЭА с СГПМ единичной номинальной мощностью 2,5 МВА, работающих в составе ГПЭС. Основные технические характеристики ГПЭА электростанции приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики ГПЭА (составлено автором)

Параметр	Значение
Максимальная электрическая мощность, МВА	2,5
КПД электрический, %	41,2
Скорость вращения вала, об./мин.	1500
Тип подшипников ДВС	Подшипники скольжения
Тип генератора	Синхронный, SR4B
Напряжение на выводах генератора, кВ	6,3
Частота вырабатываемой электроэнергии, Гц	50
Тип системы возбуждения генератора	От постоянных магнитов, с подвозбудителем
Номинальный коэффициент мощности, о.е.	0,8
Тип подшипников генератора	Подшипники качения
Класс изоляции обмоток по ГОСТ 8865-93	F
Ротор генератора	Явнополюсный
Число пар полюсов	2
Нормальный режим работы	Параллельно с сетью
Класс по ISO 8528-1:2018	G3

На рисунке 5.1 приведен общий вид ГПЭА электростанции, установленного в условиях блочно-модульного укрытия.

5.2 Результаты оценки технического состояния ГПЭА

На рисунке 5.2. представлены результаты вычисления индекса технического состояния шести агрегатов ГПЭС за период с 01.10.2023 по 30.09.2024 с частотой дискретизации 1 сут., выполненные на основе фактических данных, полученных из системы АСУ ТП электростанции и математической модели вычисления индекса технического состояния ГПЭА, предложенной в подразделе 4.2 главы 4.

Динамика изменения индекса технического состояния характеризуется следующими особенностями:

- общая постепенное снижение индекса технического состояния, связанное с износом функциональных узлов агрегата;
- снижение индекса технического состояния в периоды высоких температур наружного воздуха, связанное с ростом температуры подшипников и обмотки статора генератора;
- наличие периодов без изменения индекса технического состояния, связанных с простоем агрегатов;



Рисунок 5.1 – Общий вид ГПЭА *Caterpillar G3520C* (составлено автором)

- ГПЭА №1 и ГПЭА №6, территориально расположенные у ограждения электростанции, меньше подвержены влиянию колебаний температуры наружного воздуха, так как имеют лучшие условия для забора охлаждающего воздуха;
- ГПЭА №6 имеет индекс технического состояния ниже 0,7 к концу рассматриваемого периода. т.к. имеет наибольшую наработку от капитального ремонта (34845 моточасов), и требует проведения комплексной диагностики.

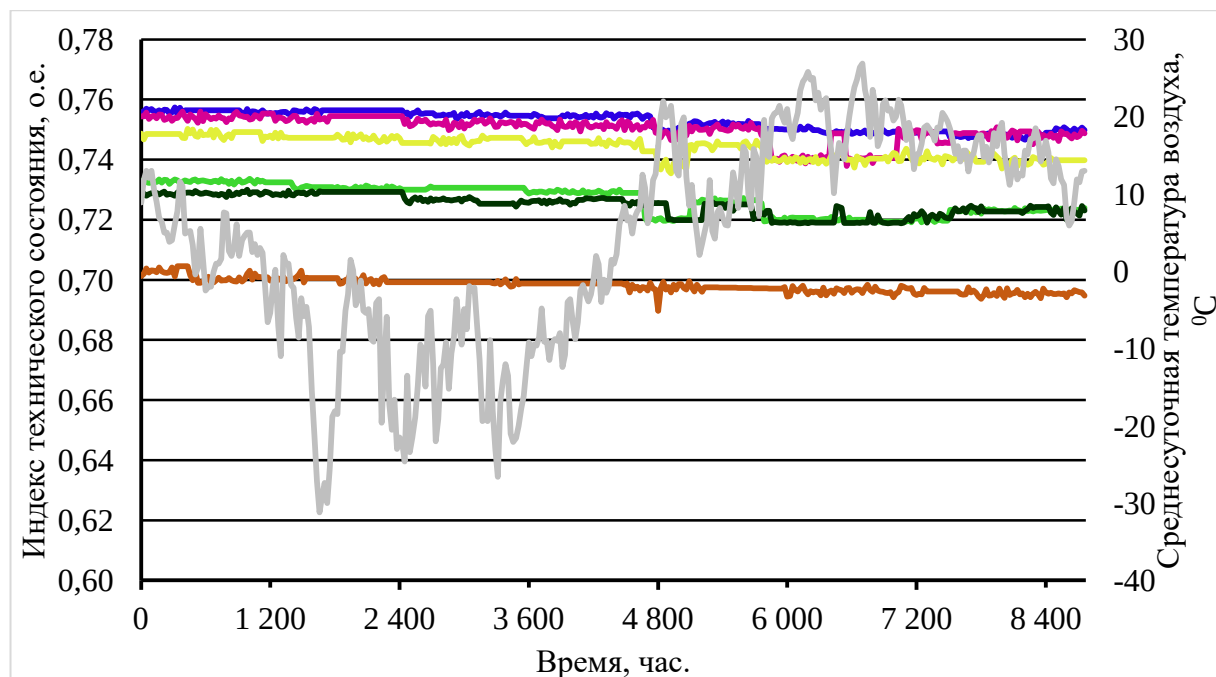


Рисунок 5.2 – Динамика изменения индекса технического состояния:

— ГПЭА №1; — ГПЭА №2; — ГПЭА №3; — ГПЭА №4;
 — ГПЭА №5 — ГПЭА №6; — среднесуточная температура воздуха, °С
 (составлено автором)

5.3 Поиск неисправностей ГПЭА с помощью цифровой тени

Поиск неисправностей ГПЭА № 6 выполнен в соответствии с методикой, разработанной в главах 2, 3.

В целях сравнения результатов и подтверждения информативности предложенной методики, для остальных агрегатов были проведены те же испытания и измерения.

С помощью переносного виброанализатора «Корсар+» были проведены замеры среднеквадратичного значения вибрации в контрольных точках ГПЭА, показанных на рисунке 3.6.

Проведение замеров вибрации показано на рисунке 5.3.

Полученные в ходе измерений уровни вибрации (среднеквадратичное значение виброскорости) ГПЭА представлены в таблице 5.2.

Анализ таблицы 5.2 показал, что среднеквадратичные значения виброскорости лежат в пределах допустимых значений в соответствии со стандартом [94] для машин данного типа и могут быть объяснены остаточным

небалансом. Однако значения виброскорости в точках 2 и 8 ГПЭА № 6 значительно превышают аналогичные показатели на других машинах, что может свидетельствовать о развивающемся дефекте.



Рисунок 5.3 – Проведение измерений вибрации (составлено автором)

Таблица 5.2 – Уровни вибрации ГПЭА (составлено автором)

Станционный номер ГПЭА	Среднеквадратичное значение виброскорости v_{rms} , мм/с									
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9	T.10
1	4,4	4,2	3,4	5,2	2,1	3,2	4,1	3,5	1,9	1,9
2	3,2	4,6	3,4	3,1	2,3	1,6	2,1	1,3	1,8	1,7
3	4,6	4,9	4,1	3,6	1,8	1,9	3,5	2,5	1,9	2,1
5	3,6	4,8	3,1	3,4	1,7	1,8	3,6	3,3	1,7	2,6
6	2,3	7,9	2,7	3,1	1,6	2,3	4,1	6,4	2,1	2,5

Регистрация спектрального состава выходного напряжения генераторов выполнялась при помощи осциллографа с полосой пропускания 100 МГц, частотой дискретизации 109 выборок в секунду, подключенного ко вторичным обмоткам трансформатора напряжения. Схема подключения осциллографа представлена на рисунке 3.5.

Как было показано в [29], характерные для неисправностей гармоники в спектре напряжения генератора появляются как при работе под нагрузкой, так и на холостом ходу. Так как нормальная схема работы электростанции предполагает включение параллельно с сетью, для исключения влияния

последней, измерения проводились при автономной работе ГПЭА на холостом ходу, при отключении от сети.

В ходе проведения исследований были испытаны все шесть ГПЭА электростанции. Каждый из ГПЭА поочередно переводился в автономный режим работы, отключался от сети, работая в режиме холостого хода.

На рисунке 5.4 представлен ход выполнения измерений.



а)



б)

Рисунок 5.4 – Проведение измерений фазного напряжения синхронного генератора: а) синхронный генератор переменного тока; б) подключенный осциллограф (составлено автором)

Измерения спектра выходного напряжения СГПМ проводились для каждой фазы, при этом различий в полученных спектрах напряжения для разных фаз одной машины обнаружено не было.

Анализ полученных путем БПФ спектральных составов выходного фазного напряжения СГПМ пяти из шести исследуемых машин показал отсутствие в спектре напряжения остальных гармоник кроме основной (50 Гц).

Измерения напряженности внешнего магнитного поля СГПМ проводились на корпусе синхронного генератора в фиксированных точках, показанных на рисунке 2.3, с использованием датчика Холла и измерителя напряженности электрических и магнитных полей «ПЗ–80». Переход из временной области в частотную производился при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) во встроенном программном комплексе P3–80–DSP.

Проведение измерений напряженности внешнего магнитного поля показано на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Проведение измерений напряженности внешнего магнитного поля синхронного генератора (составлено автором)

На рисунках 5.6, 5.7 представлены результаты диагностического отчета, полученного от цифровой тени ГПЭА №6 электростанции.

Совокупность обнаруженных признаков ГПЭА №6 указывает на комбинированный дефект, включающий механические, требующие проверки ротора, подшипников и соосности валов, и электрические неисправности. Выполненная ревизия заднего подшипника СГПМ подтвердила одно из предположений. На рисунке 5.8 представлено фото дефектного подшипника. Для выявления и устранения остальных дефектов требуется ремонт СГПМ, рекомендации даны обслуживающему персоналу.

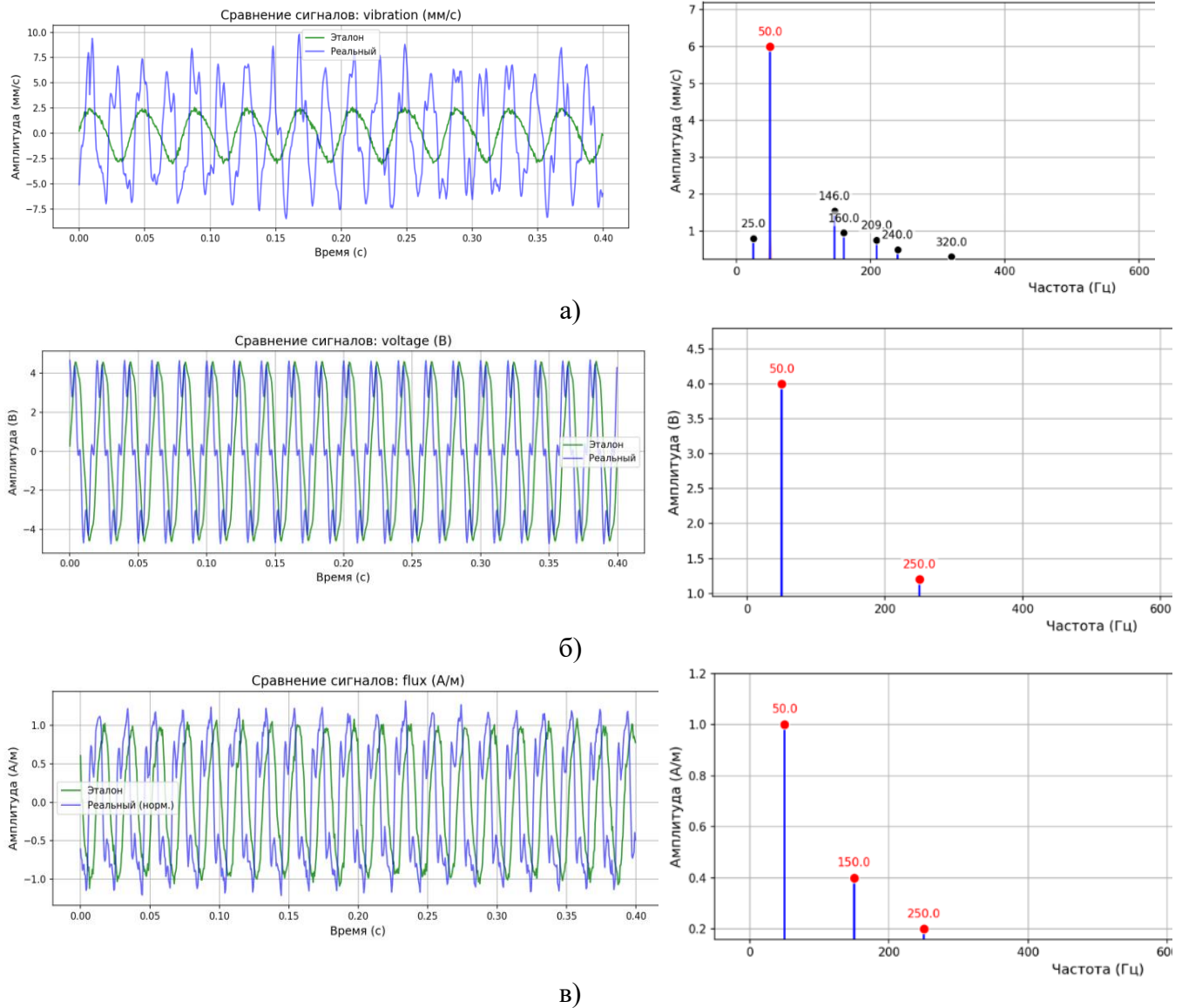


Рисунок 5.6 – Сравнение реального и эталонного сигналов и спектр реального сигнала ГПЭА №6: а) вибрации; б) выходного фазного напряжения; в) внешнего магнитного поля (составлено автором)

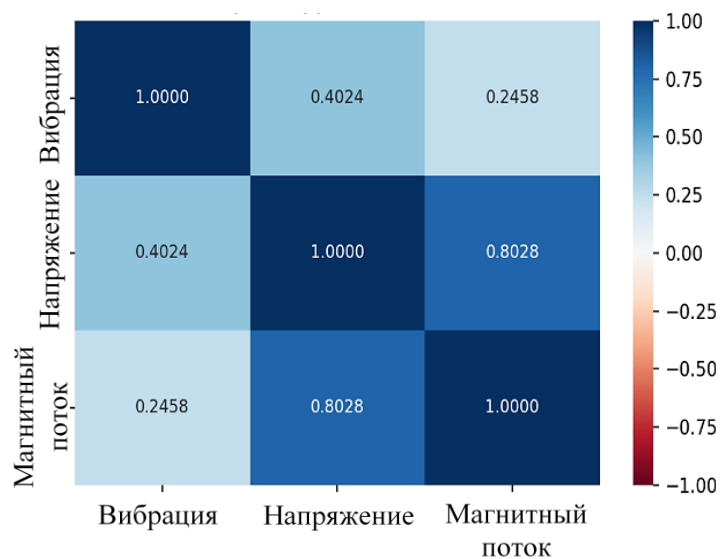


Рисунок 5.7 – Тепловая карта корреляции сигналов ГПЭА №6 (составлено автором)

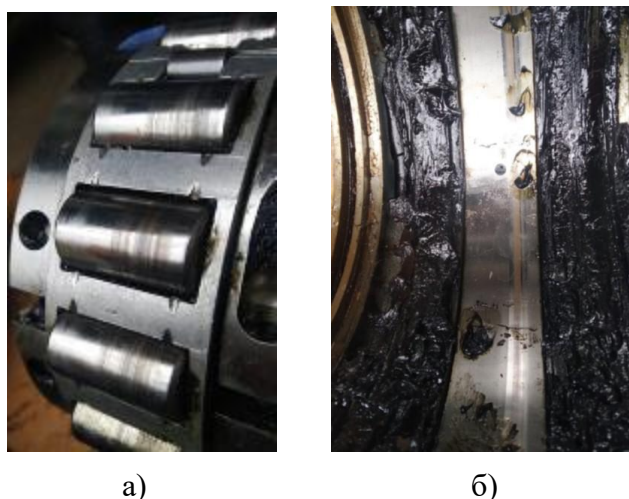


Рисунок 5.8 – Дефектный подшипник качения синхронного генератора: а) дефекты роликов; б) дефекты внешней обоймы (составлено автором)

5.4 Результаты прогнозирования технического состояния ГПЭА на основе анализа исторических данных

Для использования подхода, основанного на анализе исторических данных, необходимо использовать в качестве входных данных информацию о динамике фактического изменения показателя технического состояния.

Динамика фактического изменения показателя технического состояния ГПЭА №6, определенного на основании математической модели, разработанной в разделе 4.2, за период с 01.10.2023 по 30.09.2024 с частотой дискретизации 1 сут., представлена на рисунке 5.2.

Как видно из рисунка 5.2, изменение показателя технического состояния ГПЭА характеризуется постепенным ухудшением.

Для создания адаптивной нейро-нечеткой сетевой модели в соответствии с разделом 4.3, была задана обучающая выборка из динамики фактического изменения показателя технического состояния ГПЭА №6, представленной на рисунке 5.2. Фрагмент обучающей выборки представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Фрагмент обучающей выборки (составлено автором)

1-я входная переменная	2-я входная переменная	3-я входная переменная	4-я входная переменная	Выходная переменная
0,70240	0,70380	0,70200	0,70122	0,70318
0,70318	0,70240	0,70380	0,70200	0,70302
0,70302	0,70318	0,70240	0,70380	0,70257
0,70257	0,70302	0,70318	0,70240	0,70413
0,70413	0,70257	0,70302	0,70318	0,70285

Продолжение таблицы 5.3

1-я входная переменная	2-я входная переменная	3-я входная переменная	4-я входная переменная	Выходная переменная
0,70285	0,70413	0,70257	0,70302	0,70243
0,70243	0,70285	0,70413	0,70257	0,70231
0,70231	0,70243	0,70285	0,70413	0,70252

Для обучения сети использовался гибридный метод обучения с уровнем ошибки 0, а количество этапов обучения предполагалось равным 10 [57, 138].

Структура сгенерированной адаптивной нейро-нечеткой сети показана на рисунке 4.15.

На рисунке 5.9 показаны результаты отклика адаптивной нейро-нечеткой сетевой модели.

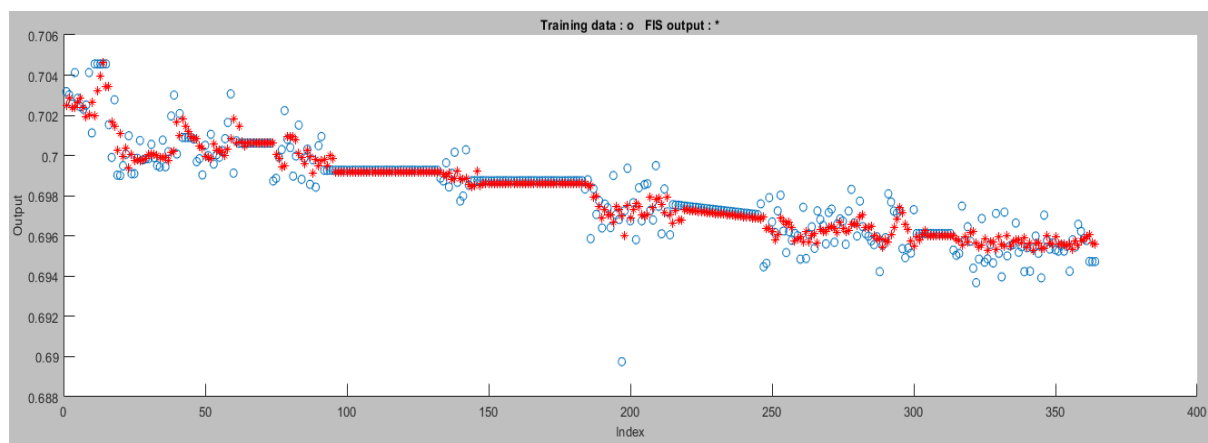


Рисунок 5.9 – Результаты ответов модели на обучающей выборке (составлено автором)

Анализ рисунка 5.9 показывает удовлетворительные результаты построенной модели, так как рассчитанные значения выходной переменной близки к заданным.

Чтобы проверить точность сгенерированной адаптивной нейро-нечеткой сети, мы вычисляем прогнозируемые значения с помощью функции *evalfis* командной строки *Matlab* [57]. В качестве аргументов этой функции укажем вектор значений индекса технического состояния графического процессора на текущий момент времени и три предыдущих раза.

Результаты расчетов прогнозируемых значений и относительной погрешности адаптивной нейро-нечеткой сети, рассчитанной по формуле (4.16), представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Относительная погрешность адаптивной нейро-нечеткой сетевой модели (составлено автором)

Время работы с даты начала	Истинное значение ИТС	Предсказанное значение ИТС	Относительная ошибка, %
8664	0,696576	0,6946	0,28
8688	0,696229	0,6978	0,23
8712	0,695868	0,6945	0,19
8736	0,695783	0,6963	0,07
8760	0,694729	0,6930	0,25
Среднее значение	–	–	0,20

В таблице 5.5 приведены результаты работы регрессионных моделей временных рядов для нашей выборки.

Таблица 5.5 – Показатели эффективности модели машинного обучения (составлено автором)

Показатели	Модель линейной регрессии	Метод опорных векторов	Гауссовский процесс	Деревья регрессии
RMSE	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$
R^2	0,816	0,806	0,816	0,813
MSE	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$9,4 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$9,06 \cdot 10^{-7}$
MAE	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$

Из таблицы 5.5 видно, что наибольшей точностью обладает модель регрессии Гауссовского процесса.

На рисунках 5.10, 5.11 визуализированы результаты машинного обучения данной модели.

Рисунок 5.10 отображает графики зависимостей истинного и спрогнозированного моделью значений индекса технического состояния от наработки. Как видно из рисунка 5.10, прогнозные значения достаточно близки к истинным, что свидетельствует об относительно высокой точности модели.

На рисунке 5.11 изображен график зависимости разницы между прогнозным и истинным значениями индекса технического состояния («остаточных значений») от истинного значения индекса технического состояния. Анализ графика подтверждает удовлетворительные результаты построенной регрессионной модели, т.к. остаточные значения разбросаны симметрично вокруг 0.

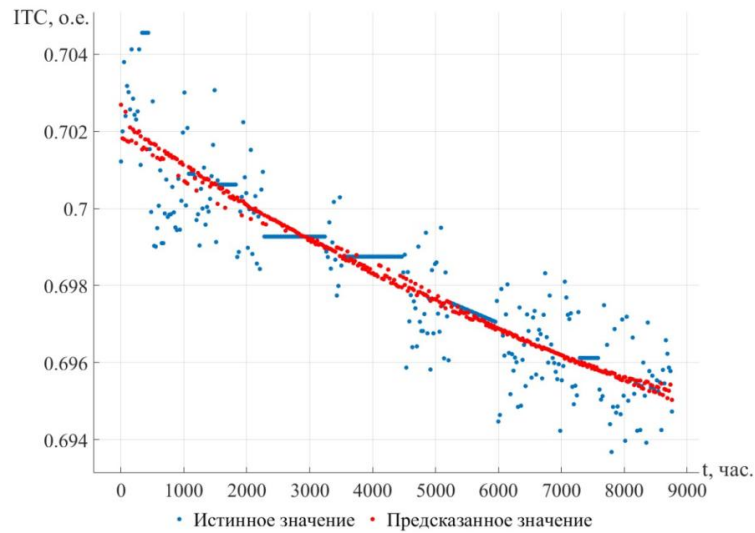


Рисунок 5.10 – График зависимости выходной переменной «Индекс технического состояния» от наработки: ITS – индекс технического состояния; t – наработка (составлено автором)

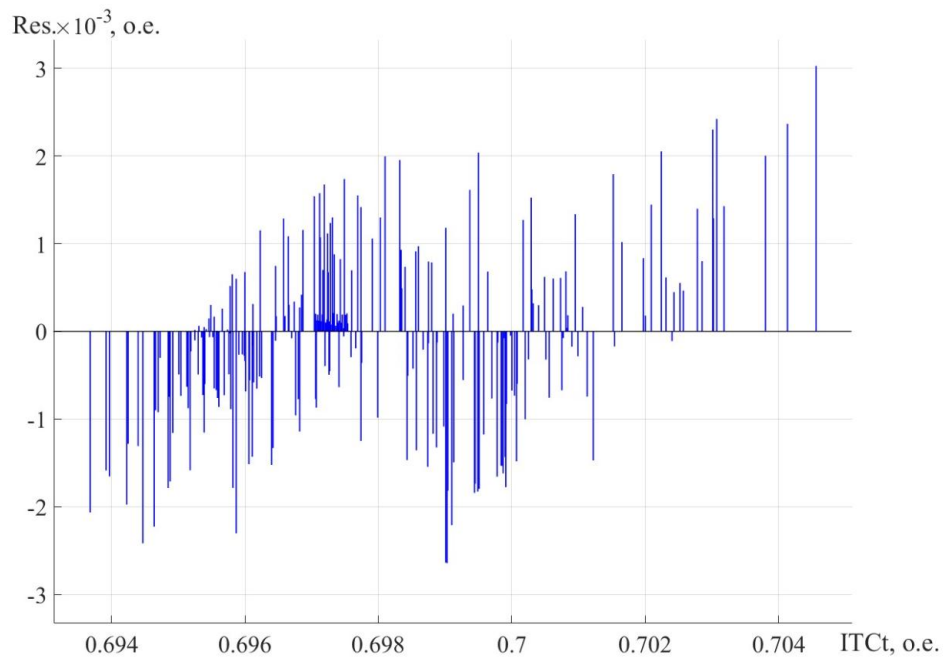


Рисунок 5.11 – График зависимости разницы между прогнозным и истинным значением индекса технического состояния от истинного значения индекса технического состояния: Res. – residuals, разница между истинным и прогнозным значением индекса технического состояния;

ITS_t – истинное значение индекса технического состояния (составлено автором)

Выполним проверку точности построенной модели регрессии Гауссовского процесса, рассчитав прогнозные значения с помощью функции *yfit* командной строки *Matlab*. В качестве аргументов этой функции укажем значения наработки ГПЭА, не вошедшие в обучающую выборку модели.

Расчеты относительной ошибки модели, выполненные для оценки точности прогнозирования по формуле (4.16), приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Относительная ошибка модели прогнозов регрессии Гауссовского процесса (составлено автором)

Наработка от даты начала отсчета, ч	Истинное значение ИТС, о.е.	Прогнозное значение ИТС, о.е.	Относительная ошибка, %
8664	0,696576	0,6965	0,01
8688	0,696229	0,6970	0,11
8712	0,695868	0,6948	0,15
8736	0,695783	0,6975	0,24
8760	0,694729	0,6910	0,53
Среднее значение			0,2

В целом полученные результаты можно считать хорошими, так как относительная ошибка модели не превышает 0,53%, среднее значение относительной ошибки составило 0,2%.

5.5 Расчет экономического эффекта реализации разработанных моделей и методик

Расчет экономического эффекта выполнен стандартным методом использования временной стоимости денег для оценки долгосрочных проектов путем анализа дисконтированных денежных потоков. Экономический эффект достигается подтвержденным эксплуатирующим персоналом сокращением количества плановых ТО и ремонтов после аварийных остановок

По информации эксплуатирующей организации, средняя стоимость ТО одного ГПЭА, включая затраты на запасные части, материалы, фонд оплаты труда, составляет 0,248 млн руб. без НДС в ценах 2026 года; средняя стоимость ремонтов после аварийных остановок составляет 0,995 млн руб. без НДС в ценах 2026 года.

Так как практическая реализация разработанных моделей и методик была выполнена на ГПЭС, включенной параллельно с сетью, в расчете не учитывались потери нефти от простоя скважин.

Расчет экономического эффекта от реализации разработанных моделей и методик приведен в таблице 5.7. Экономический эффект (NPV) от внедрения

разработанных методов и моделей для ГПЭС установленной мощностью 12 МВт составит 12,135 млн руб. за пятилетний срок мониторинга реализации проекта.

5.6 Выводы по главе 5

1. Практическая реализация предложенного подхода к диагностике ГПЭА, основанная на интеграции мультифизических признаков с их сопоставлением и корреляционным анализом, с применением цифровой тени, учитывающего специфику оборудования, подтвердила точность и надёжность методики для выявления неисправностей на ранней стадии развития дефектов.

2. Применение разработанных моделей на основе аппарата нечеткой логики позволяет осуществлять мониторинг и эффективно управлять техническим состоянием ГПЭА, так как учитывает показатели надежности функциональных элементов ГПЭА, а также интегральный показатель фактического технического состояния в настоящем и его прогнозное значение на межремонтный интервал времени.

3. Исследование показало применимость как адаптивной нейро-нечеткой сети, так и регрессионных моделей временных рядов для прогнозирования изменений технического состояния ГПЭА. Относительные погрешности адаптивной нейро-нечеткой сети и регрессионной модели гауссовского процесса практически не отличаются. Предложенные методы позволяют достаточно точно прогнозировать изменения технического состояния ГПЭА и учитывать влияние труднопредсказуемых внешних факторов.

4. Экономический эффект (NPV) от внедрения разработанных методов и моделей для ГПЭС установленной мощностью 12 МВт составит 12,135 млн руб. за пятилетний срок мониторинга реализации проекта.

Таблица 5.7 – Расчет экономического эффекта реализации разработанных моделей и методик на ГПЭС установленной мощностью 12 МВт (составлено автором)

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измерения	2026	2027	2028	2029	2030	Итого	Примечание
1	Год начала дисконтирования		2026	–	–				
2	Годовая ставка дисконтирования	%	20%	20%	20%	20%	20%		
3	Налог на имущество	%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%		Закон Республики Башкортостан от 28.11.2003 N 43-з (ред. от 30.06.2025) «О налоге на имущество организаций»
4	Налог на прибыль	%	25%	25%	25%	25%	25%		Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 N 117-ФЗ (ред. от 27.10.2025)
5	НДС	%	22%	22%	22%	22%	22%		Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 N 117-ФЗ (ред. от 27.10.2025)
6	Индекс цен на материалы	%	5,3%	4,4%	4,0%	4,0%	4,0%		
7	Требуемые для внедрения проекта инвестиции капитального характера	млн руб.	0	0	0	0	0	0,000	
8	Требуемые для внедрения проекта операционные расходы	млн руб.	0,495	0	0	0	0	0,495	Стоимость осциллографа Micsig TO1104, анализатора внешнего магнитного поля ПЗ–80, виброанализатора "Корсар+"
9	Существующая ситуация:								
9.1	Количество ТО в год	шт.	25	25	25	25	25		График ТОиР, электростанция с шестью агрегатами

Продолжение таблицы 5.7

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измерения	2026	2027	2028	2029	2030	Итого	Примечание
9.2	Средняя стоимость одного ТО собственными силами	млн руб./шт.	0,248	0,259	0,270	0,281	0,292		
9.3	Общая стоимость ТО	млн руб.	6,211	6,484	6,743	7,013	7,294	33,745	
9.4	Количество аварийных ремонтов в год	млн руб.	4	4	4	4	4		
9.5	Средняя стоимость одного аварийного ремонта	млн руб./шт.	0,995	1,039	1,080	1,124	1,168		
9.6	Общая стоимость аварийных ремонтов	млн руб.	3,980	4,155	4,321	4,494	4,674	21,625	
9.7	Общая стоимость ТО и аварийных ремонтов	млн руб.	10,191	10,639	11,065	11,507	11,968	55,369	
10	Ожидаемая ситуация:								
10.1	Количество ТО в год	шт.	25	15	15	15	15		
10.2	Средняя стоимость одного ТО собственными силами	млн руб./шт.	0,248	0,259	0,270	0,281	0,292		
10.3	Общая стоимость ТО	млн руб.	6,211	3,890	4,046	4,208	4,376	22,731	
10.4	Количество аварийных ремонтов в год	млн руб.	4	0	0	0	0		
10.5	Средняя стоимость одного аварийного ремонта	млн руб./шт.	0,995	1,039	1,080	1,124	1,168		
10.6	Общая стоимость аварийных ремонтов	млн руб.	3,980	0,000	0,000	0,000	0,000	3,980	
10.7	Общая стоимость ТО и аварийных ремонтов	млн руб.	10,191	3,890	4,046	4,208	4,376	26,711	
11	Эффект от оптимизации затрат	млн руб.	0,000	6,749	7,019	7,299	7,591	28,658	

Продолжение таблицы 5.7

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измерения	2026	2027	2028	2029	2030	Итого	Примечание
12	Совокупное изменение в доходах и расходах	млн руб.	-0,495	6,749	7,019	7,299	7,591	28,164	
13	Налог на прибыль	млн руб.	0,000	-1,687	-1,755	-1,825	-1,898	-7,165	
14	Денежный поток	млн руб.	-0,495	5,062	5,264	5,475	5,694	20,999	
15	Накопленный денежный поток	млн руб.	-0,495	4,567	9,831	15,306	20,999		
16	Фактор дисконтирования	о.е.	0,913	0,761	0,634	0,528	0,440		
17	Дисконтированный денежный поток	млн руб.	-0,451	3,850	3,337	2,892	2,506	12,135	
18	Накопленный дисконтированный денежный поток	млн руб.	-0,451	3,399	6,736	9,628	12,135		
19	NPV	млн руб.	12,135						

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 индекса 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.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

BPFI – Ball Pass Frequency Inner (частота перекатывания тел качения по внутренней обойме подшипника);

BPFO – Ball Pass Frequency Outer (частота, с которой тела качения проходят через дефект на наружном кольце подшипника);

BSF – Ball Spin Frequency (частота вращения тела качения вокруг своей оси);

FTF – Fundamental Train Frequency (частота вращения сепаратора);

NPV – Net Present Value (чистая приведённая стоимость);

THD – Total Harmonic Distortion (коэффициент гармонических искажений);

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ВГ – возбудитель генератора на постоянных магнитах;

ВЭМП – внешнее электромагнитное поле;

ГПЭА – газопоршневой электроагрегат;

ГПЭС – газопоршневая электростанция;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

КВ – коленчатый вал;

КЗ – короткое замыкание;

КПД – коэффициент полезного действия;

КШМ – кривошипно-шатунный механизм;

НДС – налог на добавленную стоимость;

МАИ – метод анализа иерархий (метод Т.Л. Саати);

МВЗ – межвитковое замыкание обмотки статора;

МГ – механизм газораспределения;

ОСГ – обмотка статора генератора;

ПГ – подшипники генератора;

ПД – подшипники скольжения ДВС;

ПМ – постоянный магнит;

ПНГ – попутный нефтяной газ;

РГ – ротор генератора;

СГ – синхронный генератор;

СГПМ – синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов;

СЗ – система зажигания;

СКЗ – среднеквадратичное значение;

СО – система охлаждения;

СС – система смазки;

ССГ – сердечник статора;

ТК – турбокомпрессор;

ТО – техническое обслуживание;

ТС – топливная система;

ЧР – частичный разряд;

ЦТ – цифровая тень;

ЦПГ – цилиндро-поршневая группа;

ЭДС – электродвижущая сила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ассоциация ЕАМ. Спектральный анализ вибрации: [электронный ресурс]. URL: <https://eam.su/lekciya-14-spektralnyj-analiz-vibracii.html> (дата обращения 03.10.2023).
2. Ахьеев, Д. С. Модели и методы технической диагностики электросетевого оборудования на основе нечеткой логики: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ахьеев Джавод Саламшоевич. – Новосибирск, 2018. – 195 с.
3. Басманов, В. Г. Современные методы диагностики объектов электроэнергетики: учебное пособие / В. Г. Басманов – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. – 98 с.
4. Баширов, М. Г. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: монография / М. Г. Баширов, И. В. Прахов – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – 96 с.
5. Биллер, А. М. Мезоскопические модели для механики магнитореологических полимеров: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Биллер Анастасия Михайловна. – Пермь, 2016. – 145 с.
6. Гаврилин, А. Н. Диагностика технологических систем / А. Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес. – Часть 2. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 128 с.
7. ГОСТ ISO 8528-3-2011. Межгосударственный стандарт. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 3. Генераторы переменного тока (введен в действие Приказом Росстандарта от 13.12.2011 N 1162-ст).
8. ГОСТ ISO 8528-5-2017. Межгосударственный стандарт. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 5. Электроагрегаты (введен в действие Приказом Росстандарта от 09.10.2018 N 736-ст).
9. ГОСТ Р 53176-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Показатели надежности. Требования и

методы испытаний (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 18.12.2008 N 624-ст).

10. ГОСТ Р 53987-2010 (ИСО 8528-1:2005). Национальный стандарт Российской Федерации. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, технические характеристики и параметры" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 29.11.2010 N 560-ст).

11. ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021: Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182677>, (дата обращения 19.03.2025).

12. ГОСТ Р ИСО 20816-2-2022: Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 2. Стационарные газовые турбины, паровые турбины и генераторы с гидравлическими подшипниками мощностью свыше 40 МВт и частотами вращения 1500, 1800, 3000 и 3600 мин. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200193815>, (дата обращения 19.03.2024).

13. ГОСТ Р ИСО 20816-3-2023: Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 3. Промышленное оборудование мощностью свыше 15 кВт и частотой вращения от 120 до 30 000 мин. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1304633906>, (дата обращения 19.03.2024).

14. ГОСТ Р ИСО 8528-2-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 2. Двигатели внутреннего сгорания (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 31.10.2007 N 300-ст).

15. ГОСТ Р ИСО 8528-9-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 25.05.2021 N 453-ст).

16. ГОСТ Р ИСО 8528-9-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от

двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 25.05.2021 N 453-ст).

17. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.

18. Завидей, В. И. Современные методы мониторинга и технического диагностирования электрических машин / В. И. Завидей, И. В. Путилова, В. А. Старшинов // Экспозиция Нефть Газ. – 2023. – № 4. – С. 38–44. – DOI: 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44.

19. **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.

20. **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.

21. **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.

22. **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.

23. **Зайниев, А. В.** Модель распределения нагрузки агрегатов газопоршневой электростанции на основе индекса технического состояния с применением нечеткой логики / **Зайниев А.В.**, Александров В.В., Хакимьянов М.И., Чжао Юйхан, Чжан Хаотянь // Сборник научных трудов X Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. – 2025. – С. 161-168.

24. **Зайниев, А. В.** Нейро-нечеткая модель оценки технического состояния газопоршневых агрегатов / **А. В. Зайниев**, В. Ф. Шайдуллин, М. И. Хакимьянов // Энергетические и электротехнические системы. Международный сборник научных трудов. Выпуск 10 под ред. Г. П. Корнилова, Ю. Н. Кондрашовой – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2023. – С. 108-117.

25. **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.

26. **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.

27. **Зайниев, А. В.** Прогнозирование технического состояния генераторных электроагрегатов с приводом от газопоршневых двигателей при помощи адаптивной нейро-нечеткой сети / **А. В. Зайниев**, В. Ф. Шайдуллин, М.И. Хакимьянов // Сборник научных трудов IX Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. – 2004. – С. 201-207.

28. **Зайниев, А. В.** Разработка алгоритма мониторинга и управления техническим состоянием электротехнических комплексов газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами / **А. В. Зайниев**, М. И. Хакимьянов //

Завалишинские чтения 25: сборник докладов XX Международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 15–16 апреля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 310-314. – DOI 10.31799/978-5-8088-2020-3-2025-20-310-314.

29. **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. – DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.05.

30. **Зайниев, А. В.** Цифровой двойник для диагностики неисправностей газопоршневых электроагрегатов на основе мультифизического подхода / **А. В. Зайниев**, М. И. Хакимьянов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 3 т. / ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2025. – Т. III. – С. 188-194.

31. ИТС 38-2022 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (утв. Приказом Росстандарта от 20.12.2022 N 3227).

32. ИТС 50-2017 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка природного и попутного газа» (утв. Приказом Росстандарта от 14.11.2017 N 2423).

33. Казаков, Ю. Б. Метод диагностики дефектов синхронных генераторов по изменениям внешнего электромагнитного поля / Ю. Б. Казаков, А. Н. Морозов, А. П. Океанский, Е .А. Шумилов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 1. – С. 55-61. – DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.055-061.

34. Картвелишвили, В. М. Метод анализа иерархий: критерии и практика / В. М. Картвелишвили, Э. А. Лебедюк // Вестник РЭУ. – 2013. – № 6. – С. 97-113.
35. Котова, Д. Гауссовские процессы для активного обучения в задаче классификации / Д. Котова, М. Панов // Информационные технологии и системы 2019 (ИТиС 2019): Сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН, Пермь, 17–22 сентября 2019 года. Пермь: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН. – 2019. – С. 471-478.
36. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин / Кузнецов, Н.Л. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
37. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
38. Лукьянов, А. В. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей / А. В. Лукьянов, Ю. С. Мухачев, И. О. Бельский // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 61-69.
39. Лянденбургский, В. В. Программа поиска неисправностей в системе зажигания двигателей / В. В. Лянденбургский, М. В. Нефёдов, Д. В. Коротков, Д. А. Посыпкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 199–203.
40. «Отчет о функционировании и развитии ТЭК России в 2020 году» Министерства энергетики Российской Федерации [электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/open-data/COORDINATING-AND-ADVISORY-BODIES/collegium-minenergo/board-of-the-minenergo-2021?docs-group=file-27114>, (дата обращения 19.03.2025).
41. Патент № 2799985 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ контроля состояния электрических машин по сигнатурному анализу токового сигнала: заявл. 20.02.2023: опубл. 14.07.2023 / В.А. Еремеева, О.Л. Ибряева; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский

государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

42. Патент № 2837784 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Способ контроля технического состояния газопоршневого агрегата в эксплуатации: 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».

43. Патент № 2851765 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/00, G01M 11/00. Способ контроля технического состояния газопоршневого электроагрегата в эксплуатации: 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».

44. Петухов, В. С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. С. Петухов, В. А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – Т. 1. – № 31. – С. 50-52.

45. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – Пермь: Виброцентр, 2012. – 252 с.

46. Рябов, А. А. Обзор существующих методов оценки остаточного ресурса оборудования нефтегазопереработки / А. А. Рябов // Нефтегазовое дело. – 2016. – №1. – С. 198-220.

47. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Перевод с английского Вачнадзе Р.Г. / Т. Саати, – М.: Радио и связь. 1993. – 278 с.

48. Садовников, М. Е. Надежность и диагностика электрооборудования. Введение в надежность электромеханических и электротехнических систем: учебное пособие / М. Е. Садовников. – Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горногеол. акад, 2003. – 44 с.

49. Сай, Ван Квонг. Метод прогнозирования остаточного ресурса на основе обработки данных многообъектных сложных систем / Ван Квонг Сай, М. В. Щербаков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – №1 (45). – С. 33-44.

50. Саксонов, А. С. Разработка математической модели оценки влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на его основные электротехнические и электромеханические характеристики / А. С. Саксонов, Ю. А. Макаричев, В. Н. Козловский, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 514–519. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-514-519.

51. Саксонов, Е. А. Обзор методов обнаружения неисправностей синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / Е. А. Саксонов, С. Е. Симонов, М. Г. Городничев // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4 (100). – С. 8-38.

52. 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.

53. 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.

54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687948 Российская Федерация. Определение надежности элементов газопоршневого агрегата методом анализа иерархий: № 2024686911; заявл. 07.11.2024; опубл. 22.11.2024 / **А.В. Зайниев**, М.И. Хакимьянов.

55. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689233 Российская Федерация. Определение индекса технического

состояния газопоршневого агрегата с синхронным генератором переменного тока:
 № 2024686941: заявл. 07.11.2024: опубл. 04.12.2024 / **А. В. Зайниев**,
 М. И. Хакимьянов.

56. Семенов, Д. Н. Диагностика асинхронных электрических машин по спектрам тока [электронный ресурс] / Д. Н. Семенов, Н. А. Баркова. – URL: <https://vibro-expert.ru/diagnostika-asinxronnix-elektricheskix-mashin-po-spektram-toka.-doklad.html> (дата обращения 03.10.2023).

57. Серебряков, А. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов / А. В. Серебряков, А. С. Стеклов, В. Г. Титов – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018. – 175 с.

58. Система диагностики роторных машин производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор»: [электронный ресурс]. URL: https://sibkom.tom.ru/news/index.php?ELEMENT_ID=3545 (дата обращения 03.10.2023).

59. Татевосян, А.А. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами / А.А. Татевосян, В.С. Мищенко // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 90–93.

60. Шабанов, В. А. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения: учебное пособие / В. А. Шабанов, М. Г. Баширов, П. А. Хлюпин, Н. Н. Лунева, А. Р. Калимгулов, И. С. Миронова,

У. Ф. Юмагузин, Р. З. Юсупов – Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. – 371.

61. Alameh, K. Vibration-based Fault Diagnosis Approach for Permanent Magnet Synchronous Motors / K. Alameh, N. Cite, G. Hoblos, G. Barakat // 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS. – 2015. – P. 1444–1450. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.728.

62. Alfonso, F. Rolling element bearing components and failing frequencies: [электронный ресурс] / F. Alfonso. – URL: <https://power-mi.com/content/rolling-element-bearing-components-and-failing-frequencies> (дата обращения 05.08.2024).

63. Ali, Q. Defect manipulation for the coercivity enhancement of Nd-Fe-B permanent magnets / Q. Ali, J. Fischbacher, A. Kovacs, H. Oezelt, M. Gusenbauer, H. Moustafa, D. Böhm, L. Breth, T. Schrefl // *Physica B: Condensed Matter*. – 2024. – Vol. 678. – DOI: 10.1016/j.physb.2024.415759.
64. Asad, B. Rotor Fault Diagnostic of Inverter Fed Induction Motor Using Frequency Analysis / B. Asad, T. Vaimann, A. Belahcen, A. Kallaste, A. Rassolkin // In *Proceedings of the 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. – 2019. – P. 127–133.
65. Bacha, K. Induction machine fault detection using stray flux EMF measurement and neural network-based decision / K. Bacha, H. Henao, M. Gossa, G.-A. Capolino // *Electric Power Systems Research*. – 2008. – No. 78. – P. 1247-1255. DOI: 10.1016/j.epsr.2007.10.006.
66. Baek, H.-M. Effect of Performance by Excessive Advanced Fuel Injection Timing on Marine Diesel Engine / H.-M. Baek, G.-S. Jung, Q.D. Vuong, J.-U. Lee, J.-W. Lee, // *Appl. Sci.* – 2023. – No. 13 – P. 9263. – DOI: 10.3390/app13169263.
67. Bagheri, B. A hybrid prognostics approach for machine condition monitoring / B. Bagheri, D. Siegel, W. Zhao, J. Lee // *Proceedings of the IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*. – 2018. – DOI: 10.1109/ICPHM.2018.8448849.
68. Boldea, I. *Electric Generators Handbook. Two Volume Set* / I. Boldea. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 1100 p. – DOI: 10.1201/9781315214191.
69. Braga, D. Main causes and dangers of misaligned shafts [электронный ресурс] / Danilo Braga // *Dynamox*. – 2020. – URL: <https://dynamox.net/en/blog/main-causes-and-dangers-of-misaligned-shafts> (дата обращения: 19.03.2025).
70. Breiman, L. *Classification and regression trees* / L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen, C.J. Stone. – New York: Routledge, 2017 – 368 p.
71. Caterpillar Inc. *SR4B Generator Component Descriptions. Service Manual* [электронный ресурс]. URL: <https://epccat.com/doc-t4/71235-component-descriptions-sr4b-generators/> (дата обращения: 28.07.2025).

72. Cerrada, M. A Review on Data-Driven Fault Severity Assessment in Rolling Bearings / M. Cerrada, R. V. Sánchez, C. Li, F. Pacheco, D. Cabrera, J. V. de Oliveira, R. E. Vásquez // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 99. – P. 169-196. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.06.012.
73. Chang, I. Advanced Engine Cooling System for a Gas-Engine Vehicle Part I: A New Coolant Flow Control During Cold Start / I. Chang, M. Sun, D. Edwards // *SAE Technical Paper*. – 2024. – DOI: 10.4271/2024-01-2414.
74. Cristianini, N. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods / N. Cristianini, J. Shawe-Taylor // *Robotica* – 2000. – Vol. 18(6). – P. 687-689. – DOI: 10.1017/S0263574700232827.
75. Dalcalı, A. Demagnetization effects of surface-mounted permanent magnet synchronous wind generator / A. Dalcalı, E. Kurt // *Journal of Energy Systems*. – 2024. – No. 8(1). – P. 63-74. – DOI: 10.30521/jes.1362581.
76. Dibaj, A. Unsupervised anomaly detection of permanent-magnet offshore wind generators through electrical and electromagnetic measurements / A. Dibaj, M. Valavi, A. R. Nejad // *Wind Energ.* – 2024. – Sci. 9. – P. 2063–2086. – DOI: 10.5194/wes-9-2063-2024.
77. Ehrich, F. F. *Handbook of Rotordynamics* / F. F. Ehrich. – 2nd ed. – Malabar, FL: Krieger, 2004. – 671 p.
78. Ehya, H. Pattern Recognition of Inter-Turn Short Circuit Fault in a Synchronous Generator using Magnetic Flux / H. Ehya, A. Nysveen // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2021. – P. 1-1. – DOI: 10.1109/TIA.2021.3072881.
79. Faiz, J. Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis in electrical machines / J. Faiz, K. Gaeid // *IET Energy Systems Integration*. – 2022. – Vol. 4. – No. 4. – P. 437–454.
80. Faiz, J. Extension of Winding Function Theory for Nonuniform Air Gap in Electric Machinery / J. Faiz, I. Tabatabaei // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2002. – Vol. 38 – No. 6. – P. 3654–3657. – DOI: 10.1109/TMAG.2002.804805.

81. Fitzgerald, A.E. Electric Machinery / A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2003. – 648 p.
82. General Service Manual for QSV 81 and 91 16 Bar B.M.E.P gas engines. Daventry: Cummins Engine Company, 2002. – 15 p.
83. Griffiths, D. J. Introduction to Electrodynamics / D. J. Griffiths. – 4th ed. – Boston: Pearson, 2013. – 599 p.
84. Gurugubelli, S. Analysis of Piston Failure: A Review / S. Gurugubelli, S.K. Kuna, K. Gowravarapu // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. – 2022. – Vol. 4. – Issue 11. – DOI: 10.56726/IRJMETs31022.
85. Gurusamy, V. A Stray Magnetic Flux Based Robust Diagnosis Method for Detection and Location of Interturn Short Circuit Fault in PMSM / V. Gurusamy, E. Bostanci, C. Li, Y. Qi, B. Akın // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – P. 1-1. – DOI: 10.1109/TIM.2020.3013128.
86. Hanachi, H. A physics-based modeling approach for performance monitoring in gas turbine engines / H. Hanachi, A. Liu, Y. Banerjee, A. Koul // IEEE Transactions on Reliability. – 2014. – No. 99. – P.1-9. – DOI: 10.1109/TR.2014.2368872.
87. Hanselman, D. C. Brushless permanent magnet motor design / D.C. Hanselman – 2nd ed. – Cranston, RI: Magna Physics Publishing, 2006. – 432 p.
88. Henao, H. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques / H. Henao, G. A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pusca, J. Estima, M. Riera-Guasp, S. H. Kia // Industrial Electronics Magazine, IEEE. – 2014. – no. 8. – P. 31-42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651.
89. Hong, T. Analysis on an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine with a Non-uniform Halbach Array / T. Hong, C. Di, S. Li, X. Bao // IEEE Trans Elec Electron Eng. – 2021. – No. 16. – P. 1239-1247. –DOI6 10.1002/tee.23422.
90. Huang, Z. Remaining useful life prediction for a nonlinear heterogeneous Wiener process model with an adaptive drift / Z. Huang, Z. Xu, W. Wang, Y. Sun //

IEEE Transactions on Reliability. – 2015. – Vol. 64(2). – P. 687–700. – DOI: 10.1109/TR.2015.2403433.

91. Inturi, V. A Review of Digital Twinning for Rotating Machinery / V. Inturi, B. Ghosh, S. G. Rajasekharan, V. Pakrashi // Sensors. – 2024. – No. 24. – P. 5002. – DOI: 10.3390/s24155002.

92. ISO 13373-2:2005 Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data.

93. ISO 8528-9:2017 Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets. Part 9. Measurement and evaluation of mechanical vibrations.

94. ISO 8528-9:2017 Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets. Part 9. Measurement and evaluation of mechanical vibrations.

95. Jin J.-M. The Finite Element Method in Electromagnetics / J.-M. Jin. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2014. – 876 p.

96. Khoury, E. On the Use of Time-Limited Information for Maintenance Decision Support: A Predictive Approach under Maintenance Constraints / E. Khoury, E. Deloux, A. Grall, C. Berenguer // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – No 3. – P. 1–11. – DOI: 10.1155/2013/983595.

97. Kudelina, K. Methods of Condition Monitoring and Fault Detection for Electrical Machines / K. Kudelina, B. Asad, T. Vaimann, A. Rassõlkin, A. Kallaste, H.V. Khang // Energies. – 2021, 14, 7459. – DOI: 10.3390/en14227459.

98. Kudelina, K. Methods of Condition Monitoring and Fault Detection for Electrical Machines / K. Kudelina, B. Asad, T. Vaimann, A. Rassõlkin, A. Kallaste, H.V. Khang // Energies. – 2021. – No. 14. – P. 7459.- DOI: 10.3390/en14227459.

99. LEBW4972-00. Vibration. Application and installation guide. USA: CATERPILLAR, 2005. – 24 p.

100. Li, H. Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Machines: An Overview / H. Li, Z.-Q. Zhu, Z. Azar, R. Clark, Z. Wu // *Energies*. – 2025. – No. 18. – P. 34. – DOI: 10.3390/en18030534.
101. Li, J. Impact of Inter-Turn Short Circuit in Excitation Windings on Magnetic Field and Stator Current of Synchronous Condenser under Unbalanced Voltage / J. Li, C. Zhang, Y. He, X. Hu, J. Geng, Y. Ma // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 5695. – doi: 10.3390/en16155695.
102. Li, S. Study on Few-Shot Fault Diagnosis Method for Marine Fuel Systems Based on DT-SViT-KNN / S. Li, L. Qi, J. Shi, H. Xiao, B. Da, R. Tang, D. Zuo // *Sensors*. – 2025. – No. 25 (6). – DOI: 10.3390/s25010006.
103. Liu J. A data-model-fusion prognostic framework for dynamic system state forecasting / J. Liu, W. Wang, F. Ma, Y. Yang, C. Yang // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2013. – No. 4. – P. 814–823. – DOI: 10.1016/j.engappai.2012.02.015.
104. Liu, J. A multi-step predictor with a variable input pattern for system state forecasting / J. Liu, W. Wang, F. Golnaraghi // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – Vol. 23(5) – P. 1586–1599. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.09.006.
105. Liu, J. An adaptive recurrent neural network for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries / J. Liu, A. Saxena, K. Goebel, B. Saha, W. Wang // *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*. – 2010. – P. 1–29. – DOI: 10.36001/phmconf.2010.v2i1.1896.
106. Logg, A. Automating the finite element method / A. Logg // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2011. – Vol. 14. – DOI: 10.1007/s11831-007-9003-9.
107. Ma, M. Analysis of rotor winding interturn short circuits affected by the initial dynamic eccentricity in large synchronous condensers / M. Ma, Y. Hou, Y. Li, P. He, M. Jiang, Y. Wu // *IET Electr. Power Appl.* – 2022. – Vol. 16(6). – P. 736–748. – DOI: 10.1049/elp2.1219.

108. Mathew, V. Prediction of Remaining Useful Lifetime (RUL) of Turbofan Engine using Machine Learning / V. Mathew, T. Tom, S. Vikram, B. Maheswara, G. Kumar // IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS 2017). – 2017. – DOI: 10.1109/ICCS1.2017.8326010.

109. Mazaheri, E. Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview / E. Mazaheri, J. Faiz // IET Electric Power Applications. – 2021. – Vol. 16. – DOI: 10.1049/elp2.12157.

110. Mazzoletti, M. A. Interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM with partitioned stator windings / M. A. Mazzoletti, G. R. Bossio, C. H. De Angelo // IET Electric Power Applications. – 2021. – Vol. 15. – No. 12. – P. 1670–1683. – DOI: 10.1049/iet-epa.2020.0080.

111. Mortezaei, S. R. Analytical calculation and finite element evaluation of electromagnetic leakage field distribution in surface-mounted permanent magnet synchronous motors taking the rotor eccentricity effect into account / S. R. Mortezaei, M. H. Aliabadi, S. Javadi // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2022. – Vol. 41. – No. 1. – P. 96–124. – DOI: 10.1108/COMPEL-05-2021-0171.

112. Mortezaei, S. R. Eccentricity fault detection in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by analytical prediction, FEM evaluation, and experimental magnetic sensing of the stray flux density / S. R. Mortezaei, M. H. Aliabadi, S. Javadi // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Vol. 589(171441) – DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171441.

113. Ortiz-Medina, R.A. Wavelet and Hilbert Huang Transforms Applied to Park's Vector for Fault Detection in a PMSG Wind Turbine / R.A. Ortiz-Medina, M. Sanabria-Villamizar, I. Lopez-Garcia, F.J. Villalobos-Piña, F. Beltran-Carbajal, V.A. Maldonado-Ruelas // 2023 IEEE 6th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), Popayan, Colombia. – 2023. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/CCAC58200.2023.10333368.

114. Ouali, A. Fault Diagnosis of Inter Turn Short Circuit for Permanent Magnet Synchronous Machine Using Fast Fourier Transform (FFT) / A. Ouali, H. Megherbi,

D.-E. Khodja, Y. Laamari // Proceedings of ICIMPE 2024, October 13-14, University of Oran 2 MBA – LGPMI, Algeria. – 2024.

115. Park, H. H. Impact of Air Gaps Between Microstrip Line and Magnetic Sheet on Near-Field Magnetic Shielding / H. H. Park, E. Song, J. Kim, C. Kim // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – P. 4313. – DOI: 10.3390/electronics13214313.

116. Penrose, H. How precision alignment can transform motor reliability and efficiency [электронный ресурс] / Howard Penrose, Eric Foreman // Reliamag. – 28 янв. 2025. – URL: <https://reliamag.com/articles/precision-alignment-motor-reliability/> (дата обращения: 19.03.2025).

117. Piątkowski, J. The use of Selected Lean Management Tools for Analyzing Defects in Pistons for Internal Combustion Engines / J. Piątkowski, M. Lent-Trepczyńska, A. Krępa, M. Ferdyn // Archives of Foundry Engineering. – 2024. – Vol. 24. – No. 2. – P. 44–49. – DOI: 10.24425/afe.2024.149270.

118. Pietrzak, P. Stator Winding Fault Detection of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on the Short-Time Fourier Transform / P. Pietrzak, M. Wolkiewicz // Power Electronics and Drives. – 2022. – Vol. 7. – No. 42. – DOI: 10.2478/pead-2022-0009.

119. Pyrhonen, J. Design of Rotating Electrical Machines / J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova – 2nd ed. // Chichester: Wiley, 2013. – 616 p.

120. Pyrhönen, J. Design of Rotating Electrical Machines / J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2013.

121. Rajput, J. Data-driven reference evapotranspiration (ET₀) estimation: a comparative study of regression and machine learning techniques / J. Rajput, M. Singh, K. Lal, M. Khanna, A. Sarangi, J. Mukherjee, S. Singh // Environment, Development and Sustainability. – 2023. No. 26. – DOI:10.1007/s10668-023-03978-4.

122. Reinap, A. Hollow Direct Air-Cooled Rotor Windings: Conjugate Heat Transfer Analysis / A. Reinap, S. Estenlund, C. Högmark // Machines. – 2025 – No. 13 – P. 89. – DOI: 10.3390/machines13020089.

123. Ruschetti, C. Rotor demagnetization effects on permanent magnet synchronous machines / C. Ruschetti, C. Verucchi, G. Bossio, C. De Angelo, G. García

// Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 74. – P. 1-8. – DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.001.

124. Saaty, TL. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making / TL Saaty // International series in operations research and management science. – 2016. – No. 233. – P. 363-419. – DOI: 10.1007/0-387-23081-5_9.

125. Salomon, C. A Study of Fault Diagnosis Based on Electrical Signature Analysis for Synchronous Generators Predictive Maintenance in Bulk Electric Systems / C. Salomon, C. Ferreira, W. Sant'Ana, G. Lambert-Torres, E. da Silva Luiz, E. L. Bonaldi, L. Oliveira, B. Torres // Energies. – 2019. – Vol. 12. – 1506 p. – DOI: 10.3390/en12081506.

126. Salomon, C. Electrical Signature Analysis for Condition Monitoring of Permanent Magnet Synchronous Machine / C. Salomon, C. Ferreira, G. Lambert-Torres, C. Teixeira, E. da Silva Luiz, W. Sant'Ana, E.L .Bonaldi, L. Oliveira // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2018. – Vol. 18. – P. 91-98. – DOI: 10.4316/AECE.2018.04011.

127. Schelkunoff, S. A. Electromagnetic Waves / S. A. Schelkunoff. – New York: D. van Nostrand Company Inc., 1943. – 530 p.

128. SEBU7681. Operation and Maintenance Manual. Preliminary Information. G3520C Generator Set. USA: CATERPILLAR, 2002. – 166 p.

129. Selcuk, S. Predictive maintenance, its implementation and latest trends / S. Selcuk // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2017. – No. 231(9). – P. 1670-1679. – DOI: 10.1177/0954405415601640.

130. Shi, C. Analytical Modeling and Analysis of Permanent-Magnet Motor with Demagnetization Fault / C. Shi; L. Peng; Z. Zhang; T. Shi // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – DOI: 10.3390/s22239440.

131. The finite element method for electromagnetic modeling / ed. by Gérard Meunier. Hoboken: ISTE Ltd; Wiley-IEEE Press, 2008. – 560 p. – DOI: 10.1002/9780470611173.

132. Torres, N.N.S. Non-Invasive Techniques for Monitoring and Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Systematic Review / N.N.S. Torres, J. G. Lima, J. N. Maciel, M. Gazziro, A.C.L. Filho, C. R. Souto, F. Salvadori,; O. H. Ando Junior // *Energies*. – 2024. – No. 17. – P. 6164. – DOI: 10.3390/en17236164.

133. Tron, E. Mathematical modeling of observed natural behavior: a fuzzy logic approach / E. Tron, M. Margaliot // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2004. – P. 437–450.

134. Wei, C. Effects of Pilot Oil Injection Timing on Combustion, Covariance and Knocking of a Natural Gas–Diesel Duel-Fuel Low-Speed Engine / C. Wei, X.-X. Chen, L. Chen, P. Li, M. Liu // *Polish Maritime Research*. – 2024. – Vol. 31. – No. 4 (124). – P. 69–75. – DOI: 10.2478/pomr-2024-0051.

135. Yaguo, L. A Model-Based Method for Remaining Useful Life Prediction of Machinery / L. Yaguo, L. Naipeng, G. Szymon, L. Jing, R. Stanislaw, D. Jacek // *IEEE Transactions on Reliability*. – 2017. – Vol. 65(3). P. 1 – 13. – DOI: 10.1109/TR.2016.2570568.

136. Zafarani, M. A Comprehensive Magnet Defect Fault Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Motors / M. Zafarani, T. Goktas, B. Akın // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2015 – Vol. 52. – P. 1331-1339. – DOI: 10.1109/TIA.2015.2487440.

137. Zarei, J. An Advanced Park's Vectors Approach for Bearing Fault Detection / J. Zarei, J. Poshtan // *Tribology International*. – 2006 – Vol. 42. – P. 213-219. – DOI: 10.1016/j.triboint.2008.06.002.

138. **Zayniev, A. V.** Development and Comparison of Methods for Predicting the Technical Condition of Alternators Powered By Gas Piston Engines Based on the Analysis of an Array of Historical Data / **A. V. Zayniev**, V. F. Shaydullin, M. I. Khakimyanov // 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. – 2024. – P. 822-826. – DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718931.

139. **Zayniev, A. V.** Digital Twin for Fault Diagnosis of Gas-Piston Electric Units on the Basis of Multiphysics Approach / **A. V. Zayniev**, M. I. Khakimyanov,

O. I. Nedelchenko // 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. – 2025. – P. 863-869. – DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206603.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты моделирования внешнего магнитного поля СГПМ

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Исправное состояние

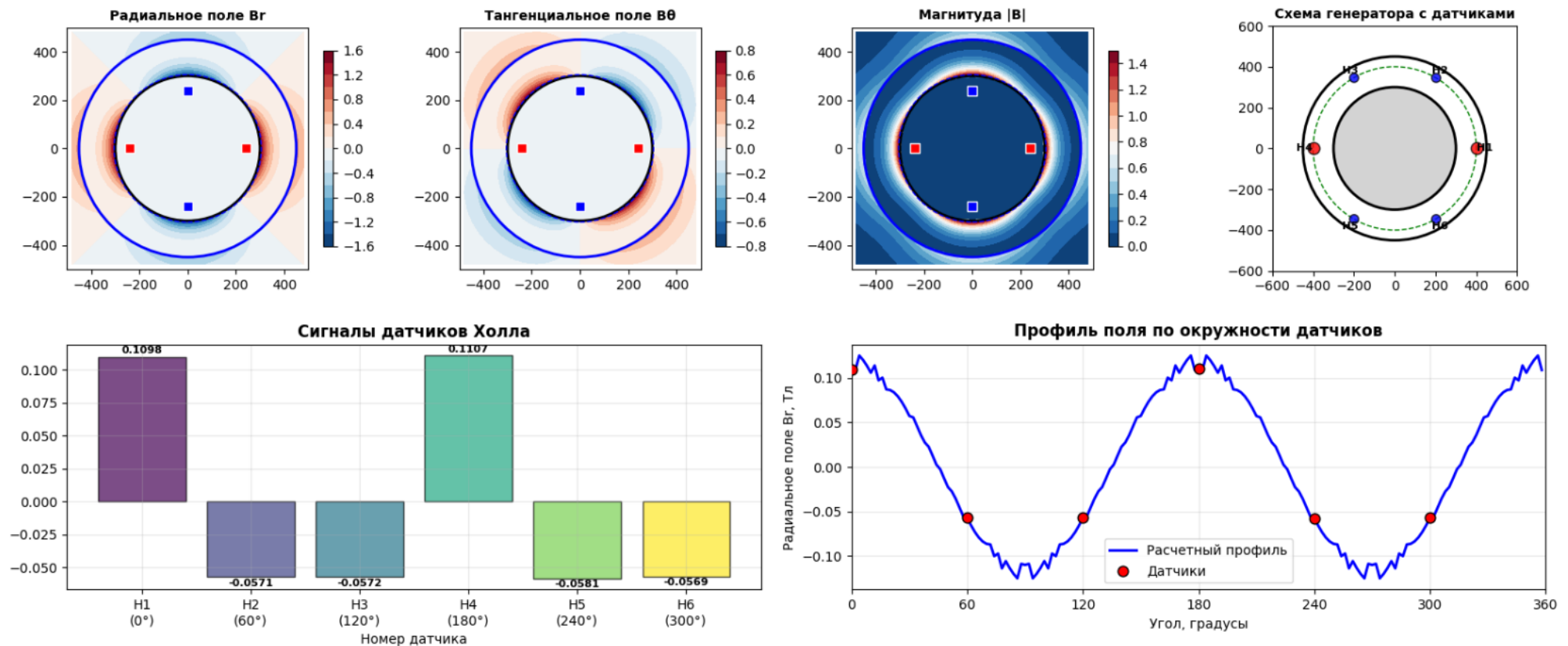


Рисунок А.1 – Распределение магнитного поля и отклики датчиков Холла в модели FEM-тени генератора Caterpillar SR4BHV (исправное состояние)

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Размагничивание 50%

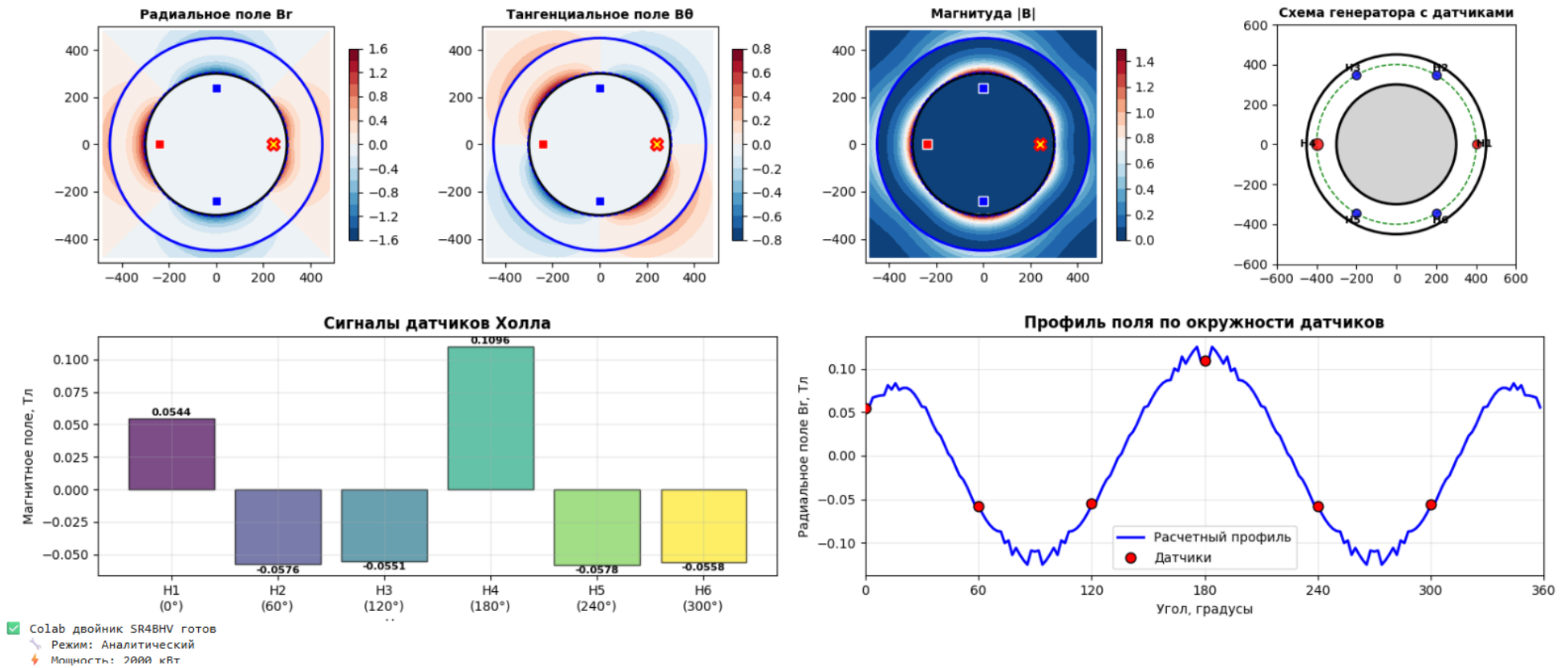


Рисунок А.2 – Моделирование эффекта размагничивания

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Эксцентриситет 40%

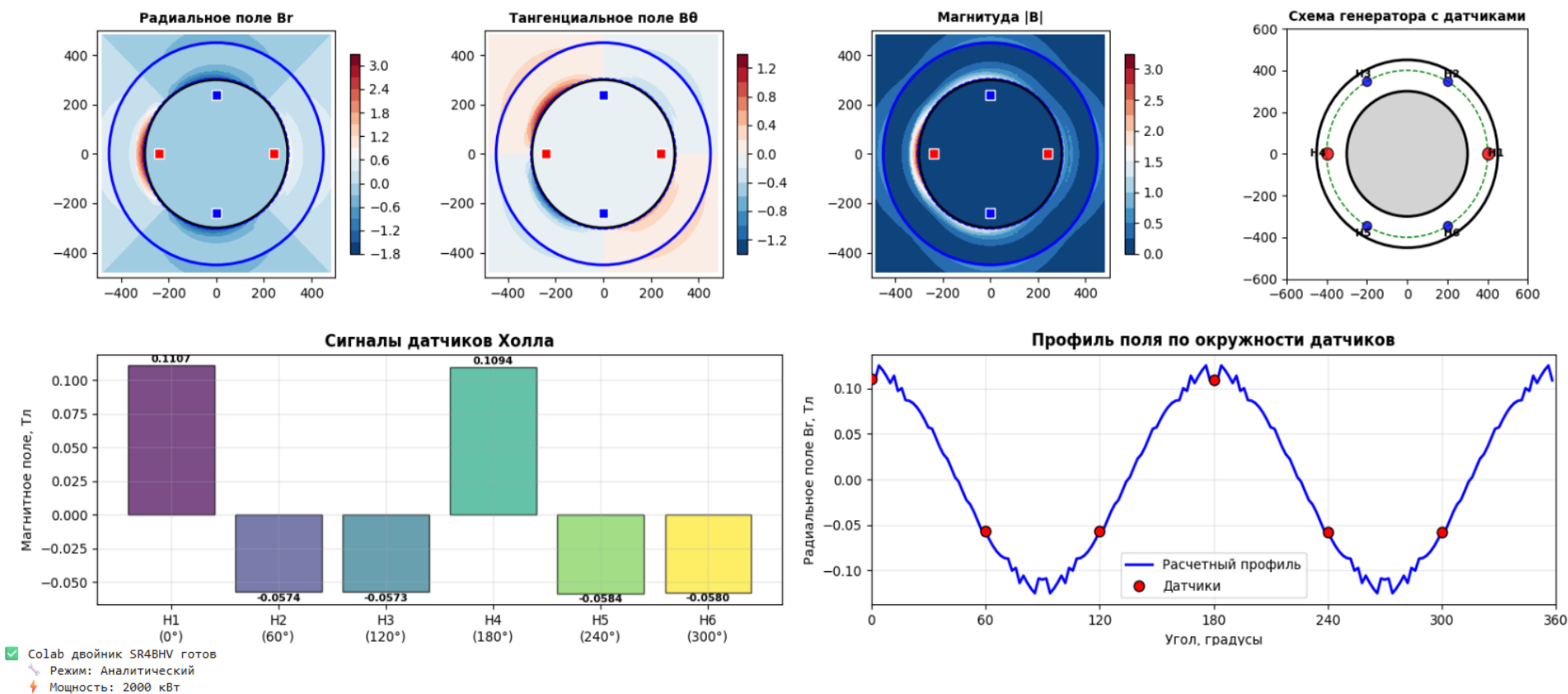


Рисунок А.3 – Моделирование эксцентриситета

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Межвитковое КЗ 30%

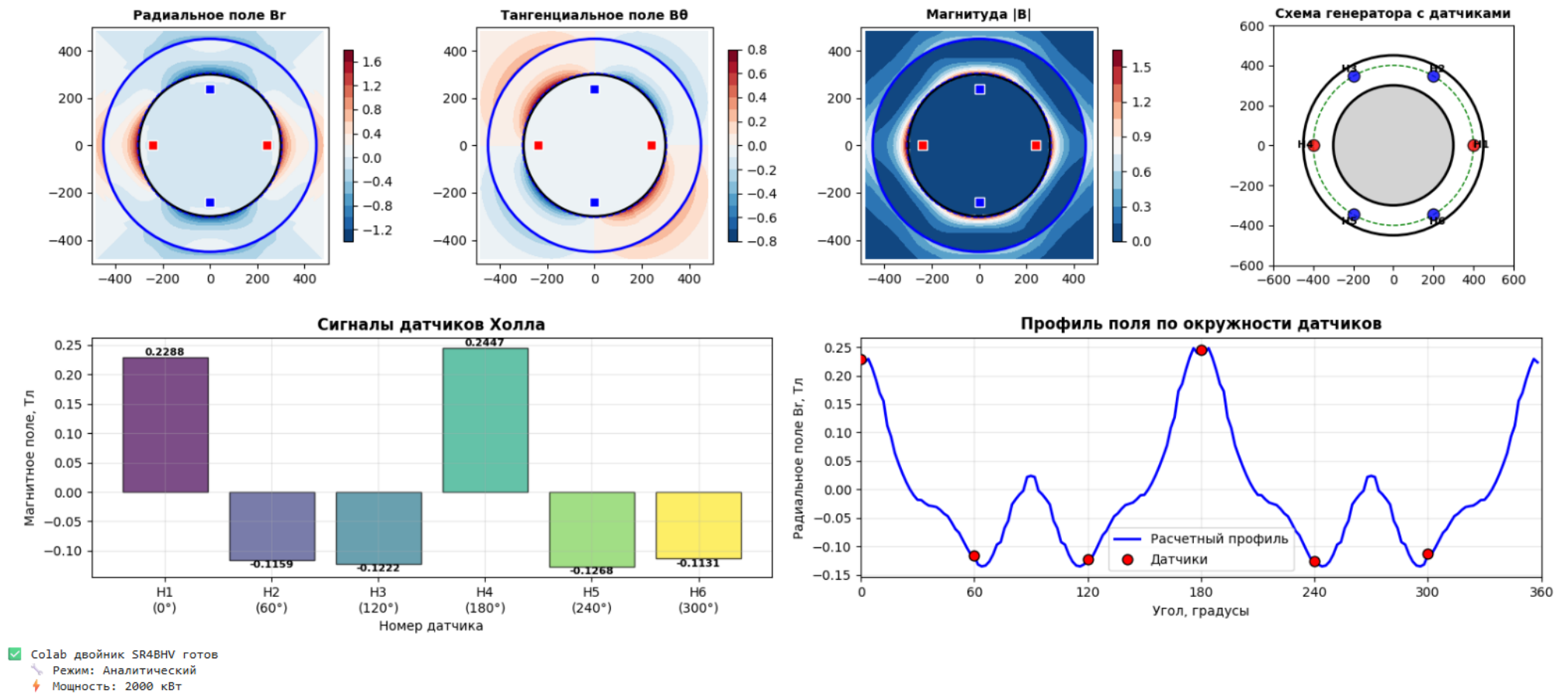


Рисунок А.4 – Моделирование межвиткового замыкания

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Подшипник 35%

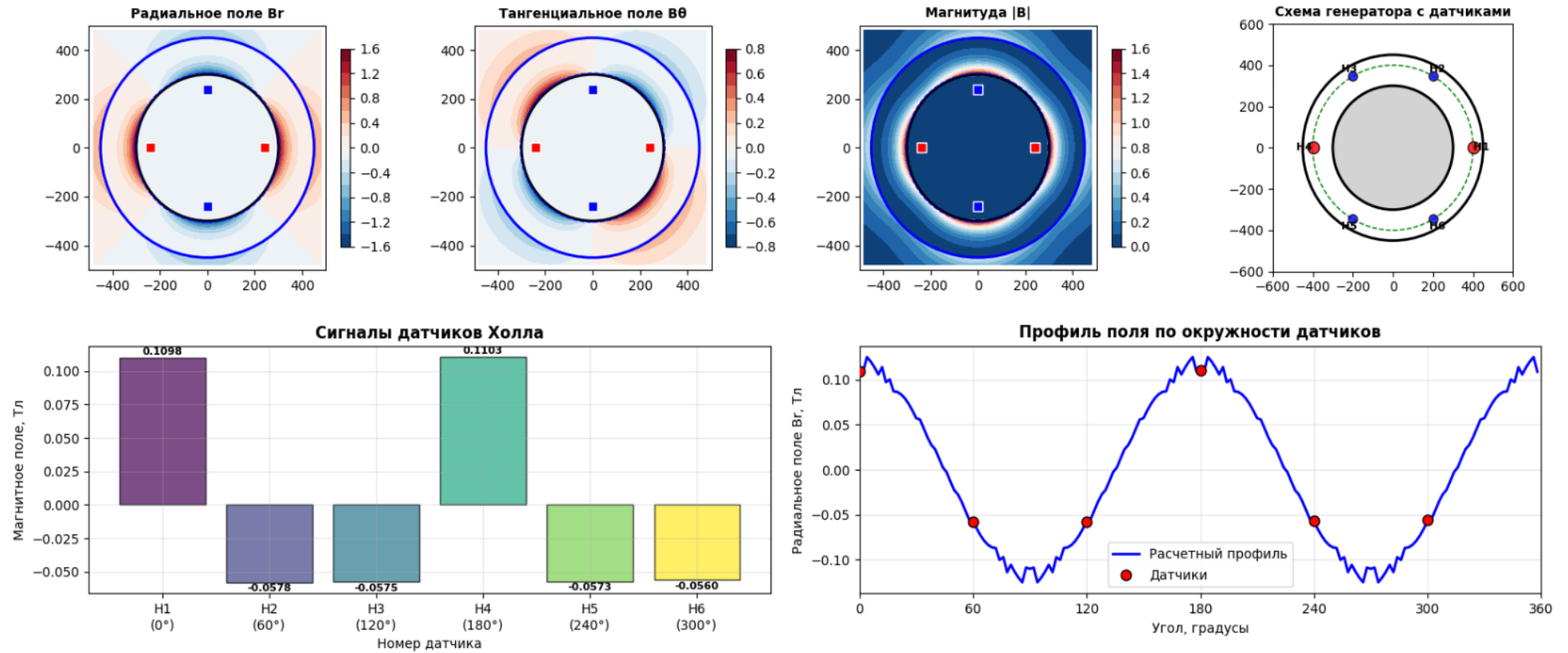


Рисунок А.5 – Моделирование дефекта подшипника

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Дисбаланс 50%

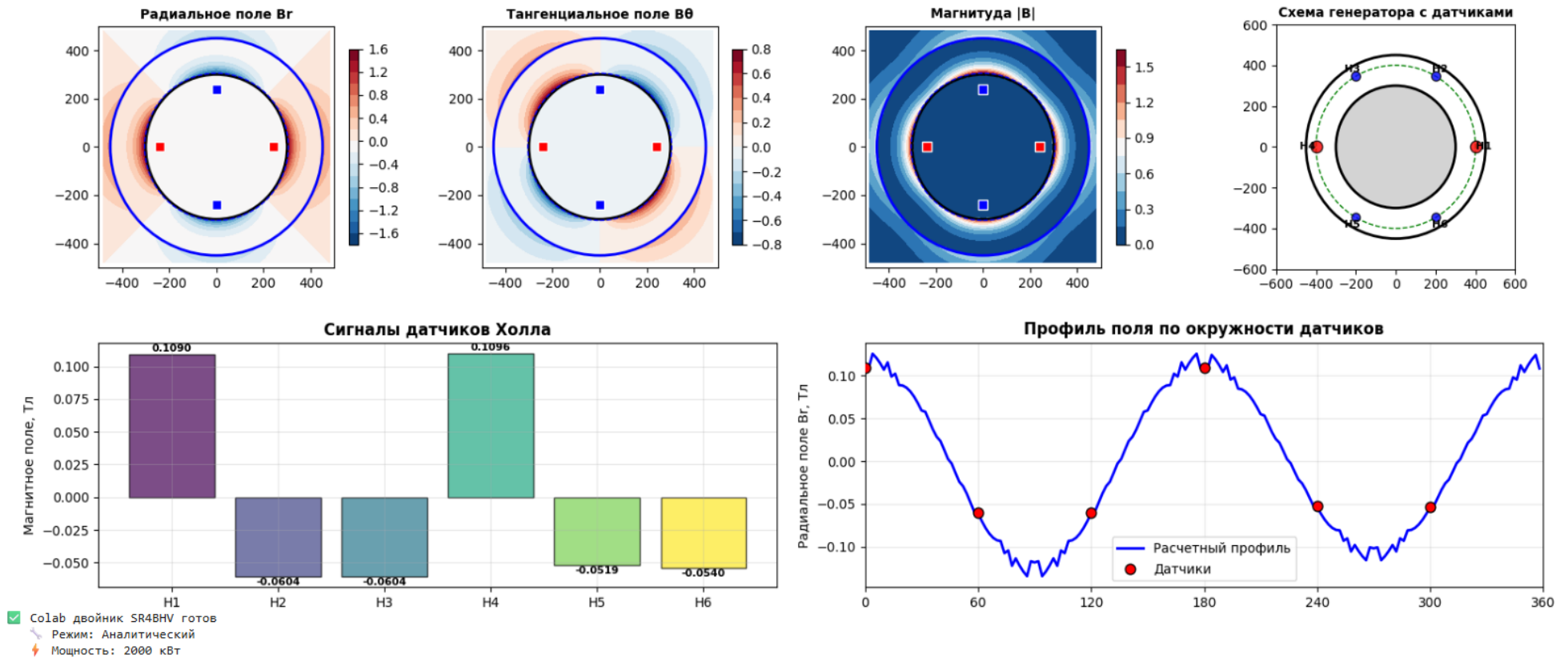


Рисунок А.6 – Моделирование дефекта дисбаланса ротора

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Размагничивание 40%, Эксцентриситет 30%

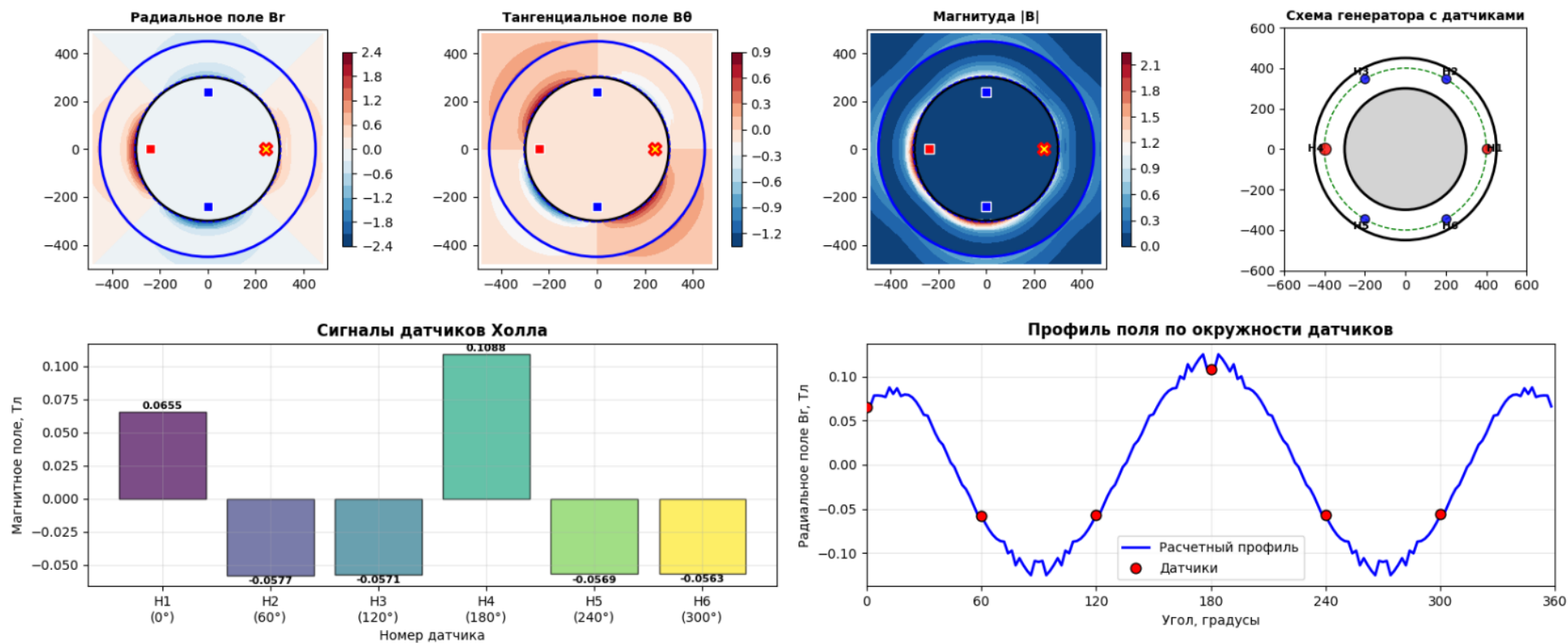


Рисунок А.7 – Пример комбинированного дефекта (размагничивание 40% и дисбаланс 50%)

FEM Двойник Caterpillar SR4BHV (Colab) - Межвитковое КЗ 40%, Дисбаланс 30%

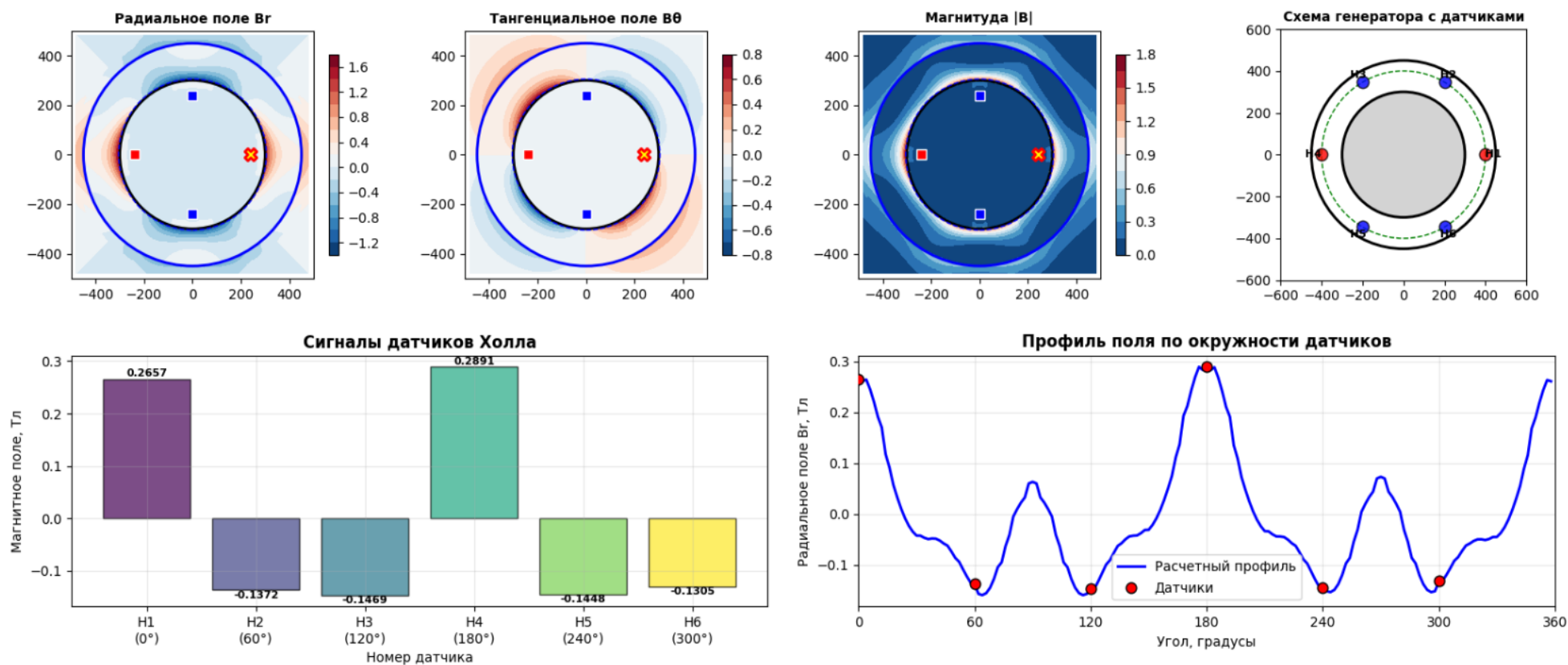


Рисунок А.8 – Пример комбинированного дефекта (межвитковое КЗ 40% и дисбаланс ротора 30)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример диагностического отчета цифровой тени Диагностический отчёт цифровой тени ГПЭА №6

Частоты подшипников (расчётные значения)

$f_{rot}=25.0$ Гц; $N=12$; $d=34.0$ мм; $Dp=280.0$ мм; $\theta=0.0^\circ$

- BPF1: 168.21 Гц
- BPFO: 131.79 Гц
- BSF: 101.42 Гц
- FTF: 10.98 Гц

Максимальные отклонения сигналов от эталона

Сигнал vibration, максимальное отклонение: 12.3689

Сигнал voltage, максимальное отклонение: 8.6685

Сигнал flux, максимальное отклонение: 1.6612

Частотный и фазовый анализ

- Сигнал vibration: доминирующие частоты: 25.0, 50.0, 146.0, 160.0, 209.0, 240.0, 320.0 Гц; обнаружены дополнительные частоты; фазовый сдвиг на базовой частоте: 239.1°.
- Сигнал voltage: доминирующие частоты: 50.0, 250.0 Гц; обнаружены дополнительные частоты; фазовый сдвиг на базовой частоте: 204.8°.
- Сигнал flux: доминирующие частоты: 50.0, 150.0, 250.0 Гц; обнаружены дополнительные частоты; фазовый сдвиг на базовой частоте: 43.8°.

Результаты корреляционного анализа

Корреляции эталона

Эталонная корреляция между vibration и voltage: 0.1109

Эталонная корреляция между vibration и flux: -0.0426

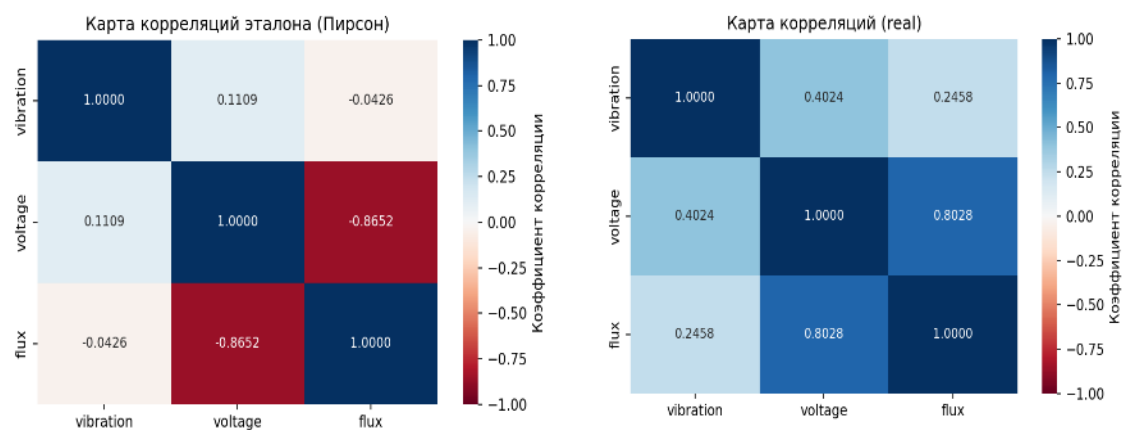
Эталонная корреляция между voltage и flux: -0.8652

Корреляции реального сигнала

Корреляция между vibration и voltage: 0.4024

Корреляция между vibration и flux: 0.2458

Корреляция между voltage и flux: 0.8028



Карта корреляций (эталон)

Карта корреляций (real)

Сводка по светофору

- Механика: подшипниковые признаки выше порогов
- Электрика: $H5/H1=0.30$, $H3/H1=0.02$ (выше порогов)

Светофор признаков – что сработало сейчас

Признак	Порог	Факт
Электрo: $H5/H1$ в U	≥ 0.25	0.30
($\approx 250/50$ Гц)		
Электрo: $H3/H1$ в U	≥ 0.15	0.02
($\approx 150/50$ Гц)		
Магнит: A150/A50 в Ф	≥ 0.60	0.40
Магнит: A250/A50 в Ф	≥ 0.30	0.20
Магнит: A350/A50 в Ф	≥ 0.15	0.00

Статус

✓ ОК

✗ –

✗ –

✗ –

✗ –

Магнит (эксцентриситет): $(A_{50} \pm f_{rot})/A_{50}$	≥ 0.10	0.00	✗ –
Магнит (эксцентриситет): A_{frot}/A_{50}	≥ 0.15	0.00	✗ –
DEMAG (строгий): падение A50 и нечётные ↑	$\Delta \geq 0.35$ И ($A_{150}/A_{50} \geq 0.60$ ИЛИ $A_{250}/A_{50} \geq 0.30$ ИЛИ $A_{350}/A_{50} \geq 0.15$)	$\Delta = -0.00$, $A_{150}/A_{50} = 0.40$, $A_{250}/A_{50} = 0.20$, $A_{350}/A_{50} = 0.00$	✗ –

Сводная оценка каналов

Канал	Статус
Механика	✓ OK
Электрика	✓ OK
Магнит	⚠ Порог±

Легенда: ✓ соответствует порогу • ⚠ почти • ✗ ниже порога

Итог гейтинга: механика=да; электро=да; магнит=нет.

Класс вердикта: Комбинированные неисправности: мех+эл

Обнаруженные аномалии

- - Сигнал: vibration, максимальная длительность аномалии: 17.655 с, средняя амплитуда отклонений: 4.87, степень: Серьёзное
- - Сигнал: voltage, максимальная длительность аномалии: 18.000 с, средняя амплитуда отклонений: 5.78, степень: Среднее
- - Сигнал: flux, максимальная длительность аномалии: 0.000 с, средняя амплитуда отклонений: 0.00, степень: Нет аномалий

★ Распознанные признаки (частотный анализ)**Вибрация**

- BPFO (131.79 Гц): не выявлено: Частоты подшипников не выявлены, дефекты подшипников отсутствуют.
- BSF (101.42 Гц): не выявлено: Частоты подшипников не выявлены, дефекты подшипников отсутствуют.
- FTF (10.98 Гц): не выявлено: Частоты подшипников не выявлены, дефекты подшипников отсутствуют.
- BPFI (168.21 Гц): не выявлено: Частоты подшипников не выявлены, дефекты подшипников отсутствуют.

Напряжение

- Основная гармоника напряжения (50Гц): Базовая 50 Гц присутствует.
- 5-я гармоника напряжения (≈ 250 Гц): обнаружено ($H5/H1=0.30$)
- Электрическая неисправность: Обнаруженные аномалии свидетельствуют о проблемах в электрической части системы, таких как искажения сигнала или сбои в генерации.

Магнитное поле

Сводка: $A_{150}/A_{50}=0.40$, $A_{250}/A_{50}=0.20$, $A_{350}/A_{50}=0.00$

Корреляции: $\text{corr}(\text{vib}, \text{volt})=0.4024$, $\text{corr}(\text{vib}, \text{flux})=0.2458$, $\text{corr}(\text{volt}, \text{flux})=0.8028$

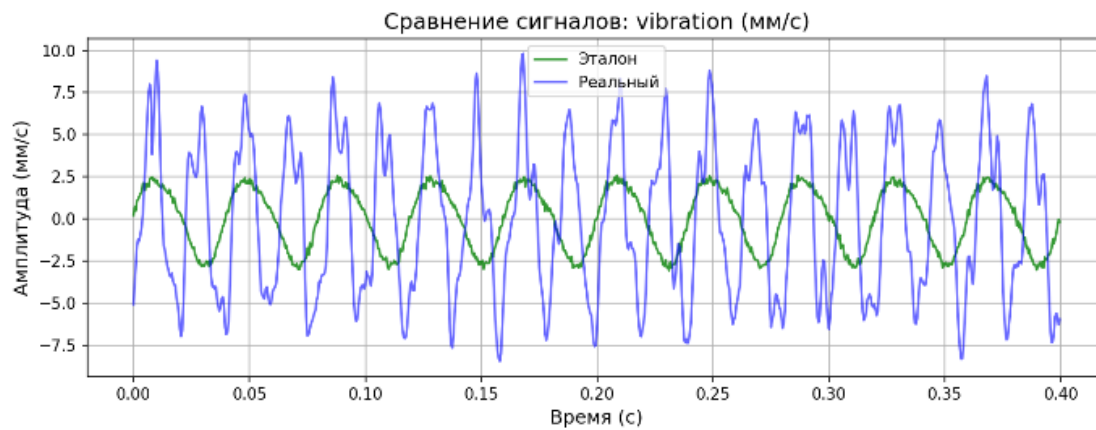
Комбинированные неисправности

Комбинированная неисправность: мех+эл: Совмещение механических и электрических аномалий, что может быть связано с износом подшипников и эксцентриситетом ротора.

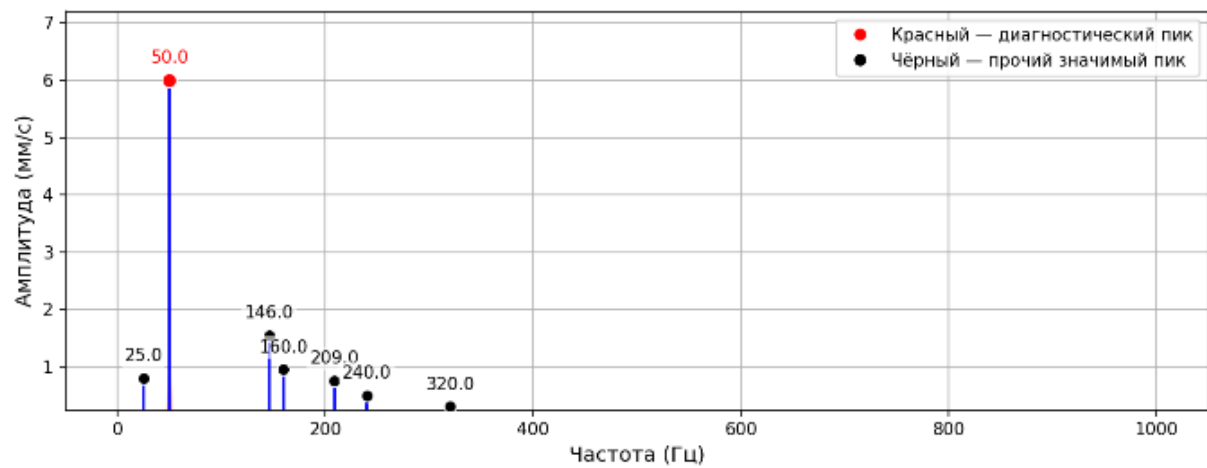
Временные интервалы отклонений

- vibration: 0.000с, 0.001с, 0.001с, 0.002с, 0.002с, 0.003с, 0.003с, 0.004с, 0.004с, 0.005с...
- voltage: 0.001с, 0.001с, 0.002с, 0.002с, 0.003с, 0.003с, 0.004с, 0.004с, 0.005с, 0.005с...

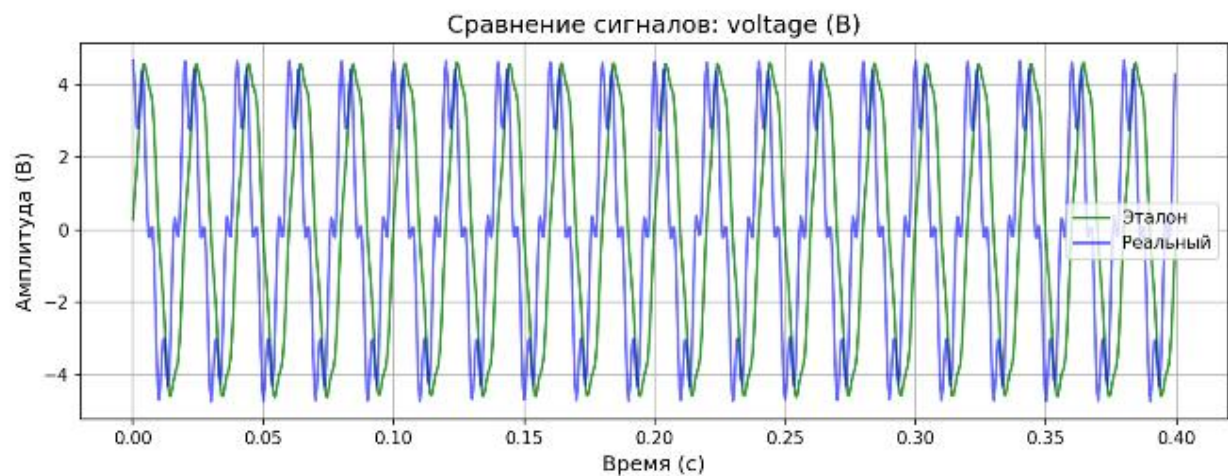
Сигнал: vibration



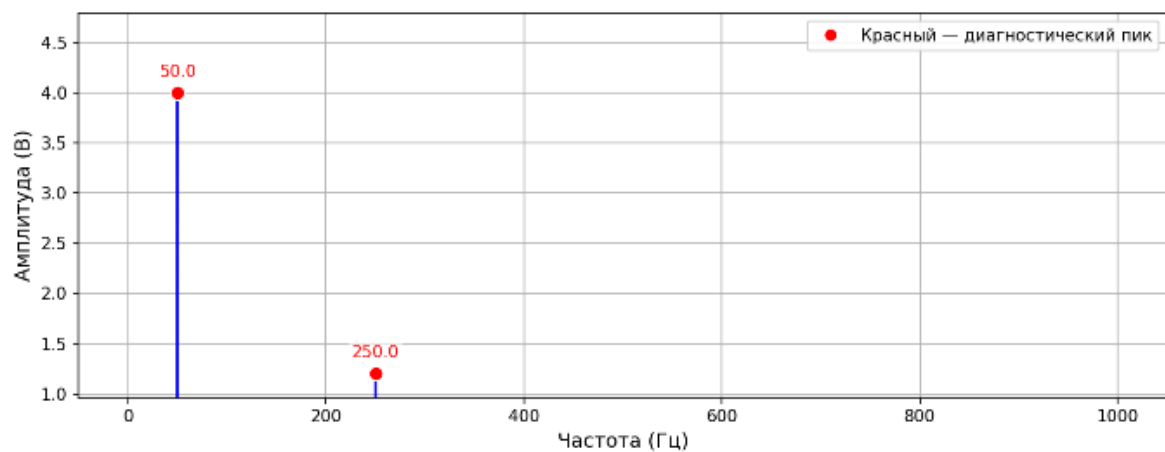
Спектр сигнала: vibration



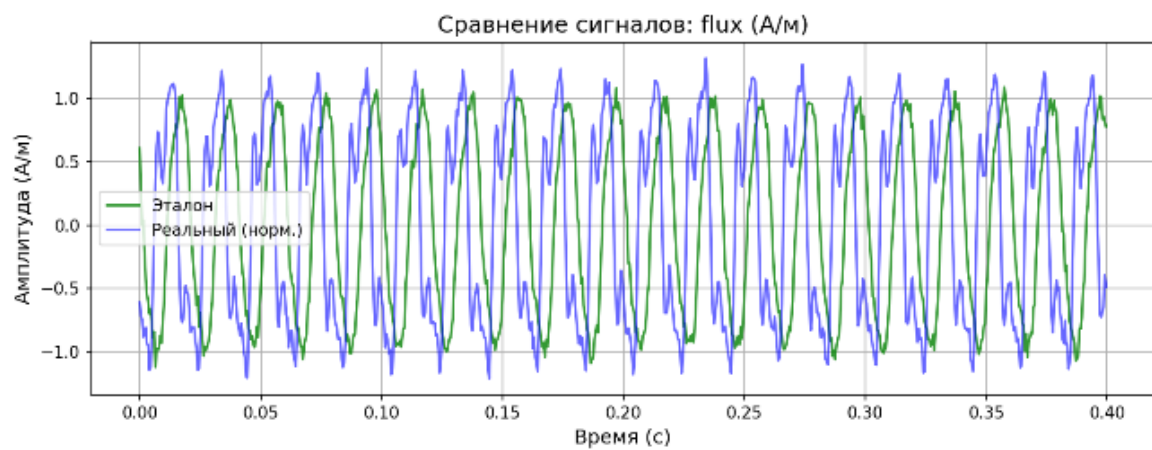
Сигнал: voltage



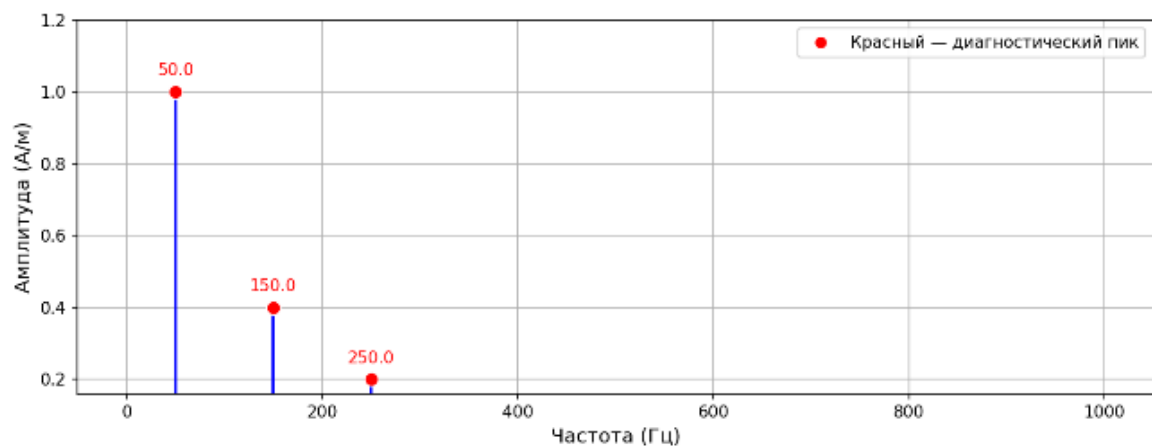
Спектр сигнала: voltage



Сигнал: flux



Спектр сигнала: flux



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025688300

**Цифровая модель внешнего магнитного поля
синхронного генератора с возбуждением от постоянных
магнитов для диагностики неисправностей**

Правообладатель: *Зайниев Азат Венерович (RU)*Авторы: *Зайниев Азат Венерович (RU), Хакимьянов Марат
Ильгизович (RU)*

Заявка № 2025687481

Дата поступления 06 октября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 октября 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570c4f7da1515531b4d8618e75f29505
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 04.09.2023 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2851765

**Способ контроля технического состояния
газопоршневого электроагрегата в эксплуатации**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Уфимский государственный нефтяной технический
университет" (RU)*

Авторы: *Зайниев Азат Венерович (RU), Хакимьянов Марат
Ильгизович (RU)*

Заявка № 2025107065

Приоритет изобретения 24 марта 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 ноября 2025 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 марта 2045 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a575e177a38d531b4b8818675f29505
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.3026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2837784

Способ контроля технического состояния газопоршневого агрегата в эксплуатации

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет" (RU)*

Авторы: *Хакимьянов Марат Ильгизович (RU), Зайниев Азат Венерович (RU), Шайдуллин Венер Фанусович (RU)*

Заявка № 2024111130
Приоритет изобретения 22 апреля 2024 г.
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 04 апреля 2025 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 22 апреля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат: СерЗет0006200015404016700002026
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю. С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025662535

**Цифровой двойник для диагностики неисправностей
газопоршневых электроагрегатов на основе
мультифизического подхода**

Правообладатель: *Зайниев Азат Венерович (RU)*Авторы: *Зайниев Азат Венерович (RU), Хакимьянов Марат
Ильгизович (RU)*

Заявка № 2025661341

Дата поступления 07 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 06F56707063006E5A724C16700ca2C06
Подписан: **Зубов Ю.С.** Сергеевич
Действителен с 14.01.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024687948

Определение надежности элементов газопоршневого агрегата методом анализа иерархий

Правообладатель: *Зайниев Азат Венерович (RU)*

Авторы: *Зайниев Азат Венерович (RU), Хакимьянов Марат Ильгизович (RU)*



Заявка № 2024686911

Дата поступления 07 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 ноября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сергей Сергеевич Зубин
Идентификатор: Зубин Сергей Сергеевич
Срок действия: 2020-01-01 по 2025-12-31

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024689233

**Определение индекса технического состояния
газопоршневого агрегата с синхронным генератором
переменного тока**

Правообладатель: *Зайниев Азат Венерович (RU)*

Авторы: *Зайниев Азат Венерович (RU), Хакимьянов Марат
Ильгизович (RU)*

Заявка № 2024686941
Дата поступления 07 ноября 2024 г.
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 04 декабря 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 0022e702e6300c66402401870b0ca2028
Подпись: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 01.01.2004 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Башнефть-Добыча»

Республика Башкортостан,
Общество с ограниченной ответственностью
«Башнефть-Добыча»
450052, Российская Федерация,
Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. К.Маркса, д. 30/1
тел. +7 347 262-26-07, 262-29-86
факс +7 347 262-24-56, 262-21-39
ИНН 0277106840 КПП 997250001
ОГРН 1090280032699



Башкортостан Республикаһы,
«Башнефть-Добыча»
Яуаллыһы сикланған йамаһыте
450052, Ресей Федерацияһы,
Башкортостан Республикаһы, Өфө ҡалаһы,
Карл Маркс ур., 30/1
тел. +7 347 262-26-07, 262-29-86
факс +7 347 262-24-56, 262-21-39
ИНН 0277106840 КПП 997250001
ОГРН 1090280032699

Утверждаю
Заместитель главного инженера –
главный энергетик
ООО «Башнефть-Добыча»



И.М. Туктамышев
20.05.2017г.

Акт № МЛ-12658 о внедрении результатов диссертационной работы

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Начальник Управления генерации Лукманов М.Р.;

Члены комиссии:

Главный специалист отдела генерации Управления генерации Давлиев А.В.;
Начальник Участка по ремонту и обслуживанию газопоршневых электростанций
Нурмухаметов Р.М.,
составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы
аспиранта ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет» Зайниева Азата Венеровича.

1. Диссертация выполнена на тему: «Система контроля технического состояния и диагностики газопоршневых электроагрегатов нефтегазовых предприятий».
2. Шифр и название специальности: 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».
3. Внедрённые результаты исследований: цифровая тень газопоршневого электроагрегата для применения мультифизического подхода к техническому диагностированию.
4. Направление использования результатов исследований: комплексное техническое диагностирование газопоршневых электроагрегатов.

Начальник Управления генерации

М.Р. Лукманов

Главный специалист отдела генерации
Управления генерации

А.В. Давлиев

Начальник Участка по ремонту и обслуживанию
газопоршневых электростанций

Р.М. Нурмухаметов

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «Башнефть-Добыча»

Республика Башкортостан,
Общество с ограниченной ответственностью
«Башнефть-Добыча»
450052, Российская Федерация,
Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. К.Маркса, д. 30/1
тел. +7 347 262-26-07, 262-29-86
факс +7 347 262-24-56, 262-21-39
ИНН 0277106840 КПП 997250001
ОГРН 1090280032699



Башкортостан Республикаһы,
«Башнефть-Добыча»
Яуаплылығы сикланган йәмғиәте
450052, Рәсәй Федерацияһы,
Башкортостан Республикаһы, Өфө ҡалаһы,
Карл Маркс ур., 30/1
тел. +7 347 262-26-07, 262-29-86
факс +7 347 262-24-56, 262-21-39
ИНН 0277106840 КПП 997250001
ОГРН 1090280032699

Утверждаю
Заместитель главного инженера –
главный энергетик
ООО «Башнефть-Добыча»



И.М. Туктамышев
2024г.

**Акт № МЛ-40789
о внедрении результатов диссертационной работы**

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Начальник Управления генерации Лукманов М.Р.;

Члены комиссии:

Главный специалист отдела генерации Управления генерации Давлиев А.В.;

Начальник Участка по ремонту и обслуживанию газопоршневых электростанций
Нурмухаметов Р.М.,

составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы
аспиранта ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет» Зайниева Азата Венеровича.

1. Диссертация выполнена на тему: «Система контроля технического состояния и диагностики газопоршневых электроагрегатов нефтегазовых предприятий».
2. Шифр и название специальности: 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».
3. Внедрённые результаты исследований: модель оценки и прогнозирования индекса технического состояния газопоршневого электроагрегата на основе нечеткой логики.
4. Направление использования результатов исследований: применение стратегии технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию.

Начальник Управления генерации

 М.Р. Лукманов

Главный специалист отдела генерации
Управления генерации

 А.В. Давлиев

Начальник Участка по ремонту и обслуживанию
газопоршневых электростанций

 Р.М. Нурмухаметов

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «РН-Ванкор»

Утверждаю
Заместитель начальника производственно-диспетчерского управления – начальник производственно-диспетчерской службы
ООО «РН-Ванкор»

 И.В. Бубенков
«20» сентября 2024 г.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Начальник электростанции собственных нужд "ТПЭС" ООО «РН-Ванкор» - Закиров Руслан Зайтунович;

Члены комиссии:

Начальник отдела генерации управления генерации ООО «РН-Ванкор» - Воробьев Алексей Сергеевич;

Начальник сектора газопоршневых электростанций отдела генерации управления генерации ООО «РН-Ванкор» - Новосёлов Глеб Олегович;

составила настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» Зайниева Азата Венеровича.

1. Диссертация выполнена на тему: «Система контроля технического состояния и диагностики газопоршневых электроагрегатов нефтегазовых предприятий».
2. Шифр и название специальности: 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».
3. Внедрённые результаты исследований: цифровая тень газопоршневого электроагрегата для применения мультифизического подхода к техническому диагностированию.
4. Направление использования результатов исследований: комплексное техническое диагностирование газопоршневых электроагрегатов ЭСН ТПЭС-42 МВт.

Начальник ЭСН «ТПЭС»
управления генерации

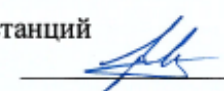
Начальник отдела генерации
управления генерации

Начальник сектора газопоршневых электростанций
отдела генерации управления генерации



 Закиров Р.З.

 Воробьев А.С.

 Новосёлов Г.О.