

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Юхра Ривас Эдди



ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И
ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ
ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат химических наук
Вячеславов А.В.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОТУРБИНЫ С УЧЕТОМ НАГРУЗОК, ДЕФОРМАЦИЙ И МЕТОДОВ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ.....	15
1.1 Анализ эксплуатационных стадий и основ нагружения высоконапорных радиально-осевых турбин.....	15
1.1.1 Механические напряжения и деформации в крышке гидротурбины	17
1.1.2 Механические напряжения в крепежных шпильках крышки гидротурбины	19
1.1.3 Деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины	22
1.2 Методы и приборы контроля деформации крышки гидротурбины и ее крепежных шпилек.....	26
1.2.1 Методы и приборы контроля деформаций крышки гидротурбины	27
1.2.2 Методы и приборы контроля механической нагрузки крепежных шпилек ...	30
1.2.3 Методы и приборы контроля деформации крепежных шпилек	31
1.3 Функциональные неисправности датчиков и их характеристики.....	34
1.3.1 Основные типы неисправности датчиков и причины их возникновения	34
1.4 Критический анализ методов обеспечения достоверности результатов измерений в измерительных системах	36
1.4.1 Самокалибровка.....	37
1.4.2 Онлайн-мониторинг калибровки	38
1.4.3 Самовалидирующийся датчик	39
1.4.4 Метрологический самоконтроль.....	41
1.5 Оценка функции метрологического самоконтроля системы контроля деформации крепежных шпилек	43
1.6 Выводы по главе 1	45

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ..... 47

2.1 Теоретические основы применения принципа аналитической избыточности к рассматриваемой задаче..... 47

2.1.1 Анализ применимости принципа временной избыточности к системе контроля осевой деформации крепежных шпилек..... 47

2.1.2 Анализ применимости принципа аналитической избыточности к системе контроля осевой деформации крепежных шпилек 49

2.2 Разработка опорных моделей для формирования дополнительной информации датчиков осевой деформации..... 51

2.2.1 Физическо-математическое моделирование динамики деформации крепежных шпилек 52

2.2.2 Эмпирическое моделирование динамики деформации крепежных шпилек на основе экспериментальных данных 54

2.2.3 Оценка неопределенности эмпирических моделей 55

2.2.4 Улучшение оценки состояния осевой деформации крепежных шпилек с использованием фильтра Калмана..... 57

2.3 Формирование невязок на основе аналитической избыточности 60

2.3.1 Невязки при неисправности типа «смещение» 60

2.3.2 Невязки при неисправности типа «дрейф» 60

2.3.3 Невязки при неисправности типа «деградация точности» 61

2.3.4 Невязки при неисправности типа «залипание» 61

2.4 Разработка методологии обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины 62

2.4.1 Обнаружение неисправностей 62

2.4.2 Локализация неисправностей.....	65
2.4.3 Классификация типа неисправности.....	65
2.4.4 Диагностика неисправностей.....	66
2.5 Выводы по главе 2	66
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК	68
3.1 Описание крепления крышки гидротурбины и системы сбора данных.....	68
3.1.1 Характеристика гидротурбины и ее крышки	68
3.1.2 Система измерения и расположения датчиков	68
3.1.3 Условия проведения измерений осевой деформации	69
3.2 Методика реализации принципа аналитической избыточности и построения опорных моделей.....	70
3.2.1 Формирование эмпирических моделей динамики деформации шпилек	73
3.2.2 Процедура оценки погрешности прогнозных моделей.....	74
3.2.3 Методика оценки неопределенности эмпирических моделей.....	75
3.2.4 Применения фильтра Калмана к эмпирическим моделям	77
3.3 Методика и результаты валидации опорных моделей.....	80
3.3.1 Имитация факторов, влияющих на результаты измерений.....	80
3.3.2 Метрики оценки качества опорных моделей.....	81
3.3.3 Результаты валидации опорных моделей.....	83
3.4 Исследование отклика опорных моделей на неисправности датчиков	87
3.4.1 Моделирование типов неисправностей.....	87
3.4.2 Процедура проведения испытаний с имитацией неисправностей.....	89
3.4.3 Результаты отклика опорных моделей на неисправности датчиков	90

3.5 Методика обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации	92
3.5.1 Пороговые правила обнаружения неисправностей	92
3.5.2 Локализация неисправного датчика	95
3.5.3 Классификация неисправного датчика	96
3.5.4 Диагностика неисправного датчика	97
3.6 Разработка алгоритма автоматического обнаружения и диагностики неисправности датчиков осевой деформации	98
3.7 Проверка разработанного алгоритма в условиях, имитирующих функциональные неисправности	100
3.8 Выводы по главе 3	106
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ НА ГЭС	108
4.1 Анализ работоспособности опорных моделей для оценки осевой деформации крепежных шпилек.....	108
4.2 Анализ обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации системы контроля.....	111
4.3 Рекомендации по интеграции метода в системы мониторинга ГЭС.....	115
4.4 Ограничения разработанного метода и его интеграции.....	117
4.5 Выводы по главе 4	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов исследования в деятельность ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	134

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов исследования в учебный процесс Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II 136

ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Обеспечение надежности и безопасности гидроэлектростанций (далее – ГЭС), включая гидроагрегаты, является приоритетной задачей электроэнергетики. Гидроагрегат (далее – ГА) состоит из двух основных частей: генератора и гидравлической турбины (далее – гидротурбины). Одним из ключевых элементов конструкции гидротурбины является ее крышка, которая обеспечивает функционирование и надежность ГА, выполняя функции несущего элемента, уплотнения и основания для крепления ответственных узлов. В процессе эксплуатации ГА крышка гидротурбины и ее крепежные шпильки подвергаются экстремальным нагрузкам, обусловленным пусковыми режимами, сбросом нагрузки и нестационарными гидродинамическими явлениями (гидроудар, вихревые жгуты). Накопление усталостных повреждений в данных ответственных элементах может привести к аварийным ситуациям, что подтверждается известными техногенными катастрофами. В этой связи применение систем непрерывного контроля деформации шпилек крышки гидротурбины является необходимым условием безопасной эксплуатации ГА.

Современные системы контроля осевой деформации шпилек измеряют перемещение их концов относительно калибровочных стержней, установленных в шпильках (внутри шпильки), с помощью датчиков линейного перемещения.

Достоверность результатов измерений, получаемых от таких систем, традиционно обеспечивалась их периодической поверкой или калибровкой в лабораторных условиях. Однако, вследствие непрерывного режима работы ГА и сложности демонтажа датчиков межповерочный интервал установлен в четыре года. Это создает риск снижения достоверности контроля деформации крепежных шпилек из-за несвоевременно выявленных неисправностей датчиков.

Существующие функции метрологического самоконтроля в таких системах, основанные на принципе структурной избыточности (сравнение показаний нескольких датчиков, измеряющих одну физическую величину, с опорным

значением), позволяют лишь обнаруживать неисправности типа «залипание» и не гарантируют правильного технического состояния датчиков.

Таким образом, в представленном исследовании решается проблема отсутствия методов диагностики технического состояния датчиков, что необходимо для повышения достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации ГА.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы напряженно-деформированного состояния элементов гидротурбин, включая крепежные шпильки крышки гидротурбины, исследованы достаточно широко. Значительный вклад в моделирование механических напряжений в крышке и ее крепеже с использованием метода конечных элементов внесли ученые Z. Wang, S. Yang, Y. Xu, W. Zhao, А.Е. Буров и Е.А. Стрельникова. Особенности деформации шпилек под действием статических и динамических нагрузок, а также влияние конструктивных параметров фланцевого соединения крышки изучены в работах Q. Zhao, J. Cao, F. Chen, S. Ren и Y. Luo. Разработкой методов и средств измерений для контроля механических напряжений и деформаций крепежных шпилек занимались В.В. Михалев, В. Шубарев, В. Мельников, Ф.В. Молев, А.Г. Сергушев и другие исследователи. Несмотря на то, что теоретические основы обеспечения достоверности результатов измерений за счет структурной, функциональной и временной избыточности заложены в трудах U. Frühauf, Н.М. Hashemian, Y. Chen, M. Wang, Р.Е. Тайманова и К.С. Сапожниковой, их применение в системе контроля деформации крепежных шпилек сталкивается с серьезными ограничениями.

В соответствии с ГОСТ Р 8.734, регламентирующим создание интеллектуальных измерительных систем с функциями метрологического самоконтроля, структурная избыточность на основе датчиков близкой точности обеспечивается, когда разность между измеренными значениями и опорным значением не превышает $1/5$ допускаемой абсолютной погрешности системы измерений.

Однако оценка функции самоконтроля, основанной на структурной избыточности, показывала, что в реальных условиях эксплуатации ГА данное

условие не соблюдается. Это связано с конструкцией крышки гидротурбины (ее ребрами жесткости), которые приводят к неравномерному распределению осевой деформации крепежных шпилек, расположенных по ее периметру. В результате наблюдаются существенные различия в измеряемых значениях деформации шпилек, связанных с работой ГА на трех основных режимах: останов (1), холостое вращение (2) и генерация (3). Полученные результаты показывают, что четыре датчика превышают пределы, установленные стандартом, во втором и третьем режиме, что свидетельствует о том, что структурная избыточность не обеспечивается в процессе эксплуатации ГА.

В связи с этим необходимо разработать метод и программно-техническое обеспечение, позволяющие в автоматическом режиме не только обнаруживать неисправности датчиков, но и диагностировать их техническое состояние для повышения достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

Объект исследования – процесс контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, реализуемый с помощью многоканальной измерительной системы.

Предмет исследования – метод автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в указанной системе, основанный на принципе аналитической избыточности, включающий набор из восьми эмпирических моделей динамики деформации шпилек, каждая из которых включает линейный фильтр Калмана для оптимальной оценки их состояния и специализированный алгоритм для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков.

Цель работы – повышение достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации гидроагрегата за счет обнаружения и диагностики неисправностей датчиков.

Идея работы – реализация принципа аналитической избыточности на основе опорных моделей позволяет формировать невязки, несущие информацию о состоянии датчиков. Анализ изменения характеристик этих невязок дает

возможность не только обнаруживать факт неисправности, но и диагностировать техническое состояние датчиков без их демонтажа и остановки ГА, что повышает достоверность непрерывного контроля деформации шпилек.

Задачи исследования:

1. Анализ конструкции узла крепления, физических основ нагружения и деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, а также измерительных систем контроля их деформации и методов обеспечения достоверности результатов измерений.

2. Научное обоснование применимости принципа аналитической избыточности для разработки метода обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

3. Разработка опорных моделей осевой деформации крепежных шпилек на основе экспериментальных данных и с применением линейного фильтра Калмана для формирования аналитической избыточности (невязок).

4. Валидация работоспособности моделей в условиях, имитирующих реальную эксплуатацию (наличие выбросов, шума измерения и изменение режима работы ГА).

5. Выполнение анализа отклика опорных моделей и поведения невязок при имитации неисправностей датчиков (смещение, дрейф, деградация прецизионности, залипание), а также разработка алгоритма автоматического обнаружения и диагностики неисправностей на их основе.

6. Разработка рекомендаций по практическому использованию предложенного метода в системах контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбин на гидроэлектростанциях.

Научная новизна работы:

1. На основании результатов исследований массивов данных систем контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбин и их соотношения с величинами, влияющими на их деформацию, предложен метод автоматического обнаружения и диагностики функциональных неисправностей датчиков этих

систем, базирующийся на принципе аналитической избыточности с использованием опорных моделей.

2. Доказана эффективность оценивания состояния осевой деформации крепежных шпилек формированием характерных невязок на основе опорных моделей, построенных с применением линейного фильтра Калмана к эмпирическим моделям, в различных режимах работы ГА, включая переходные и стационарные процессы, а также при полной и частичной нагрузке.

3. Показано, что для обеспечения обнаружения и диагностики таких неисправностей датчиков осевой деформации, как смещение, дрейф, деградация прецизионности и залипание, необходимо соотносить значения невязок с измерениями величин, влияющих на изменение состояния деформации крепежных шпилек (напор воды, электрическая мощность).

Соответствие паспорту специальности

Полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды по пункту:

6. «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретическая значимость заключается в разработке метода обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины на основе формирования аналитической избыточности для контроля метрологической исправности датчиков в реальных условиях эксплуатации ГА.

2. Разработанные опорные модели, получаемые путем применения к эмпирическим моделям линейного фильтра Калмана, оценивают осевую деформацию крепежных шпилек с высокой точностью. Это позволяет сравнивать

оцененные значения с измеренными для формирования характерных невязок по каждому типу неисправности (дрейф, смещение, деградация прецизионности и залипание), что обеспечивает их обнаружение, а также демонстрирует практическую применимость подхода.

3. Разработанный алгоритм и программно-техническое обеспечение для автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков совершенствуют систему контроля осевой деформации крепежных шпилек, поскольку обеспечивают достоверность ее измерительных результатов при длительных межповерочных интервалах. Кроме того, его практическое применение создает основу для технического обслуживания, основанного на состоянии метрологической исправности датчиков.

4. Результаты исследования использованы для анализа массивов данных измерений деформации шпилек при обнаружении и диагностике неисправностей датчиков Проблемной лаборатории метрологического обеспечения компьютеризированных датчиков и ИИС ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (акт внедрения от 06.05.2026 г., Приложение А), а также могут быть использованы в учебном процессе в Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II» (акт внедрения от 08.06.2026 г., Приложение Б).

Методология и методы исследования:

Методология исследования основана на применении принципа аналитической избыточности с использованием опорных моделей, их валидации и анализе связи между невязками, напором воды и генерацией электрической мощности при работе ГА для обнаружения неисправностей датчиков и диагностики их метрологической исправности. Для построения опорных моделей применены методы регрессионного анализа результатов реальных измерений и линейный фильтр Калмана. Для валидации моделей использованы количественные статистические методы оценки точности по средней абсолютной ошибке и робастности по метрике чувствительности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Используемый научно-методологический принцип формирования дополнительной информации с помощью аналитической избыточности, основанный на сочетании эмпирических моделей и линейного фильтра Калмана, позволяет создать опорные модели, оценивающие осевую деформацию крепежных шпилек крышки гидротурбины в различных режимах работы ГА – включая переходные и стационарные процессы, а также работу на полной и частичной нагрузке – с точностью < 1 мкм.

2. Установленные в результате исследования зависимости между изменениями напора воды, выработки электрической мощности и характерными паттернами невязок, полученными с помощью опорных моделей в ходе эксплуатации ГА, позволяют разработать алгоритм, способный обнаруживать неисправности датчиков осевой деформации крепежных шпилек (смещение и дрейф > 5 мкм; деградацию прецизионности при СКО $> 0,3$ мкм; залипание при СКО $< 0,1$ мкм) и диагностировать их метрологическую исправность.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов диссертационной работы основана на строгих теоретических подходах, разработке моделей на основе известных физических принципов и использовании среды численного моделирования ПО MATLAB для обработки и анализа массивов данных, а также валидации моделей с помощью реальных данных измерений и широкого набора испытаний.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных; за последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: LVIII Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире» (30 ноября 2023 г., г. Москва); VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (1 марта 2024 г., г. Санкт-Петербург); VII Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (4 марта 2025 г.,

г. Санкт-Петербург); VIII Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (4 марта 2026 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в результатах исследований по повышению достоверности контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации ГА. Автор диссертации сформулировал задачи исследований, проанализировал физические основы деформации шпилек во время работы ГА, разработал адекватную модель процесса измерения деформации, оценил опорные модели состояния осевой деформации для каждой шпильки и валидировал их с помощью испытаний, имитирующих реальные условия эксплуатации на основе экспериментальных данных, интерпретировал полученные результаты (поведение характерные невязки), спроектировал логику и разработал программно-техническое обеспечение автоматического обнаружения и диагностики функциональных неисправностей датчиков.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 15, 24-27, 104, 105), в том числе в 2 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, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение В, пункт списка литературы № 16).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка и 9 таблицы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность К.В. Гоголинскому, а также К.В. Сопожниковой и Р.Е. Тайманову за ценные консультации и поддержку при выполнении работы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОТУРБИНЫ С УЧЕТОМ НАГРУЗОК, ДЕФОРМАЦИЙ И МЕТОДОВ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

1.1 Анализ эксплуатационных стадий и основ нагружения высоконапорных радиально-осевых турбин

Основу мощных высоконапорных ГЭС составляют гидроагрегаты с радиально-осевыми турбинами (турбинами Френсиса). Данный тип гидротурбин получил широкое распространение в мировой энергетике, что объясняется его способностью сохранять высокий коэффициент полезного действия в широком диапазоне нагрузок – от частичных до номинальных – при значительных напорах воды. Яркими примерами являются Саяно-Шушенская и Красноярская ГЭС в России, ГЭС «Три ущелья» в Китае, Итайпу на границе Бразилии и Парагвая [14],[21],[70].

Мощность ГЭС напрямую определяется количеством и единичной мощностью установленных гидроагрегатов. Каждый ГА представляет собой энергопреобразующий комплекс, состоящий из гидротурбины и генератора. Для анализа нагрузок, действующих на элементы конструкции, необходимо рассмотреть процесс преобразования энергии в ГА. Целесообразно выделить три ключевые технологические зоны (рисунок 1.1):

Зона I (подвод): включает напорный водовод и соединяет верхний бьеф (водохранилище) с гидротурбиной. В этой зоне сосредоточенный объем воды обладает потенциальной энергией, которая является источником для последующего преобразования.

Зона II (энергопреобразование): включает спиральную камеру, направляющий аппарат, рабочее колесо гидротурбины и генератор. Здесь происходит основное преобразование энергии, в спиральной камере и направляющем аппарате потенциальная энергия воды трансформируется в кинетическую; при взаимодействии потока с лопатками рабочего колеса кинетическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения ротора.

Через общий вал вращение передается ротору генератора, где происходит преобразование в электрическую энергию.

Зона III (отвод): включает отсасывающую трубу и нижний бьеф. Через эту зону вода, отдавшую основную часть энергии, сбрасывается в реку.

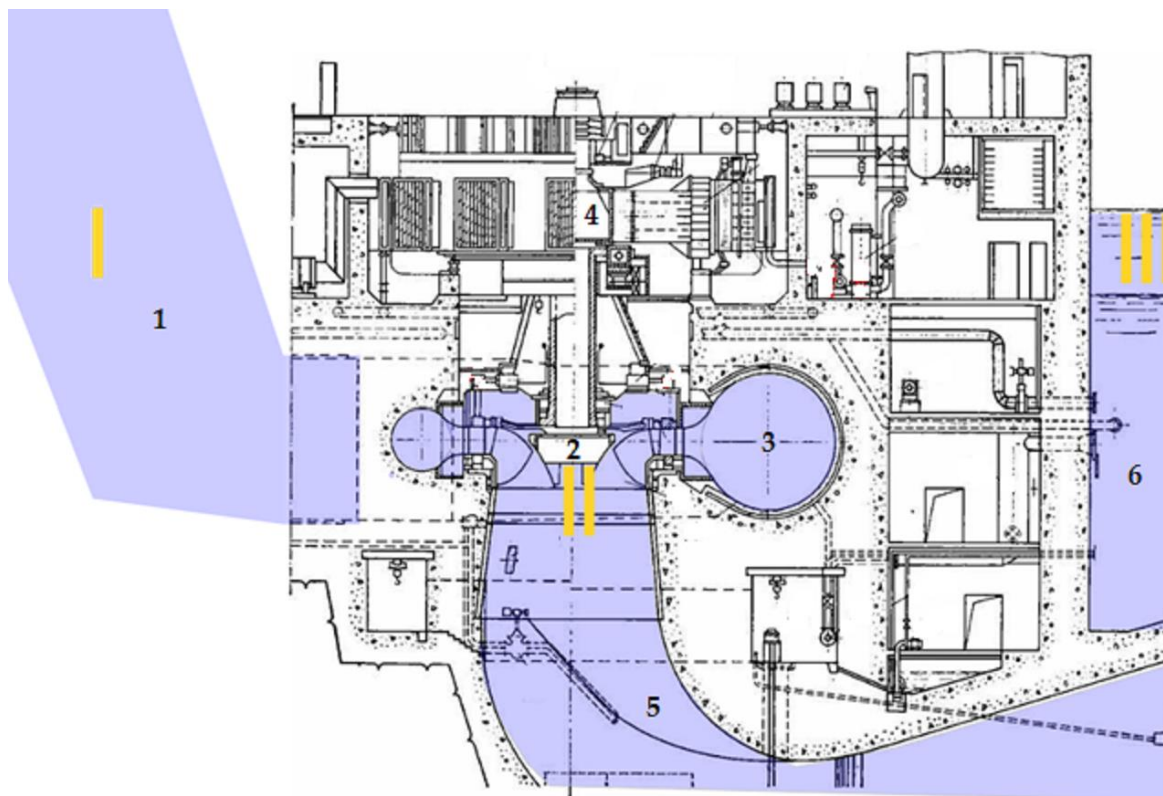


Рисунок 1.1 – Схематический продольный разрез ГА с выделением технологических зон: 1 – напорный водовод; 2 – рабочее колесо гидротурбины; 3 – спиральная камера; 4 – генератор; 5 – отсасывающая труба; 6 – нижний бьеф (составлено автором на основе [23])

Наиболее ответственным узлом с точки зрения комплексного механического и гидравлического нагружения является крышка гидротурбины, расположенная в Зоне II. Ее напряженно-деформированное состояние формируется под воздействием переменных нагрузок на всех стадиях эксплуатации ГА, а надежность ее крепления напрямую определяет безопасность всего ГА.

На основании анализа данных исследований [94],[96],[99] типичные условия нагружения узла крепления крышки можно систематизировать, рассматривая ключевые стадии эксплуатации и установившиеся режимы работы ГА:

Подготовка к пуску – гидравлическая нагрузка отсутствует (проточная часть осушена). Механические напряжения создаются исключительно предварительной затяжкой крепежных шпилек, обеспечивающей плотность разъема. Это состояние определяет начальное напряженное состояние узла.

Пуск – после заполнения проточной части водой и начала раскрутки рабочего колеса на крышку действует нарастающий напор. При быстром открытии направляющего аппарата возможны гидродинамические удары. Механическая составляющая нагрузки дополняется пусковыми вибрациями.

Частичная нагрузка – неравномерность потока на входе в рабочее колесо вызывает низкочастотные пульсации давления на крышке. В зонах локального разрежения возможно возникновение кавитации. Вибрационный фон остается повышенным из-за гидродинамической асимметрии потока.

Полная (номинальная) нагрузка – напор стабилизируется, пульсации давления минимальны. Основной вклад в осевую силу (направленную вниз) дает суммарное действие статического напора на крышку и разрежения в отсасывающей трубе. Вибрации имеют минимальный уровень.

Останов – при остановке напор на крышку снижается. При быстром закрытии лопаток направляющего аппарата может возникать отрицательный гидроудар из-за резкого падения давления. Механические нагрузки обусловлены переходными вибрационными процессами при замедлении ротора (вала и рабочего колеса) и срыве потока.

Циклическое воздействие нагрузок, соответствующих этим стадиям, формирует сложное переменное напряженно-деформированное состояние в крышке гидротурбины и, что особенно важно, в зонах крепления шпилек, что и обуславливает необходимость мониторинга их состояния.

1.1.1 Механические напряжения и деформации в крышке гидротурбины

В каждой из рассмотренных стадий эксплуатации и установившихся режимов работы в крышке гидротурбины возникают динамические механические напряжения, обусловленные осевым усилием от потока воды. Анализ исследований, посвященных механическому напряжению на этапах пуска и сброса

нагрузки, показывает, что, несмотря на изменение величины напряжений, их максимум всегда локализуется по периметру крышки – в зоне расположения крепежных шпилек [64, 76, 100]. Это справедливо как для напряжений от предварительной затяжки (начальное напряжение, создаваемое при монтаже), так и для дополнительных напряжений от гидравлического давления (динамические силы, действующие на гидротурбину в процессе работы ГА) [36, 110]. Распределение механических напряжений (в виде эквивалентных напряжений по фон Мизесу) в крышке гидротурбины иллюстрирует рисунок 1.2.

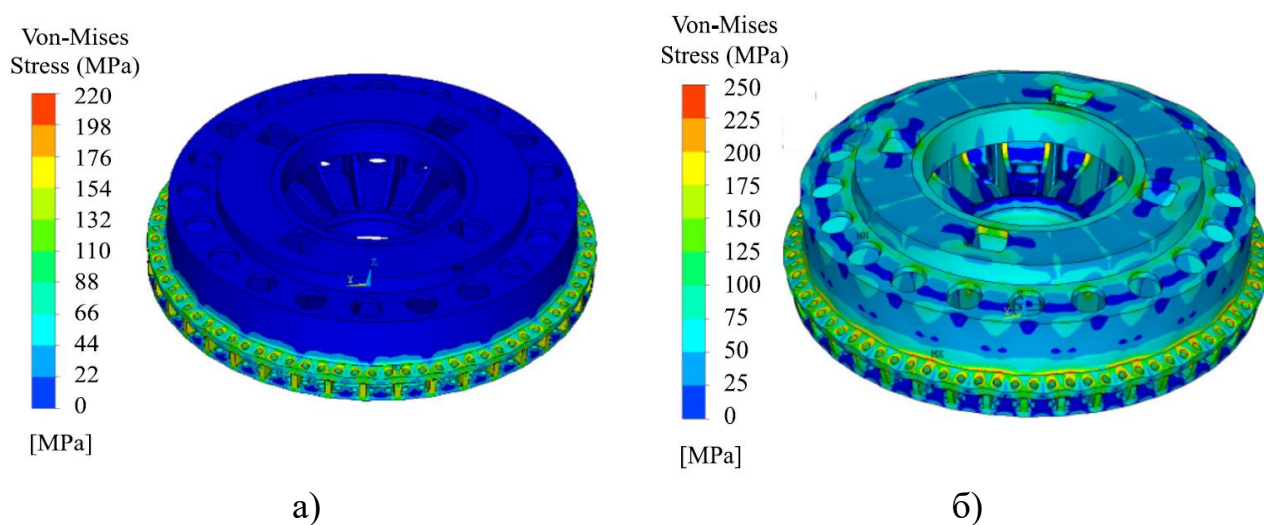


Рисунок 1.2 – Распределение механических напряжений по фон Мизесу в крышке гидротурбины: а) только затяжки; (б) с гидравлическим давлением [110]

С другой стороны, максимальная деформация крышки гидротурбины наблюдается в районе ее внутреннего центра [51, 100], где происходит подъем конструкции под действием осевого гидравлического усилия (рисунок 1.3).

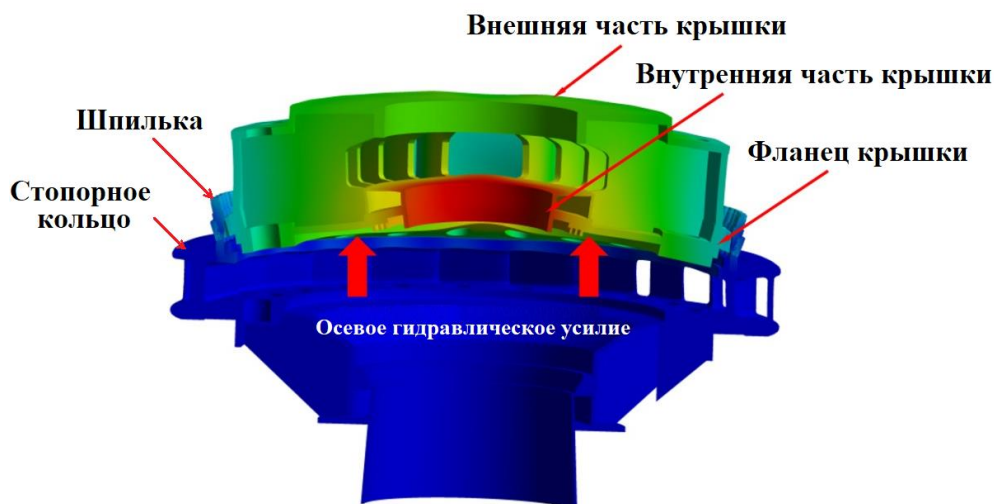


Рисунок 1.3 – Деформация крышки гидротурбины с одинарным фланцем [100]

В то же время, при работе ГА деформация на внешних кромках (периметре), где фланец крышки крепится к фланцу стопорного кольца шпильками, будет минимальной. Согласно данным исследований [74] описанная картина деформации характерна как для крышек с одинарным, так и с двойным фланцем.

1.1.2 Механические напряжения в крепежных шпильках крышки гидротурбины

Механическое напряжение в крепежных шпильках является критическим параметром конструкции и эксплуатации, характеризуемым статической предварительной нагрузкой, приложенной во время монтажа, и динамическими рабочими нагрузками, накладывающимися во время работы гидротурбины. Целостность болтового соединения имеет первостепенное значение для предотвращения утечек, перекосов и катастрофических отказов.

Статическая нагрузка (предварительная нагрузка шпильки)

Предварительная нагрузка шпильки понимается как контролируемое осевое растягивающее усилие, намеренно создаваемое в каждой шпильке во время затяжки крышки [77]. Ее основная функция заключается в плотном сжатии прокладки между фланцами и в предотвращении раскрытия стыка под действием внешних нагрузок. Недостаточная затяжка ведёт к ослаблению болтов, утечкам и росту циклических напряжений, что ускоряет усталость металла. Чрезмерная затяжка опасна срывом резьбы, пластической деформацией и коррозией под напряжением [45].

На практике нужное растягивающее усилие (F_p) чаще всего достигается путем контроля крутящего момента (T) при закручивании гайки по упрощенной зависимости (1.1):

$$F_p = \frac{T}{K \times d} \quad (1.1)$$

где d – номинальный диаметр шпильки, мм;

K – коэффициент крутящего момента (безразмерный). Он очень чувствителен к коэффициентам трения в резьбовом соединении (μ_t) и под опорной поверхностью гайки (μ_b), а также к геометрии резьбы.

Для стандартных метрических резьбовых соединений принято использовать приближенное значение коэффициента крутящего момента $K \approx 0,2$, соответствующее усредненным условиям контакта в резьбе и под головкой болта. Однако величина K демонстрируют значительный разброс, достигающий $\pm 25 \%$ и более в зависимости от смазки, состояния поверхностей и скорости затяжки. Следовательно, контроль предварительной затяжки (предварительной нагрузки) становится неточным для соединений с крупными шпильками, где требования к точности и повторяемости усилий особенно жестки.

Другой проблемой, связанной с равномерной затяжкой, является эффект упругого взаимодействия, который проявляется в кольцевых фланцевых соединениях с множеством шпилек, таких как крышки гидротурбин. При последовательной затяжке отдельных крепёжных шпилек фланец крышки сжимается неравномерно. В результате затяжка соседней шпильки дополнительно деформирует фланец, что может снизить предварительную нагрузку в ранее затянутых шпильках на 30–50 %. Данный эффект делает достижение одинакового натяжения шпилек практически невозможным. Отраслевые стандарты (ASME PCC-1) [30] рекомендуют применять усовершенствованные схемы затяжки (например, крестообразную) и стратегии многоступенчатой затяжки (например, 50 %, 80 %, 100 % от конечного момента за несколько проходов), что позволяет существенно снизить неравномерность и повысить предсказуемость финального напряжённого состояния соединения.

Динамическая нагрузка на шпильки

В процессе эксплуатации ГА статическая предварительная нагрузка в шпильках дополняется динамическими составляющими, обусловленными гидравлическим давлением, дисбалансом ротора и пульсациями потока (например, от вихревых жгутов) [78]. Таким образом, полное напряжение в шпильке представляет собой сумму предварительного и динамического напряжений.

В стационарных режимах работы ГА крепежные шпильки испытывают малоамплитудные циклические напряжения, вызывающие высокочастотную усталость [2]. Однако наиболее опасные усталостные нагрузки возникают при

переходных процессах, таких как пуск, останов и, особенно, сброс нагрузки. В этих условиях происходят резкие скачки давления и значительные знакопеременные напряжения, которые вносят основной вклад в накопление усталостных повреждений в шпильках.

Гидравлические силы, действующие на крышку гидротурбины, создают в крепежных шпильках комбинированное напряженное состояние — растяжение с изгибом [100], [110]. Расчеты методом конечных элементов показывают, что после затяжки максимум напряжений по Мизесу локализуется в центральной части шпильки (рисунок 1.4а). При действии эксплуатационных нагрузок зона максимальных напряжений смещается к корню первого витка резьбы, входящего в зацепление с гайкой, то есть в область перехода от гладкой части к резьбовой (рисунок 1.4б). Именно эта зона является наиболее вероятным местом зарождения усталостных трещин из-за концентрации напряжений и изгибающего момента, возникающего при неравномерном раскрытии фланца или изгибе шпильки [91].

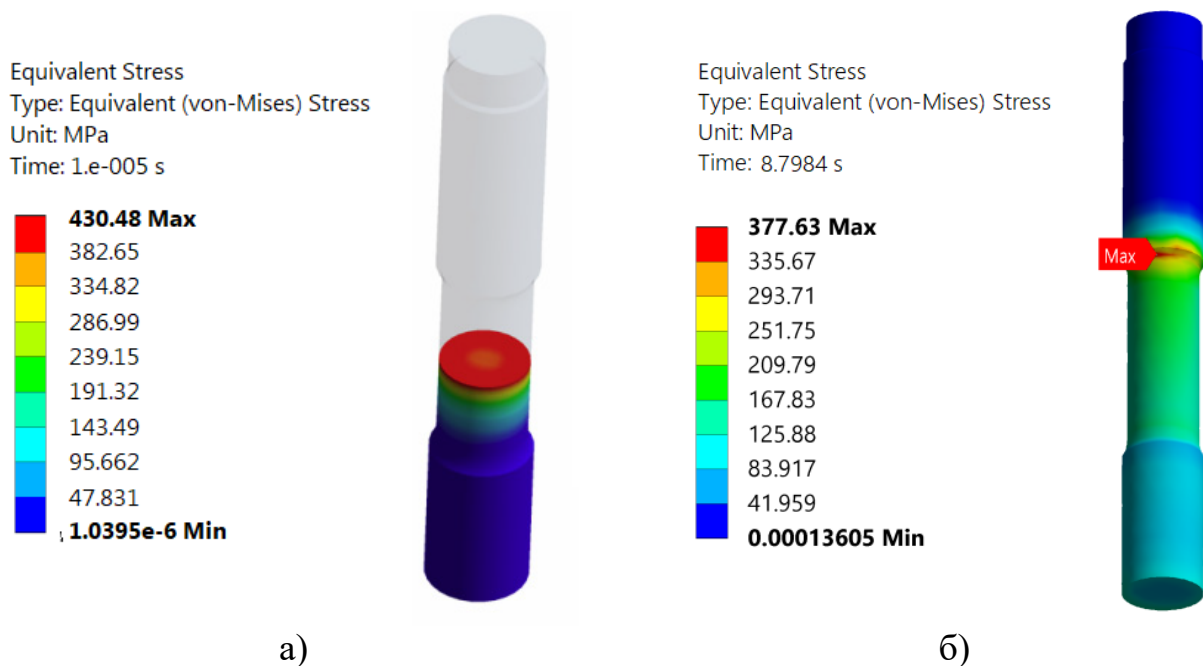


Рисунок 1.4 – Механические напряжений по фон Мизесу в шпильках:

а) после монтажа (предварительная затяжка); б) в условиях эксплуатации [100]

Исследования с использованием гидроупругих моделей подтверждают, что давление на крышку гидротурбины распределено крайне неравномерно и зависит от геометрии проточной части и положения направляющих лопаток.

Соответственно, нагрузка, передаваемая на каждую шпильку, также неодинакова. Эта неравномерность усиливается конструкцией крышки: ребра жесткости создают локальные зоны повышенной жесткости, что приводит к перераспределению реактивных сил между шпильками.

В результате наблюдается значительный разброс как статических предварительных, так и динамических нагрузок по окружности фланца. Дополнительным негативным фактором становится возникновение изгибных напряжений, которые создают градиент растягивающих напряжений по сечению шпильки, увеличивая пиковые значения с одной стороны и тем самым ускоряя зарождение усталостных трещин в шпильках.

1.1.3 Деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины

Динамическое давление воды на крышку гидротурбины создаёт в крепёжных шпильках не только напряжения, но и деформации. В рамках теории упругости и усталостной прочности деформированное состояние шпильки оценивают как для статического нагружения (после монтажа), так и для динамического (при эксплуатации ГА).

Деформация шпильки под статической нагрузкой

При установке соединения каждая шпилька получает расчётное осевое упругое удлинение (ΔL) за счёт создания осевое растягивающее усилие (F_p). В этом смысле шпилька работает как преднатянута пружина: создаваемое зажимное усилие сжимает детали стыка и должно с запасом перекрывать внешние нагрузки, стремящиеся раскрыть соединение [70]. Требуемое упругое удлинение определяется по закону Гука (1.2):

$$\Delta L = \frac{F_p \times L_0}{A_s \times E} \quad (1.2)$$

где L_0 – эффективная длина зажатой части шпильки, мм;

A_s – площадь поперечного сечения по резьбе (с учётом ослабления), мм²;

E – модуль Юнга, МПа.

Для высокопрочных сталей целевую предварительную нагрузку назначают в диапазоне 60–75 % от предела текучести, что соответствует относительной упругой деформации ($\varepsilon = \Delta L / L_0$) около 0,05–0,1 % [82].

Существенное значение имеет способ затяжки. Ступенчатое повышение крутящего момента – распространённая практика как было написано ранее. Однако для ответственных соединений (крышки гидротурбин) предпочтительнее гидравлическое натяжение. Этот метод создаёт чистое растяжение без крутящего момента, то есть исключает сдвиговые напряжения в теле шпильки, что обеспечивает более высокую повторяемость и точность предварительной нагрузки, то есть осевое растягивающее усилие [92].

При затяжке моментом ситуация иная: шпилька оказывается в сложном напряжённом состоянии к растяжению от предварительной нагрузки добавляется кручение. По критерию Мизеса пластическая деформация может наступить раньше расчётного предела, если касательные напряжения от кручения достаточно велики [85]. Даже незначительная пластическая деформация в зоне резьбы или под головкой недопустима, поскольку она вызывает локальное упрочнение и образование микротрещин. В результате заметно снижается усталостный ресурс шпильки, а зарождение трещин при последующих циклических нагрузках существенно ускоряется [80].

Деформация шпильки под динамической нагрузкой

Деформационное поведение шпилек при работе ГА определяется сложным взаимодействием в предварительно нагруженной упругой системе. То, как именно перераспределяются нагрузки между шпилькой и крышкой гидротурбины, зависит от соотношения их жёсткостей в различных режимах.

Первый режим (осевая циклическая составляющая). При выполненной затяжке в шпильке действует начальное растягивающее напряжение (σ_m). Кроме того, в процессе эксплуатации к нему добавляются динамические усилия от пульсаций давления и вибраций – так называемая внешняя разделяющая нагрузка (F_{ext}). Однако воспринимает её шпилька не полностью: лишь доля (Φ) общей

нагрузки приходится на увеличение напряжения в стержне. Величина Φ определяется через жёсткости (1.3):

$$\Phi = \frac{k_b}{k_b + k_c} \quad (1.3)$$

где k_b – осевая жесткость шпильки;

k_c – совокупная жесткость зажимаемых элементов (крышка, фланец, прокладка, статорное кольцо).

Для фланцев гидротурбин, которые обычно намного жёстче шпилек ($k_c \gg k_b$), поэтому коэффициент Φ не превышает 0,2 [71, 82]. Это значит, что амплитуда циклического напряжения (σ_a) в шпильке оказывается существенно ослабленной по сравнению с внешним воздействием (1.4):

$$\sigma_a = \Phi \times \frac{F_{ext}}{A_s} \quad (1.4)$$

По сути, деформация шпильки представляет собой малую упругую осцилляцию осевого удлинения относительно статического растяжения.

На практике, однако, расчёт Φ для крупногабаритных фланцевых соединений наталкивается на сложности включая соединения крышки гидротурбины: приходится учитывать не только осевое сжатие деталей, но и изгибную податливость фланца, релаксационные свойства прокладок, контактные деформации на стыках. Упрощённые теоретические оценки здесь нередко дают заметное отклонение от реальных значений [4].

Вторичный режим (изгибная составляющая). Значительно более опасная деформация шпилек связан с поворотом фланца или перекосом шпильки. Причины этого связан с неравномерностью давления по поверхности крышки, температурные перепады, неравномерная осадка фундамента, а также резкие гидравлические удары при сбросах нагрузки. Поворот фланца переводит шпильку в режим циклического изгиба.

Кроме того, напряжения от изгиба распределяются по сечению неравномерно: на одной стороне шпильки они складываются с растягивающими, на другой вычитаются. Особенно сильно этот эффект проявляется в зонах

геометрических концентраторов, и в первую очередь в корне первого витка резьбы у гайки. Там теоретический коэффициент концентрации напряжений (k_t) достигает от 3,0 до 5,0 в зависимости от профиля резьбы и радиуса закругления впадины [80]. По данным конечно-элементных расчётов, при совместном действии растяжения и изгиба максимальное главное напряжение локализуется именно в этой точке. Полное напряжение (σ_{max}) в критическом корне резьбы определяется по формуле (1.5):

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a + (k_t \times \sigma_{изгиб}) \quad (1.5)$$

Именно локализованные знакопеременные напряжения высокой амплитуды, порождаемые изгибом, становятся главной причиной зарождения усталостных трещин даже в тех случаях, когда изменения осевого напряжения остаются умеренными.

Характер деформаций шпилек во многом зависит от того, как именно крышка реагирует на нагрузку. В крышках с одинарным фланцем подъёмное гидравлическое усилие нередко вызывает радиальный изгиб шпилек наружу (рисунок 1.5а) [111]. В конструкциях с двойным фланцем (со шпичей) картина сложнее: совместное действие предварительной затяжки и гидравлических сил порождает изгибающий момент, который обычно отклоняет шпильки в сторону менее жёсткой части фланцевого узла (рисунок 1.5б) [75].

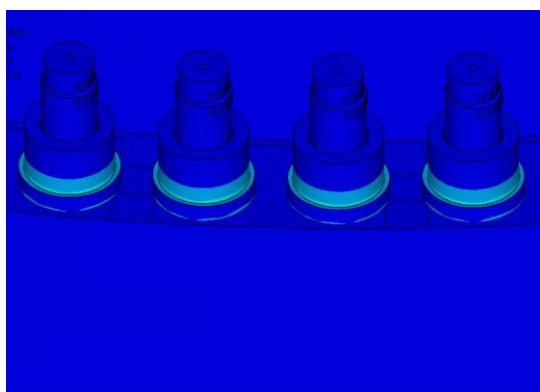
Однако деформационное состояние шпильки не является постоянным – начальное усилие затяжки со временем снижается, что выражается в уменьшении её удлинения. Эти факторы могут быть:

- осадка (уплотнение) контактных поверхностей – в зонах сопряжения резьбы, под опорными торцами гаек и шпилек, а также на стыках фланцев под высокими контактными давлениями происходит микропластическое смятие неровностей и локальная ползучесть материала. Этот процесс наиболее интенсивен на начальном этапе эксплуатации [39],[106];

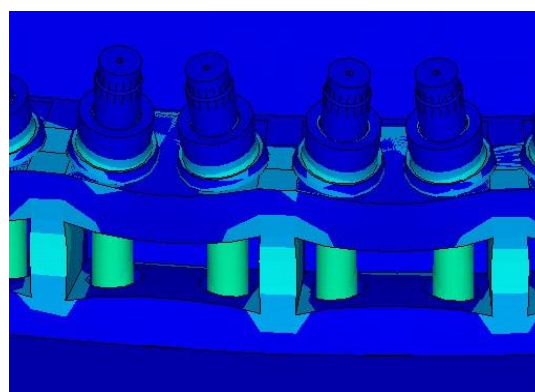
- вибрационное ослабление, известное как эффект Юнкера – поперечные динамические нагрузки вызывают микропроскальзывания в стыке, которые

создают моменты, стремящиеся провернуть гайку. В результате предварительная нагрузка снижается постепенно, но неуклонно [85];

- температурные эффекты – крышка гидротурбины (литая сталь или чугун) и высокопрочные шпильки имеют разные коэффициенты теплового расширения, а в переходных режимах пуска и останова перепады температуры между ними могут быть существенными. Это приводит к изменению натяга шпилек. В отдельных случаях возможна и длительная релаксация напряжений (ползучесть) в материале шпильки при нагреве, хотя для обычных гидротурбинных условий этот фактор редко становится определяющим [41].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Деформация крепежных шпилек крышки гидротурбины:

а) одинарный фланец; б) двойной фланец [75]

1.2 Методы и приборы контроля деформации крышки гидротурбины и ее крепежных шпилек

Техническое состояние ГА средней и большой мощности оценивается по данным штатных диагностических систем. Наряду с вибрационным мониторингом, прямое измерение деформаций крышки и её крепёжных шпилек даёт наиболее полную картину напряжённо-деформированного состояния. Эти сведения необходимы для оценки усталости, развивающейся под действием сложных гидродинамических нагрузок, именно они служат основной причиной накопления повреждений в данных узлах.

В работе [87], показано, что основным источником зарождения усталостных трещин в неподвижных элементах гидротурбин (крышке и шпильках) служат высокочастотные малоамплитудные циклические нагрузки, порождаемые

взаимодействием ротора и статора, а также срывными вихревыми структурами. При работе на частичных нагрузках или в режимах, отличающихся от расчётных, к этому добавляется вихревая кавитация, вызывающая пульсации давления в широком диапазоне частот и дополнительно усиливающая усталостное воздействие [79].

1.2.1 Методы и приборы контроля деформаций крышки гидротурбины

Из-за сложной геометрии и многоосного характера напряжённого состояния крышки гидротурбины поля деформаций и напряжений определяют комбинированным способом: с использованием современных расчётных моделей и данных натурного мониторинга.

Компьютерное моделирование

Расчётная практика, как правило, строится на совместном применении вычислительной гидродинамики (CFD) и конечно-элементного анализа (FEA) – так реализуется гидроупругое моделирование (FSI). Такой подход даёт возможность воспроизвести реальное распределение гидродинамических давлений на лопатки направляющего аппарата, рабочее колесо и крышку гидротурбины (в том числе её крепёжные шпильки), а затем оценить, как конструкция на это реагирует [101]. В рамках FSI-исследований основное внимание уделяется на:

1. Оценка прочности и жёсткости конструкции. Рассчитываются эквивалентные напряжения по Мизесу, а также деформации – как для штатных режимов, так и для расчётных аварийных ситуаций, включая гидроудар и экстренное закрытие направляющего аппарата [17, 83, 110].

2. Выявление опасных зон и усталостный анализ. Определяются участки, где напряжения концентрируются – прежде всего в сварных швах, углах каналов направляющего аппарата и у оснований шпилек [3]. Далее, на основе гистограмм нагружения, оценивается ресурс соединений с использованием стандартных кривых усталости.

3. Расчёт динамических характеристик. Собственные частоты и формы колебаний конструкции проверяются на предмет совпадения с возбуждающими частотами рабочего процесса – лопаточными проходными частотами и

гармониками вращения ротора [2, 103]. Это позволяет избежать резонансных явлений.

4. Оптимизация конструкции. На основании полученных данных корректируются геометрические параметры, подбираются материалы с пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений, а также разрабатываются меры локального усиления наиболее нагруженных узлов [51].

Методы и средства измерений контроля деформации

Экспериментальная валидация численных моделей обязательна, поскольку реальные условия нагружения, состояние опор конструкции и эффекты накопленной усталости могут отличаться от принятых в моделях. Измерения деформаций крышки гидротурбины в натурных условиях делятся на две группы – контактные и бесконтактные.

Контактные методы. Эти датчики крепятся непосредственно на поверхность конструкции. Среди них выделяются:

1. Тензорезисторы – классический инструмент для верификации конечно-элементных расчётов. Они фиксируют поверхностные деформации в точках, заранее выявленных моделированием [97]. Однако установка тензорезисторов трудоёмка, и для постоянного мониторинга их используют редко: во влажной среде ГЭС они не обеспечивают нужной долговечности [31].

2. Акселерометры дают косвенную информацию о динамических деформациях крышки, но именно они служат основой для модального анализа в эксплуатационных условиях, дополняя расчётные данные [69].

3. Датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Их работа строится на том, что деформация или изменение температуры влияют на скорость распространения ПАВ в пьезокристалле, что сдвигает частоту радиосигнала [81]. Такие датчики устойчивы к вибрациям и хорошо работают в сложных условиях. К недостаткам относят заметную температурную чувствительность (требуется компенсация), необходимость специализированного считывающего оборудования и пока ещё ограниченное применение.

Бесконтактные методы. Эти средства удобны для получения картины деформаций по всей поверхности и для долгосрочного наблюдения.

Вихретоковые датчики измеряют изменение зазора между датчиком и токопроводящим объектом (например, крышкой). За счет электромагнитного взаимодействия, деформация меняет импеданс катушки [48]. Они просты в монтаже, надёжны, точны и быстро реагируют на изменения. Кроме того, они не боятся пыли, масла или воды. Но их нужно калибровать под конкретный материал и температуру, а электромагнитные помехи могут снижать точность показаний [90].

Нормативная база

Вопросы оценки технического состояния гидротурбин регламентируются рядом документов. В России это ГОСТ Р 55260 [6] (методика оценки технического состояния гидротурбины), на международном уровне ИЕС 60193 [53] (для гидроаккумулирующих турбин) и ИЕС 62256 [54] (для оценки существующего гидроэнергетического оборудования). Эти стандарты прямо указывают, что крышка как основной несущий элемент и её крепёжные шпильки подлежат периодическому неразрушающему контролю для своевременного выявления дефектов. Среди применяемых методов:

1. Капиллярный контроль и магнитопорошковый контроль: Для обнаружения поверхностных трещин в сварных швах и компонентах крышки гидротурбины [95].

2. Ультразвуковой контроль: Для обнаружения подповерхностных и внутренних дефектов (трещины, непровары в сварных швах), а также для измерения затяжки шпилек с помощью ультразвукового метода времени пролета, который коррелирует время прохождения ультразвуковой волны в шпильке с его осевым напряжением [10].

3. Акустическая эмиссия: Для мониторинга в реальном времени активности роста усталостных трещин во время работы турбины, особенно в циклах пуска и останова [8, 95].

1.2.2 Методы и приборы контроля механической нагрузки крепежных шпилек

Оценка механических напряжений в крепежных шпильках крышки гидротурбины – непростая задача, которую решают как прямыми, так и косвенными способами. Методы направлены на определение осевой силы предварительного натяжения, которая в процессе эксплуатации (особенно на переходных режимах) может снижаться из-за релаксации и вибраций. Уменьшение натяжения ведёт к неравномерному нагружению крепёжных узлов, раскрытию стыков и ускоренному усталостному разрушению шпилек и фланцев крышки.

Косвенные методы

Установка тензорезисторов непосредственно на стержень шпильки. Деформация, фиксируемая датчиками, пересчитывается в напряжение по закону Гука [37]. Преимущество метода заключается в высокой локальной точности и хорошей частотной характеристике, что позволяет отслеживать динамику нагрузки. Но есть ограничения: как отмечено в работе [36], установка датчиков в промышленных условиях сложна – места часто труднодоступны, сами датчики недолговечны во влажной среде, подвержены повреждениям и чувствительны к электромагнитным помехам.

Прямые методы

Для промышленного применения, особенно при организации непрерывного контроля и ранней диагностики потери натяжения, всё большее внимание привлекают системы с интегрированными датчиками. Наиболее характерный представитель – шайбы с пьезоэлектрическими чувствительными элементами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [22]. В отличие от косвенных методов, такая шайба работает как преобразователь «сила–частота». При затяжке гайки и возникновении осевого усилия упругий корпус шайбы деформируется, а эта деформация передаётся на пьезоэлектрическую подложку с ПАВ-резонатором. В ответ резонансная частота электромагнитного отклика смещается, причём сдвиг частоты линейно зависит от приложенного сжимающего усилия [28].

К преимуществам прямых методов относится возможность непрерывного отслеживания изменений напряжений в шпильках и своевременной фиксации релаксации натяжения (такие решения, например, применяются на Саяно-Шушенской ГЭС). Однако есть и существенный недостаток: проверить работоспособность встроенного датчика без демонтажа шайбы нельзя – это делается только после извлечения и последующей калибровки в лабораторных условиях.

1.2.3 Методы и приборы контроля деформации крепежных шпилек

Контроль деформации шпилек крышки гидротурбины является одной из ключевых задач при проектировании и эксплуатации ГА. От неё зависят герметичность уплотнений, долговечность соединений и безопасность работы оборудования в целом. Целевое предварительное натяжение должно лежать в упругой области материала – это условие исключает ползучесть, усталостное разрушение и коррозионное растрескивание под напряжением [109]. Практически контроль строится по двухуровневой схеме: периодические проверки на этапах монтажа и ремонта, а также непрерывный мониторинг (контроль) в ходе эксплуатации [102].

Периодический контроль

Контроль деформации проводится точно, на последовательных стадиях затяжки (например, 30 %, 60 %, 100 %) с обязательным соблюдением крестовой схемы обхода фланца. Это обеспечивает равномерность предварительного натяжения по всему стыку. Основные используемые методы:

а) гидравлические натяжители. Такой подход позволяет обойти неопределённости, связанные с трением в резьбе и на опорных поверхностях – главный недостаток динамометрических ключей [68]. Натяжитель создаёт чистое осевое усилие, растягивая шпильку в упругой зоне. По достижении расчётного удлинения гайка доворачивается до упора, давление снимается, и нагрузка оказывается контролируемо переданной. Метод предпочтителен для крупных шпилек и особо ответственных соединений.

б) тензометрия. Наклеиваемые тензорезисторы дают наиболее прямой способ оценки поверхностной деформации (микродеформации). Работа датчиков основана на пьезорезистивном эффекте, в которой деформация шпильки меняет сопротивление тензорезистора [97]. В полевых условиях требуется тщательная подготовка поверхности (очистка, обезжиривание, создание шероховатости), применение эпоксидных клеев и схем температурной компенсации. При монтаже следят, чтобы удлинение не выходило за упругий предел ($\varepsilon < 0,2 \%$), а в эксплуатации ведут циклический мониторинг для выявления релаксации. Калибровка тензорезистор обеспечивает точность порядка $\pm 0,001$ мм [84].

в) ультразвуковой метод. Это наиболее распространённый неразрушающий способ контроля крепежных шпилек в рабочих условиях. В его основе лежит акустический эффект: скорость продольной (V_L) или поперечной (V_S) ультразвуковой волны линейно зависит от одноосного напряжения. Измерение обычно ведут с одного конца, фиксируя время прохождения импульса до противоположного конца и обратно [11]. Связь между напряжением (σ) и относительным изменением скорости описывается выражением (1.6):

$$\frac{\Delta V}{V_0} = K \times \frac{\sigma}{E} \quad (1.6)$$

где K – акустическая константа материала;

E – модуль Юнга, МПа.

Иными словами, чем жёстче материал (выше E), тем меньшее относительное изменение скорости вызывает одно и то же напряжение.

Проблемы периодического контроля:

1. Температурная чувствительность. Зависимость скорости звука от температуры нередко выражена сильнее, чем от напряжения, и это главный источник погрешности. В работе [72] предлагается использовать двойные датчики, одновременно измеряющие время прохождения продольной и поперечной волн – их температурные коэффициенты различны, что позволяет разделить эффекты и скомпенсировать дрейф.

2. Качество акустического контакта. Для стабильности сигнала требуются хорошее сопряжение преобразователя с поверхностью и воспроизводимость условий измерения. На практике применяют контактные стержни или стационарно установленные преобразователи (например, тонкие пьезодиски).

3. Неоднородность материала. Ковка, термообработка, защитные покрытия – всё это может влиять на базовую скорость звука (V_0). Поэтому для каждой шпильки или партии необходима индивидуальная калибровка.

Непрерывный контроль

Для постоянного контроля деформаций крепежных шпилек используются системы типа КМ-Дельта-8-СМ [20] и ПТК КМ-Дельта [19]. Они включают восемь измерительных модулей (МКЛП), каждый из которых оснащен оптическими преобразователями, установленными на шпильках по периметру крышки. Принцип работы этих систем основан на измерении линейного перемещения шпильки относительно калибровочного стержня внутри неё, что позволяет определять осевую деформацию [12].

Согласно теоретическим оценкам [104], такие системы применимы для контроля деформаций шпилек в различных режимах работы гидроагрегата – при пуске, на частичных и полных нагрузках, при статическом и циклическом нагружении.

К достоинствам этих систем относится возможность непрерывного измерения осевой деформации и их интеграция с системами сигнализации для предотвращения аварийных ситуаций. Система ПТК КМ-Дельта дополнительно оснащена функцией метрологического самоконтроля согласно ГОСТ Р 8.734 [5], что повышает достоверность измерений и позволяет продлить межповерочный интервал до 4 лет.

Однако у системы КМ-Дельта-8-СМ есть недостаток – в ней не предусмотрена функция метрологического самоконтроля. Поэтому при длительных межповерочных интервалах достоверность результатов не гарантируется.

1.3 Функциональные неисправности датчиков и их характеристики

Измерительные системы и их датчики в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешних факторов, таких как электрические и магнитные помехи, перепады температуры, влажность, запылённость. Наряду с этим сказываются и внутренние процессы: старение электронных компонентов, механические повреждения, деградация контактов. Всё это влияет на состояние датчиков и достоверность получаемых результатов.

Изучение типичных неисправностей датчиков имеет не только теоретический интерес, но и сугубо практическое значение. Классификация неисправностей помогает рационально организовать контроль и техническое обслуживание. При этом важно различать два близких понятия: «неисправность» и «отказ». В соответствии с ISO 13372 [57] и ISO/IEC/IEEE 24765 [61]:

- неисправность понимается как аномальное состояние датчика или его элементов, которое может привести к ухудшению выполнения заданной функции;
- отказ – это уже прекращение способности выполнять требуемую функцию, то есть событие, при котором выходной сигнал выходит за установленные границы.

На практике неисправности датчиков чаще всего проявляются в виде ложных или противоречивых показаний. Это ещё раз подтверждает необходимость регулярных проверок и своевременной калибровки для поддержания их метрологической исправности измерительных каналов. Не менее важно понимать основные типы неисправностей, их причины и то, как они сказываются на результатах измерений.

1.3.1 Основные типы неисправности датчиков и причины их возникновения

Понятия погрешности, дрейфа и потери точности измерений закреплены в международном стандарте ISO 5725 [53].

Эти термины напрямую связаны с неисправностями датчиков, которые детально рассматриваются в работах по методам их диагностики [61]. Каждому типу неисправности соответствуют свои характерные признаки (паттерны). Среди наиболее распространённых выделяют:

Смещение

Это постоянное отклонение, влияющее на все измерения в одну сторону [86]. Оно возникает из-за дефектов прибора, некорректной калибровки или устойчивых внешних помех (нелинейности, конструктивных перекосов) [67], [107]. Корректируется с помощью известных регулировок или компенсационных поправок.

Дрейф

Проявляется как постепенное изменение выходного сигнала при неизменном входном воздействии [34]. Основные причины его возникновения связаны со старением компонентов, температурными колебаниями, загрязнением, электрическими или электромагнитными помехами. Дрейф снижает долговременную стабильность измерений; компенсируется периодическими калибровками, что особенно актуально для систем непрерывного контроля [42].

Деградация прецизионности

Под этим понимают снижение правильности и повторяемости результатов измерений, связанное с действием систематических и случайных погрешностей, а также влиянием внешних условий (температуры, влажности) [67], [98]. Такая неисправность снижает достоверность результатов измерений и выявляется в ходе верификационных испытаний путём сличения с эталонными средствами [65].

Залипание

Выходной сигнал фиксируется на постоянном уровне независимо от измеряемой величины, что имитирует короткое замыкание или обрыв цепи [45].

Причинами такого состояния служат физическая деградация, коррозия и отказы электронных компонентов [67]. В результате система контроля получает устойчиво заниженные показания, что приводит к ошибочным управленческим решениям.

На рисунке 1.6 представлены примеры упомянутых типов неисправностей.

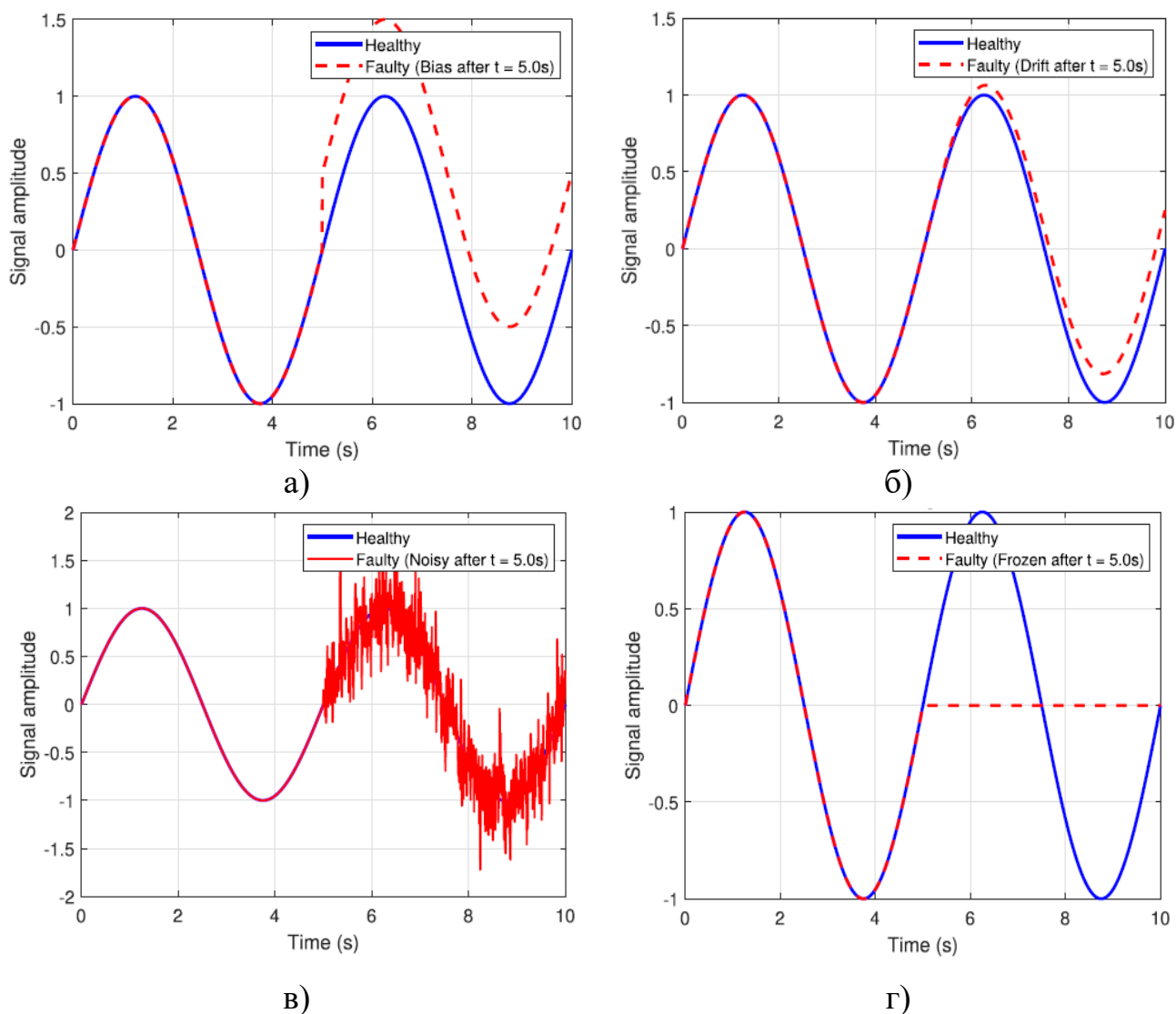


Рисунок 1.6 – Основные типы неисправностей датчиков:

а) смещение; б) дрейф; в) деградация прецизионности; г) залипание [32]

1.4 Критический анализ методов обеспечения достоверности результатов измерений в измерительных системах

Достоверность результатов измерений непосредственно связана с метрологической пригодностью средств измерений. Согласно ISO 10012 [56], этот термин охватывает калибровку и поверку, регулировки, ремонт с последующей перекалибровкой, проверку соответствия метрологическим требованиям по назначению, а также пломбирование и маркировку. Однако традиционные подходы к калибровке и поверке сталкиваются с серьёзными ограничениями в критически важных отраслях – нефтяной [46], ядерной [108], электроэнергетической [52]. Сложность демонтажа измерительных систем и агрессивные условия эксплуатации являются основными причинами, которые не позволяют проводить стандартные

процедуры в полном объёме. В связи с этим активно исследуются альтернативные подходы, позволяющие поддерживать достоверность результатов измерений при длительных межповерочных интервалах [27].

1.4.1 Самокалибровка

Самокалибровка (далее – SC) даёт датчику возможность корректировать собственные калибровочные параметры без внешнего вмешательства, используя встроенные эталоны [73]. Это позволяет увеличить время безотказной работы и снизить затраты на техническое обслуживание за счёт выполнения регулировок непосредственно на месте установки. По сути, SC – это внутренний механизм коррекции, который реализует самодиагностику и компенсацию погрешностей в реальном времени на основе встроенных эталонов и алгоритмической обработки.

Принцип действия SC

В основе подхода лежит непрерывное сравнение сигналов внутреннего эталона и основного измерительного датчика; выявленные отклонения используются для автоматической корректировки выходного сигнала [29], [73]. В литературе описываются различные реализации: для температурных датчиков в качестве внутреннего эталона применяют точку Кюри; в лазерных и стереоскопических системах — виртуальные модели или контролируемые перемещения (например, по параллельным плоскостям) с оценкой параметров через фундаментальные матрицы или некодированные энкодеры. Это позволяет достигать субмикрометрической точности. Коррекция выполняется в реальном времени с использованием нейросетевых или полиномиальных уравнений.

Условия применимости SC

Для реализации SC необходимы избыточность измерений (вторичные датчики или внутренние эталоны), стабильность процесса и невырожденность перемещений во избежание потери информации. Также требуется программное обеспечение для статистической обработки переменных, таких как неопределённость, отклонение и т.п. [9, 33].

Ограничения SC

Данный подход требует эталонного сигнала от вторичного датчика или встроенного элемента, что накладывает конструктивные ограничения: нужно дополнительное пространство для размещения эталона либо место внутри корпуса. Точность напрямую зависит от качества этого эталона, а значит, метод чувствителен к температурному дрейфу и внешним шумам. Кроме того, самокалибровка не отменяет периодических лабораторных проверок, особенно в ответственных применениях.

1.4.2 Онлайн-мониторинг калибровки

Под онлайн-мониторингом калибровки (далее – OLM) понимают оценку состояния калибровки датчиков в реальном времени без физического вмешательства [47]. Этот подход позволяет удлинять межповерочные интервалы либо полностью отказаться от периодических лабораторных калибровок за счёт непрерывного анализа показаний датчиков в рабочих режимах. Наибольшее применение этот подход нашёл в атомных электростанциях.

Принцип действия OLM

В основе OLM лежат алгоритмы, управляемые данными, которые моделируют взаимосвязь между избыточными сигналами датчиков, измеряющих один и тот же параметр процесса (давление, расход и т.п.). Выходные сигналы подаются на вход моделей – например, автоассоциативной ядерной регрессии (AAKR) или моделей на основе гауссовских процессов, которые оценивают «истинные» значения измеряемой величины [47]. Этот непараметрический подход опирается на эксплуатационные данные и позволяет количественно оценивать расхождения между оцененными и фактическими показаниями, что даёт возможность выявлять неисправности и отказы датчиков. В большинстве реализаций предусмотрена также оценка неопределённости оценивания.

Условия применимости OLM

Системы измерения, интегрированные с OLM, должны отвечать жёстким отраслевым требованиям: обеспечивать высокодостоверную валидацию сигналов, отслеживать дрейф в пределах канальных неопределённостей и взаимодействовать с системами безопасности [88]. Необходимо также подтверждение качества по

соответствующим стандартам, валидация на основе лабораторных калибровок, проверка покрытия рабочих диапазонов и достаточная вычислительная эффективность для работы в реальном времени. Чтобы продлить межповерочный интервал, измерительная система должна доказать, что OLM подтверждает нахождение датчиков в установленных безопасных пределах.

Ограничения OLM

OLM не всегда способен охватить полный диапазон прибора – особенно вблизи пороговых точек. Метод не имеет абсолютного эталона, поскольку сравнивает сигналы попарно (один с другим). Недостаточная точность модели может имитировать дрейф датчика; вычислительные затраты при этом остаются высокими. Возможны расхождения с результатами ручных калибровок в различных условиях. Кроме того, OLM предполагает стационарный характер деградации, что может приводить к пропуску отказов, не связанных с дрейфом. Нормативное признание метода требует дополнительной валидации для различных типов отказов, выходящих за рамки дрейфа.

1.4.3 Самовалидирующийся датчик

Самовалидирующийся датчик (далее – SEVA) представляет собой не просто измерительный преобразователь, а интеллектуальную систему, которая непрерывно отслеживает собственную работу и выдаёт не только измеренное значение, но и оценку его качества. Концепция SEVA была предложена в 1993 году [50]. В состав датчика входят чувствительный элемент, процессор и программно-аппаратное обеспечение для мониторинга состояния и оценки качества измерений в реальном времени [38]. Её ключевая идея заключается в том, что каждый датчик, используя собственные вычислительные ресурсы, оценивает достоверность выдаваемых данных на основе аналитической избыточности.

Аналитическая избыточность, в свою очередь, опирается на математические модели, позволяющие генерировать дополнительную информацию о процессе. Методы анализа этой информации дают возможность обнаруживать неисправности датчиков и измерительных систем без увеличения числа физических каналов.

Принцип действия SEVA

Датчик с интеграцией технологии SEVA объединяет шесть функциональных модулей, как представлено в работе [38]: обнаружение неисправностей, локализация и диагностика, восстановление и реконструкция данных, оценка неопределённости. Мониторинг строится по иерархическому принципу: датчики нижнего уровня выдают измерения и метрики качества; вышестоящий блок обрабатывает данные нескольких датчиков с помощью многомерной статистики и при обнаружении аномалий запрашивает у них дополнительную информацию для различения неисправностей датчиков и реальных изменений процесса.

Условия применимости SEVA

Технические: датчик должен обладать возможностью встроенной обработки данных и самодиагностики, основанной на заложенных разработчиком алгоритмах. Он обязан иметь цифровой интерфейс для передачи не только измеренного значения, но и диагностической информации, статуса валидации и данных о техническом состоянии. Также требуются алгоритмы для компенсации неисправностей и оценки неопределённости в реальном времени, позволяющие динамически корректировать качество измерения при обнаружении любой аномалии.

Измерительные: оценённая датчиком неопределённость должна учитывать все возможные источники погрешностей. Необходима метрологическая прослеживаемость – от этапа проектирования до каждого отдельного измерения, включая производство и аттестацию [49].

Интеграционные: датчик SEVA должен участвовать в слиянии данных, то есть объединять два или более независимых измерения от других датчиков того же типа, измеряющих один параметр, для получения наилучшей оценки истинного значения. Кроме того, он должен соответствовать действующим нормативным документам, что обеспечивает совместимость и достоверность валидационных метрик.

Ограничения SEVA

Технические: эффективность компенсации и оценки неопределённости критически зависит от реализованных алгоритмов, которые различаются в зависимости от типа датчика. Точность функциональных модулей (обнаружения, диагностики, восстановления) ограничена сложностью моделирования всех возможных типов неисправностей [50].

Реализационные: создание датчика с технологией SEVA требует значительных вычислительных ресурсов (микропроцессора и памяти). Интеграция нескольких функциональных модулей усложняет конструкцию, что затрудняет разработку и производство. Разнообразие физических принципов действия датчиков требует индивидуальных подходов для каждого модуля, что мешает полной стандартизации технологии.

Эксплуатационные: SEVA предполагает стационарный характер деградации, что может приводить к необнаруженным неисправностям при внезапных катастрофических отказах или нестационарной деградации. Кроме того, перекрёстная валидация между несколькими датчиками – необходимая при некоторых режимах – требует резервирования, которое не всегда доступно на объектах.

1.4.4 Метрологический самоконтроль

Под метрологическим самоконтролем (далее – MSC) понимают способность интеллектуального датчика или измерительной системы автоматически оценивать собственную метрологическую исправность в ходе эксплуатации, формируя при этом достоверную оценку качества каждого результата измерений [5],[18],[89].

В отличие от традиционных методов поверки и калибровки, предполагающих внешнее вмешательство и остановку оборудования, MSC реализуется непосредственно в процессе работы средства измерений. Это позволяет не только выявлять метрологические отказы на ранних стадиях, но и обоснованно продлить межповерочные интервалы, снижая эксплуатационные затраты и без потери достоверности контроля.

MSC преследует три основные цели. Во-первых, это снижение вероятности получения недостоверной измерительной информации в течение межповерочного или межкалибровочного интервала, что означает уменьшение риска необнаруженного метрологического отказа. Во-вторых, это обоснование изменения межповерочного или межкалибровочного интервала в зависимости от остаточного метрологического ресурса. В-третьих, это сокращение эксплуатационных затрат за счет уменьшения числа проверок или калибровок, а также снижения расходов на устранение последствий отказов.

Принцип действия MSC

Метрологический самоконтроль опирается на дополнительные данные, получаемые за счет избыточности трех типов: структурной (пространственной), временной и функциональной (информационной) [5].

Структурная избыточность предполагает использование дополнительных элементов – мер и измерительных преобразователей, количество которых превышает минимально необходимое для измерений.

Временная избыточность заключается в проведении дополнительных измерительных операций с интервалом времени меньше минимально необходимого или в полосе частот шире максимально требуемой.

Функциональная (информационная) избыточность основана на использовании дополнительных зависимостей между измеряемой величиной и параметрами выходного сигнала либо между величинами, измеряемыми различными каналами.

Условия применимости MSC

В соответствии с ГОСТ Р 8.734 [5], MSC должен обеспечивать получение информации о статусе результата измерений. Помимо этого, результаты самоконтроля могут дополнительно включать: сведения об использованном методе; область диапазона измерений (для прямого самоконтроля); критическую составляющую погрешности (для диагностического самоконтроля); опорные значения и допускаемые пределы их изменения, а также интервал времени между процедурами самоконтроля [2].

Рекомендуемый максимальный межкалибровочный интервал должен быть обоснован и определен на этапе разработки. Фактические межповерочный и межкалибровочный интервалы не должны превышать рекомендуемый максимальный интервал.

Выбор метода метрологического самоконтроля должен включать выявление вероятных источников погрешности, определение критической составляющей погрешности и анализ составляющих погрешности. При выявлении источников погрешности анализируются ожидаемые условия эксплуатации (установившиеся и переходные режимы), публикации о причинах возникновения погрешностей аналогов, опыт эксплуатации аналогов, а также результаты их испытаний.

Ограничения MSC

Технические: структурная избыточность требует дополнительного пространства в корпусе датчика для размещения мер и преобразователей. Прямой самоконтроль ограничен по диапазону и может быть реализован только в ограниченных областях измерений и динамических характеристик. Кроме того, при использовании мер прямой самоконтроль возможен лишь для ограниченного набора измеряемых величин (температура, длина, напряжение, ток).

Эксплуатационные: в процессе эксплуатации возможно нарастание погрешности в поддиапазоне, смещенном относительно контролируемой точки. В термоэлектрических датчиках в металл капсулы могут диффундировать примеси, вызывая искажение температурного «плато» и увеличение погрешности самоконтроля.

1.5 Оценка функции метрологического самоконтроля системы контроля деформации крепежных шпилек

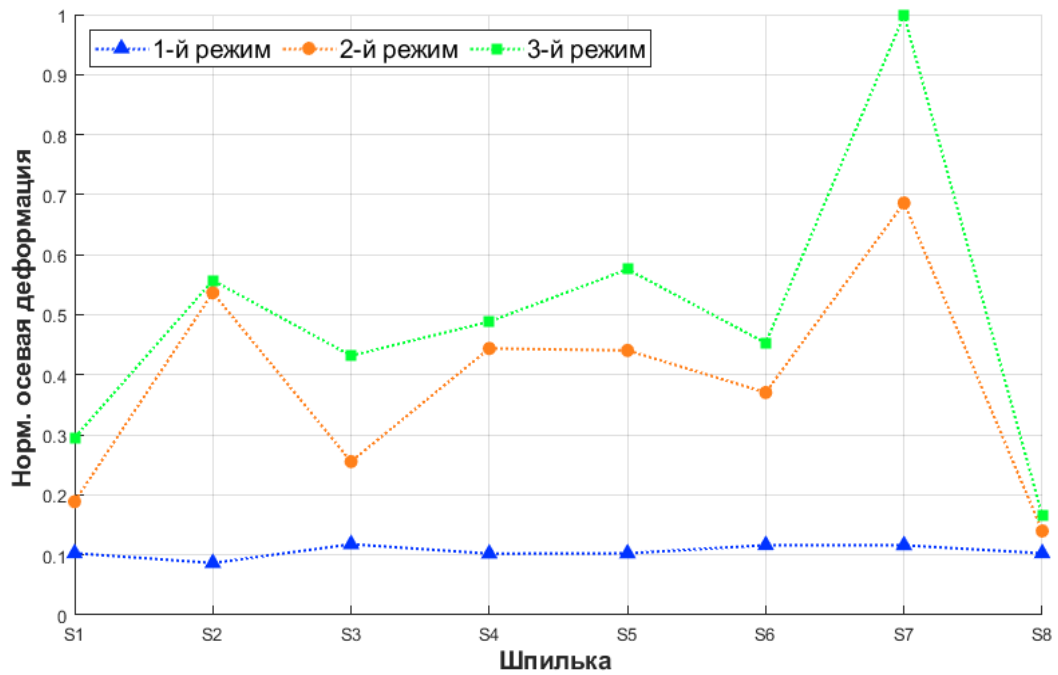
В подразделе 1.2.3 были описаны системы, осуществляющие непрерывный контроль осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины. Среди них система ПТК КМ-Дельта является наиболее современной и располагает функцией метрологического самоконтроля, основанной на принципе структурной избыточности в соответствии с ГОСТ Р 8.734.

Согласно указанному стандарту, структурная избыточность на основе датчиков близкой точности обеспечивается, когда разность между измеренными значениями и опорным значением не превышает $1/5$ допускаемой абсолютной погрешности системы измерений [5]. Опорное значение определяется как среднее арифметическое значение результатов измерений датчиков, составляющих структурную избыточность, то есть результаты измерений датчиков расположенных по периметру крышке гидротурбины.

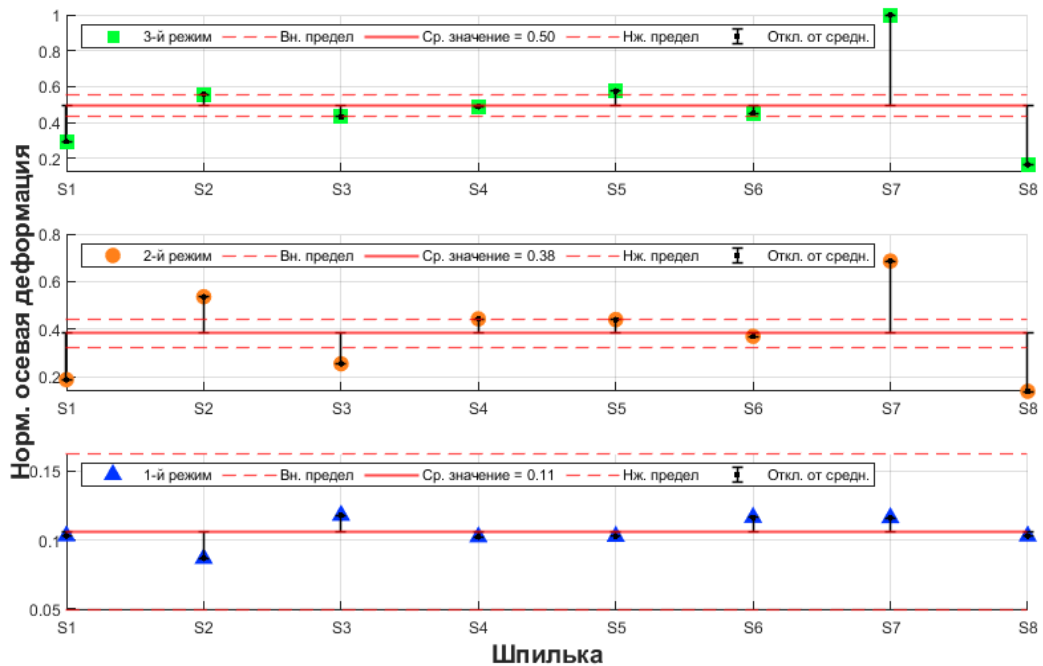
Тем не менее, оценка функции метрологического самоконтроля на основе структурной избыточности системы контроля осевой деформации крепежных шпилек показала, что данное условие не соблюдается в реальных условиях эксплуатации ГА. Это связано с конструкцией крышки гидротурбины – а именно с ее ребрами жесткости, – которая вызывает неравномерное распределение осевой деформации крепежных шпилек по их периметру. В результате наблюдаются значительные различия в измеренных значениях осевой деформации шпилек (рисунок 1.7а), связанные с работой ГА на трех основных эксплуатационных режимах: останов (1), холостое вращение (2) и генерация (3).

Результаты оценки представлены на рисунке 1.7б, где наблюдается, что четыре датчика превышают пределы, установленные стандартом, во втором и третьем режимах, что свидетельствует о том, что структурная избыточность не обеспечивается.

Поскольку корректная реализация принципа структурной избыточности в функции метрологического самоконтроля состояния датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек не гарантируется, повышается риск для безопасности ГА во время ее эксплуатации.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Осевая деформация крепежных шпилек: а) деформация в зависимости от режима работы ГА; б) оценка функции метрологического самоконтроля системы (составлено автором)

1.6 Выводы по главе 1

Выполненный анализ эксплуатационных характеристик деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, методов и приборов контроля их деформации, основных типов неисправностей датчиков и методов обеспечения

результатов измерений позволяет сформулировать цель и поставить задачи диссертационной работы:

Целью данной работы является повышение достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации гидроагрегата за счет обнаружения и диагностики неисправностей датчиков.

Для реализации поставленной цели в диссертации были решены следующие **задачи:**

1. Анализ конструкции узла крепления, физических основ нагружения и деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, а также измерительных систем контроля их деформации и методов обеспечения достоверности результатов измерений.

2. Научное обоснование применимости принципа аналитической избыточности для разработки метода обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

3. Разработка опорных моделей осевой деформации крепежных шпилек на основе экспериментальных данных и с применением линейного фильтра Калмана для формирования аналитической избыточности (невязок).

4. Валидация работоспособности моделей в условиях, имитирующих реальную эксплуатацию (наличие выбросов, шума измерения и изменение режима работы ГА).

5. Выполнение анализа отклика опорных моделей и поведения невязок при имитации неисправностей датчиков (смещение, дрейф, деградация прецизионности, залипание), а также разработка алгоритма автоматического обнаружения и диагностики неисправностей на их основе.

6. Разработка рекомендаций по практическому использованию предложенного метода в системах контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбин на гидроэлектростанциях.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ

Как было показано в разделе 1.5, конструкция крышки гидротурбины – а именно наличие ребер жесткости – оказывает влияние на деформацию крепежных шпилек. Следовательно, реализация функции метрологического самоконтроля на основе принципа структурной избыточности в процессе работы ГА не гарантируется. Кроме того, из анализа подходов к обеспечению достоверности результатов измерений при длительных межповерочных интервалах, выполненного в разделе 1.4, следует существование иных подходов, основанных на временной либо аналитической избыточности.

2.1 Теоретические основы применения принципа аналитической избыточности к рассматриваемой задаче

Подходы, использующие временную и аналитическую избыточность, позволяют обеспечить надежность измерений за счет обнаружения неисправностей датчиков или измерительных систем. В данном разделе анализируется, какой из этих двух подходов применим для решения конкретной задачи системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

2.1.1 Анализ применимости принципа временной избыточности к системе контроля осевой деформации крепежных шпилек

Согласно определению временной избыточности, приведенному в подразделе 1.4.4, ее реализация требует выполнения измерений через интервалы времени, меньшие номинального периода опроса, с целью формирования дополнительной информации, позволяющей после соответствующего анализа выявить наличие неисправности средства измерения (датчика).

Система, используемая для измерения осевой деформации крепежных шпилек, функционирует в конфигурации с интервалом измерений, равным одной секунде. Благодаря одновременной регистрации напора воды, выработки электроэнергии и осевой деформации шпилек становится возможным

исследование временной эволюции и взаимосвязей между этими переменными для характеристики поведения осевой деформации шпилек (рисунок 2.1).

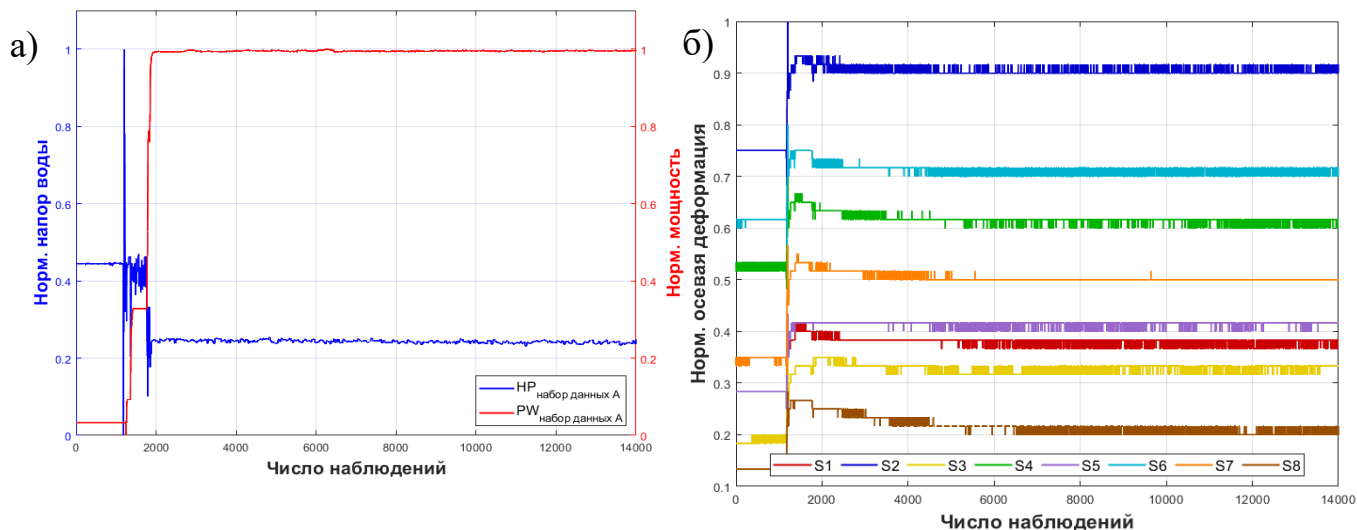


Рисунок 2.1 – Данные электрической мощности (PW), напор воды (HP) и осевой деформации крепежных шпилек (составлено автором)

По результатам измерений наблюдается следующее:

1. При начале выработки электроэнергии ГА происходит быстрое изменение как давления воды, так и деформации шпилек (измерение № 1200).

2. После завершения переходного процесса измерения напора воды и электрической мощности достигают установившегося состояния приблизительно к измерению № 2000. Однако деформация шпилек продолжает изменяться.

3. Измерения осевой деформации стабилизируются около измерения № 3500, сохраняя с этого момента лишь незначительные вариации.

На основании этих наблюдений делается вывод, что, хотя быстрое изменение деформации шпильки действительно имеет место, оно происходит исключительно при изменениях режима работы ГА. Поскольку контроля деформации шпилек должен быть непрерывным – как в переходных, так и в установившихся процессах, – и учитывая, что в установившемся состоянии деформация шпилек изменяется медленно, применение временной избыточности может предоставить ценную информацию для обнаружения аномалий, а именно – неисправностей типа «деградация прецизионности» датчиков. Это осуществимо потому, что в нормальном установившемся режиме деформация шпильки изменяется плавно;

следовательно, если наблюдаются колеблющиеся показания, подобные колебания не могут быть обусловлены реальными изменениями деформации и, вероятно, свидетельствуют о неисправности датчика.

Таким образом, исходя из определения временной избыточности, особенностей системы мониторинга и типовых отказов датчиков, делается заключение о возможности применения временной избыточности для обнаружения отказов типа деградации точности у датчиков, измеряющих осевую деформацию крепежных шпилек.

2.1.2 Анализ применимости принципа аналитической избыточности к системе контроля осевой деформации крепежных шпилек

В подразделах 1.4.3 и 1.4.4 были представлены принципы аналитической и функциональной избыточности. Хотя эти понятия взаимосвязаны, между ними существуют фундаментальные различия. Функциональная избыточность, определяемая согласно ГОСТ Р 8.734 [5], реализуется путем использования соотношений или функций, связывающих измеряемую величину с другими параметрами, регистрируемыми дополнительными датчиками [15].

В отличие от этого, аналитическая избыточность строится на основе математической модели, описывающей поведение реального объекта, процесса или явления с помощью математических уравнений.

Хотя не существует прямых функциональных зависимостей, связывающих деформацию шпилек с напором воды или с генерацией электроэнергии, возможно разработать модель динамики деформации крепежных шпилек.

Применение аналитической избыточности для формирования дополнительной информации о состоянии датчика имеет два существенных преимущества по сравнению с другими подходами [105]:

1. Отсутствие необходимости сравнения показаний пространственно распределенных датчиков – не требуется сопоставлять измеренные значения между датчиками, расположенными по периметру крышки гидротурбины, что устраняет ограничение, присущее структурной (аппаратной) избыточности.

2. Независимость от частоты измерений – дополнительная информация не зависит от выполнения измерений с более короткими интервалами времени (в отличие от временной избыточности).

По изложенным причинам в данном исследовании принято решение применить принцип аналитической избыточности для обеспечения достоверности результатов измерений системы контроля осевой деформации крепежных шпилек. На рисунке 2.2 представлена теоретическая схема принципа аналитической избыточности для формирования дополнительной информации.

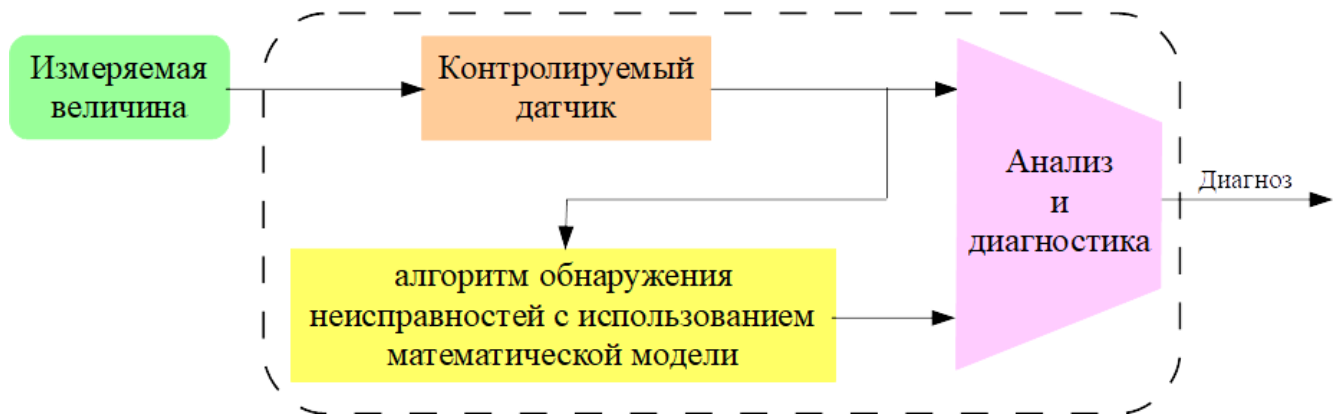


Рисунок 2.2 – Схема принципа аналитической избыточности для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков [38]

Реализация принципа аналитической избыточности требует наличия математической модели для генерации дополнительной информации. Такая модель может быть получена на основе физических принципов или на основе эмпирических данных [40].

На рисунке 2.3 приведена методология построения модели, которая включает четыре этапа: моделирование, верификация, улучшение и валидация. Обоснование такого подхода для разработки модели представлено в следующем разделе.

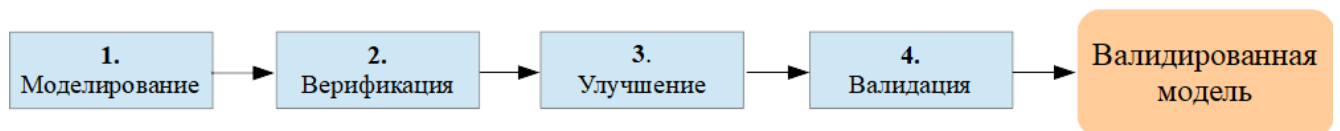


Рисунок 2.3 – Методология построения опорных моделей датчиков осевой деформации (составлено автором)

2.2 Разработка опорных моделей для формирования дополнительной информации датчиков осевой деформации

Поскольку модель должна отражать динамическое поведение осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при различных режимах работы ГА, необходимо провести анализ их поведения. На рисунке 2.4 показана взаимосвязь между осевой деформацией шпилек, изменениями напора воды и вырабатываемой электрической мощностью.

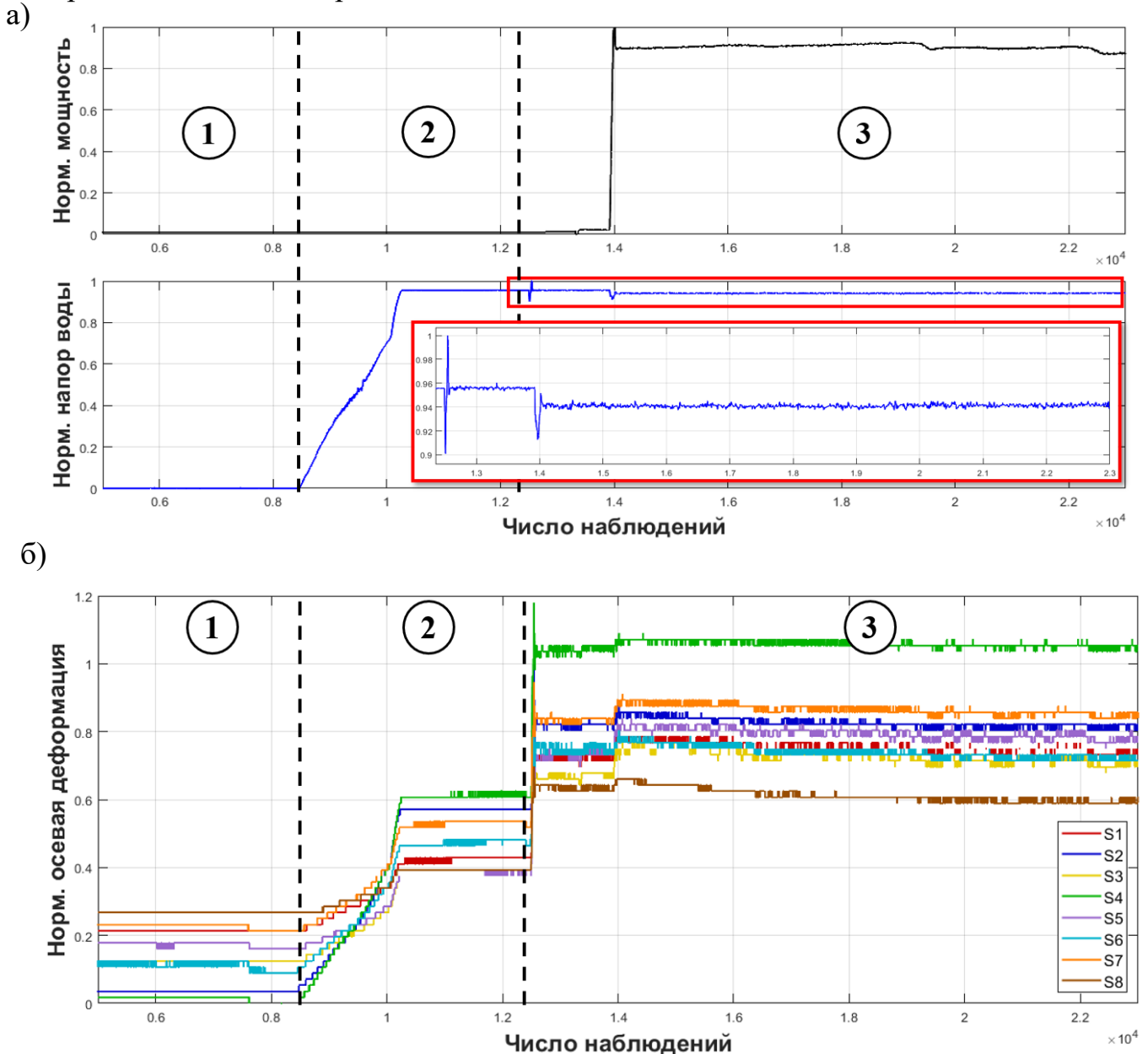


Рисунок 2.4 – Соотношение напора воды, выработки электрической мощности и деформации шпилек при различных режимах работы ГА: 1 – останов; 2 – холостое вращение; 3 – генерация (составлено автором)

Из рисунка 2.4 видно, что, хотя общая тенденция деформации крепежных шпилек является сходной, абсолютные значения деформации каждой шпильки различаются на трех режимах работы ГА:

Режим 1 – Останов: шпильки деформируются вследствие их предварительной затяжки.

Режим 2 – Холостое вращение (без нагрузки): гидростатическое давление воды воздействует на крышку турбины, деформируя ее и, как следствие, деформируя шпильки, которые крепят крышку к опорному кольцу. В этом режиме электрическая энергия еще не вырабатывается.

Режим 3 – Генерация: возникает дополнительная деформация шпилек, когда генератор ГА начинает вырабатывать электрическую энергию.

Основной причиной различий в значениях деформации между датчиками S1–S8, как уже упоминалось ранее, является наличие ребер жесткости в структуре крышки гидротурбины.

Ввиду изложенных причин необходимо разработать модели, которые оценивают состояние деформации каждой из контролируемых шпилек с учетом режимов работы ГА, а также величин напора воды и вырабатываемой электрической мощности. Кроме того, модели должны быть применимы как в переходных, так и в установившихся процессах, а также как при работе ГА с полной нагрузкой, так и с частичной нагрузкой.

2.2.1 Физическо-математическое моделирование динамики деформации крепежных шпилек

На основе процесса измерения осевой деформации крепежной шпильки с помощью преобразователей линейных перемещения (далее – датчики) была разработана эквивалентная механическая модель динамики осевой деформации крепежной шпильки, представленная на рисунке 2.5.

Масса крышки моделируется массой M_1 , на которую действует сила гидростатического давления F_H . Под действием этой силы крышка деформируется, то есть смещается (Y_1), при этом деформируются и крепящие ее шпильки (Y_2).

Крепежные шпильки оказывают сопротивление этой деформации за счет своей жесткости, что моделируется пружиной с коэффициентом жесткости k_1 .

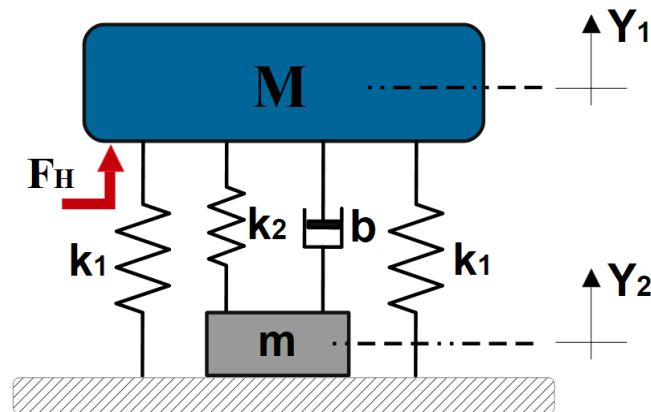


Рисунок 2.5 – Механическая модель динамики осевой деформации крепежной шпильки (составлено автором)

Масса стержня датчика и его контактного наконечника моделируется массой m_2 . Поскольку контактный наконечник создает измерительное усилие на калибровочном стержне, с массой m_2 ассоциируются пружина жесткостью k_2 и демпфер с коэффициентом демпфирования b , обеспечивающие постоянный контакт между массой m_2 и калибровочным стержнем.

Далее, путем анализа сил, взаимодействующих между элементами механической модели, а также силы, вызывающей перемещение массы m_2 (которая представляет собой деформацию шпильки относительно калибровочного стержня), и применяя второй закон Ньютона, получено уравнение (2.1). Оно математически связывает деформацию шпильки Y_2 с деформацией крышки турбины Y_1 в комплексной области Лапласа ' s '.

$$\frac{Y_{2(s)}}{Y_{1(s)}} = \frac{bs + k_2}{m_2 s^2 + bs + k_2} \quad (2.1)$$

Поскольку деформация Y_1 вызывается силой F_H , которая возникает за счет изменения гидростатического давления воды ΔP на площади крышки A согласно соотношению $F_H = \Delta P \cdot A$, а изменение гидростатического давления определяется как $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta H$ (где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, ΔH – изменение высоты столба воды), то через закон Гука ($F_H = k \cdot Y_1$, где k –

коэффициент деформации системы «крышка турбины – шпилька») можно установить связь с измерением изменения столба давления воды. Это позволяет получить уравнение (2.2), которое математически связывает деформацию шпильки Y_2 с изменением измеряемого столба воды H в комплексной области Лапласа (s).

$$\frac{Y_{2(s)}}{H_{(s)}} = \frac{A\rho g(bs + k_2)}{k_1(m_2s^2 + bs + k_2)} \quad (2.2)$$

Как было установлено ранее, на деформацию каждой шпильки влияют ребра жесткости крышки гидротурбины, вследствие чего деформация каждой шпильки оказывается различной. Хотя уравнение (2.2) представляет собой общую модель деформации крепежных шпилек, установление связи этой модели с влиянием конструкции крышки является сложной задачей.

2.2.2 Эмпирическое моделирование динамики деформации крепежных шпилек на основе экспериментальных данных

В контексте данного исследования для разработки эмпирической модели, описывающей динамику деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, необходимо определить фундаментальных элемента: переменные, участвующие в модели и структуру выбранной модели.

Выбор переменных

Согласно основам генерации электроэнергии на ГЭС, производимая электрическая энергия является результатом давления, создаваемого напором воды, которое приводит во вращение ротор гидротурбины. Это гидравлическое давление порождает механическую силу, вызывающую деформацию как крышки гидротурбины, так и крепежных шпилек, ее фиксирующих. Данная физическая взаимосвязь показана на рисунке 2.4, где представлена эволюция деформации крепежных шпилек в зависимости от напора воды и, как следствие, от генерации электрической мощности.

Исходя из этой теоретической основы, предлагаемая эмпирическая модель для описания динамики деформации шпилек должна связывать две упомянутые переменные: гидравлическое давление и деформацию шпилек. В данной модели устанавливается причинно-следственная связь между независимой переменной

(входом) и зависимой переменной (выходом), где последняя соответствует датчику, состояние которого требуется контролировать. Переменные определяются следующим образом:

Выходная переменная $y(t)$ – представляет собой деформацию крепежных шпилек, измеряемую с помощью датчиков линейных перемещения. Эта переменная будет оцениваться эмпирической моделью для последующего сравнения с реальными измерениями путем вычисления невязки.

Входная переменная $x(t)$ – соответствует измерению напора воды. Данная переменная имеет прямую физическую корреляцию с деформацией шпильки, поскольку приложенное давление является непосредственной причиной механической силы, вызывающей деформацию. Таким образом, $x(t)$ будет выступать в качестве предикторной переменной внутри эмпирической модели.

Структура эмпирической модели

Представленная физико-математическая модель показывает, что динамика деформации крепежных шпилек соответствует динамике системы второго порядка в области Лапласа. По этой причине структура каждой эмпирической модели, связанной с каждым датчиком (S1–S8), должна быть аналогична структуре указанной модели. Кроме того, ее оценка должна основываться на использовании экспериментальных данных, в которых напор воды рассматривается как входной сигнал, а деформация – как выходной сигнал, как указано в математическом выражении (2.3):

$$G_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{H_{(s)}} \quad (2.3)$$

где $G_{(s)}$ – передаточная функция, описывающая динамику деформации шпильки;

$Y_{(s)}$ – выходной сигнал «деформация шпильки»;

$H_{(s)}$ – входной сигнал «напор воды».

2.2.3 Оценка неопределенности эмпирических моделей

Оценка параметров эмпирических моделей $G_{(s)}$ выполняется на основе данных, полученных от датчиков, измеряющих осевую деформацию крепежных шпилек крышки гидротурбины, а также от датчика напора воды. Они обладают

собственной погрешностью измерения. Кроме того, в процессе измерения такие факторы, как измерительный шум, внешние возмущения и дискретизация, могли повлиять на точность измерений. Указанные факторы непосредственно влияют на репрезентативность и качество набора данных, используемого для оценки параметров моделей $G_{(S)}$. Следовательно, необходимо количественно оценить неопределенность, связанную с каждой эмпирической моделью.

В Руководстве по выражению неопределенности измерения (GUM) в соответствии с нормативными документами JCGM 100 [62] и JCGM 101 [63] описываются аналитический метод и метод Монте-Карло для оценки неопределенности измерений.

Аналитический метод

Согласно руководства JCGM 100, аналитический метод оценивания неопределенности измерений реализует следующую последовательность этапов.

На первом этапе формируется математическая модель измерения $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$, однозначно описывающая связь между выходной величиной и входными величинами.

Второй этап предполагает количественное оценивание стандартных неопределенностей всех входных величин $u(x_i)$, причем JCGM 100 устанавливает два концептуально различных подхода: тип А (основан на статистическом анализе серий наблюдений) и тип В (базируется на априорной информации, включая данные поверки, калибровки, паспортные и справочные данные).

Третий этап – вычисление суммарной стандартной неопределенности выходной величины $u_c(y)$ выполняется путем распространения неопределенностей входных величин и коэффициентов чувствительности (c_i). В случае некоррелированных входных величин выражение для $u_c(y)$ принимает вид корня квадратного из суммы квадратов взвешенных неопределенностей (2.4):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i \cdot u(x_i)} \quad (2.4)$$

где c_i – коэффициенты чувствительности равным $\frac{\partial f}{\partial x_i}$;

$u(x_i)$ – стандартные неопределенности входных величин x_i .

Наконец, для представления результата в форме, удобной для практического использования, вводится расширенная неопределенность по формуле (2.5):

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.5)$$

где U – расширенная неопределенность;

k – коэффициент охвата, обычно принимается $k = 2$, что соответствует доверительной вероятности приблизительно 95 % при нормальном распределении выходной величины.

Метод Монте-Карло

В соответствии с JCGM 101 для оценки неопределенности измерений методом Монте-Карло базируется на концепции распространения распределений, в отличие от аналитического метода, основанного на линеаризации модели измерения [63].

Данный подход включает следующие этапы:

- задание для каждой входной величины x_i функции плотности вероятности на основе доступной априорной информации (тип А или тип В);
- генерацию с использованием методов псевдослучайных чисел большого числа M (как правило, $M > 10^6$) независимых реализаций входных величин;
- вычисление для каждой реализации соответствующего значения выходной величины $y_j = f(x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,N})$;
- статистический анализ полученной выборки $\{y_1, y_2, \dots, y_M\}$.

На основе этой выборки определяются оценка измеряемой величины $\bar{y}$ (выборочное среднее), стандартная неопределенность $u(\bar{y})$, а также границы покрывающего интервала для заданной доверительной вероятности (95 %), которые устанавливаются непосредственно по эмпирическому распределению без предположения о его симметричности или нормальности.

2.2.4 Улучшение оценки состояния осевой деформации крепежных шпилек с использованием фильтра Калмана

Эмпирические модели обладают фундаментальным ограничением: область их адекватности, как правило, крайне узка и ограничена диапазоном экспериментальных данных, на которых они были построены. В отличие от

теоретических моделей, характеризующихся широкой областью применимости, эмпирические модели не имеют физического обоснования своих параметров – их коэффициенты являются эмпирическими константами и не могут быть перенесены на другие объекты или условия без дополнительной верификации. Кроме того, эмпирические модели демонстрируют высокую чувствительность к качеству исходных данных: шумы, ошибки измерений и ограниченная длина временных рядов существенно снижают точность прогнозирования. По указанным причинам применение эмпирических моделей требует осторожности и ограничивается условиями, близкими к экспериментальным.

Одним из эффективных способов компенсации указанных ограничений при работе с динамическими системами является применение рекурсивного фильтра Калмана. Согласно теории [35], фильтр Калмана позволяет оценивать состояние динамической системы в условиях, когда измерения содержат шумы и погрешности, оптимизируя точность оценки посредством рекурсивного процесса, состоящего из этапов предсказания и коррекции.

При применении фильтра Калмана появляется возможность оптимально – в смысле минимума дисперсии ошибки – оценивать состояние деформации крепежной шпильки. В данном применении входной вектор соответствует напору воды, в то время как измеряемая выходная величина представляет собой деформацию шпильки, регистрируемую датчиком.

Этап 1: Предсказание (априорное)

Алгоритм вычисляет предварительную оценку состояния деформации, основываясь исключительно на динамической модели $G_{(S)}$ и на предыдущей оценке с помощью выражения (2.6). На этом этапе также распространяется ковариация ошибки, которая количественно определяет неопределенность, связанную с предсказанием до включения нового измерения (2.6):

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k,k-1} &= F\hat{x}_{k,k} + Gu_{k-1} \\ P_{k,k-1} &= FP_{k,k}F^T + Q\end{aligned}\tag{2.6}$$

где $\hat{x}_{k,k-1}$ – априорная оценка вектора состояния деформации шпильки в момент k , основанная на измерениях до момента $k-1$;

$\hat{x}_{k,k}$ – апостериорная оценка состояния деформации в предыдущий момент;

u_{k-1} – напор воды, приложенное в момент $k-1$ (возбуждение системы);

F и G – матрицы состояния и входа дискретизированной модели $G(s)$;

$P_{k,k-1}$ – ковариация ошибки предсказания (неопределенность, связанная с $\hat{x}_{k,k-1}$);

$P_{k,k}$ – ковариация ошибки предыдущей оценки;

Q – ковариационная матрица шума процесса.

Этап 2: Коррекция (апостериорная)

Как только становится доступным текущее измерение деформации, априорное предсказание корректируется путем его объединения с этим измерением. Коррекция выполняется с помощью коэффициента Калмана K_k , который оптимально взвешивает относительное доверие между предсказанием модели и реальным измерением в зависимости от соответствующих неопределенностей (матрицы Q и R). Затем обновляются как оценка состояния деформации, так и ковариация ошибки $P_{k,k}$, завершая рекурсивный цикл на основе выражения (2.7):

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_{k,k} &= \hat{x}_{k,k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1}) \\ P_{k,k} &= (I - K_k H_k) P_{k,k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \end{aligned} \quad (2.7)$$

где K_k – коэффициент (усиление) Калмана в момент k ;

H_k – матрица выхода дискретизированной модели;

R – ковариационная матрица шума измерения, количественно определяющая неопределенность, связанную с датчиком осевой деформации (например, погрешность измерения, электрический шум);

I – единичная матрица.

Таким образом, предсказание формирует предварительную оценку деформации шпильки на основе модели и напора воды, тогда как коррекция уточняет эту оценку с помощью реального измерения осевой деформации шпильки. Данный процесс дает оптимальную оценку состояния деформации крепежной шпильки.

2.3 Формирование невязок на основе аналитической избыточности

Дополнительная информация, полученная посредством применения принципа аналитической избыточности, формируется путем вычисления невязок между значениями, измеренными датчиками, и значениями, оцененными опорными моделями. Данные невязки формально определяются уравнением (2.8):

$$r_{(t)} = y_{(t)} - \hat{y}_{(t)} \quad (2.8)$$

где $r_{(t)}$ – невязка;

$y_{(t)}$ – измеренное значение датчика;

$\hat{y}_{(t)}$ – оцененное значение модели;

t – номер измерения или время.

С аналитической точки зрения основных неисправностей датчиков, представленных в подразделе 1.3.1, вектор невязок $r_{(t)}$ демонстрирует характерные различия (паттерны) в зависимости от типа неисправности, воздействующей на датчик.

2.3.1 Невязки при неисправности типа «смещение»

При данном состоянии ряд невязок проявляет ненулевое и постоянное во времени среднее значение b после возникновения неисправности, на фоне шума измерений в нормальных условиях $w_{(t)}$. Это подразумевает систематическое и стационарное отклонение от значения, оцененного моделью, и математически выражается по формуле (2.9):

$$r_{(t)} = b + w_{(t)} \quad (2.9)$$

2.3.2 Невязки при неисправности типа «дрейф»

В этом случае невязка демонстрирует нестационарную тенденцию, обычно линейного характера, хотя в некоторых случаях может быть и более высокого порядка. Эта тенденция отражает прогрессирующее отклонение d , зависящее от времени t , в измерении датчика. Для линейного дрейфа выражение имеет вид (2.10):

$$r_{(t)} = d \cdot t + w_{(t)} \quad (2.10)$$

2.3.3 Невязки при неисправности типа «деградация точности»

Данный тип характеризуется увеличением дисперсии шума датчика. Невязка сохраняет нулевое среднее значение, но демонстрирует значительное увеличение своей мгновенной дисперсии. Это проявляется в флуктуациях большей амплитуды по сравнению с вариациями, присутствующими в условиях нормальной работы. Математическое представление этой ситуации имеет вид (2.11):

$$r_{(t)} = w_{deg(t)} \quad (2.11)$$

где $w_{deg(t)}$ – шум с повышенной дисперсией.

2.3.4 Невязки при неисправности типа «залипание»

При этой неисправности, также называемой неисправностью фиксированного значения, датчик сообщает постоянное значение C , в то время как аналитическая модель $\hat{y}_{(t)}$ продолжает отслеживать изменяющуюся динамику реального процесса. Следовательно, результирующая невязка приобретает вид (2.12):

$$r_{(t)} = C - \hat{y}_{(t)} \quad (2.12)$$

Это выражение порождает траекторию, соответствующую отрицательному значению сигнала, оцененного моделью, смещенному на константу. Данное соотношение означает, что невязка уменьшается, когда модель увеличивается, и наоборот, создавая характерную форму «отраженного зеркального отображения» эволюции процесса.

Распознавание этих характерных (теоретических) паттернов в невязках составляет фундаментальную основу для реализации стратегий обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля осевой деформации крепежных шпилек.

Следует отметить, что в идеальных условиях (без неисправностей датчиков) значения вектора невязок r_j стремятся к нулю, а их отклонения служат основой для диагностики.

2.4 Разработка методология обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины

Достоверность результатов измерений датчиков осевой деформации обеспечивается обнаружением и диагностикой их неисправностей в условиях длительных межповерочных интервалов. Для автоматизации этой задачи разработана методология, основанный на теории обнаружения и диагностики неисправностей (FDD — от английского Fault Detection and Diagnosis) [93].

Методология разработки данного алгоритма структурирована в четыре последовательных этапа: обнаружение, локализация, классификация и диагностика (рисунок 2.6).

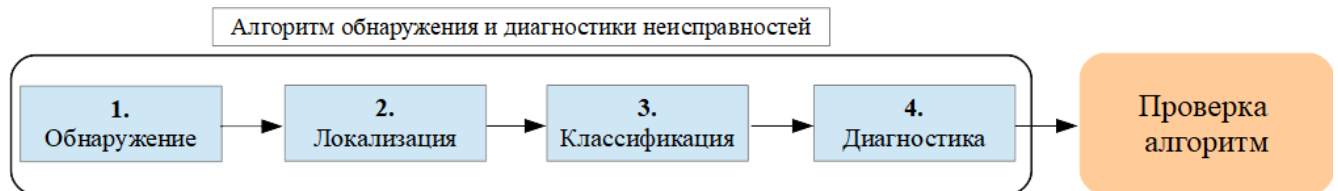


Рисунок 2.6 – Методология разработки алгоритма обнаружения неисправностей и диагностики метрологической исправности (составлено автором)

Данная методология позволяет не только обнаруживать наличие неисправности, но также локализовать, на каком именно датчике она произошла, классифицировать тип возникшей неисправности и выдать оценку метрологической исправности датчика (диагноз).

2.4.1 Обнаружение неисправностей

Цель этого этапа является установление того, отклоняется ли сигнал датчика осевой деформации от ожидаемого поведения деформации шпильки в нормальных условиях эксплуатации ГА. Для этого анализируется вектор невязок $r(t)$, формируемый с помощью аналитической избыточности на основе опорной модели, оценивающей динамику деформации каждой контролируемой крепежной шпильки.

Обнаружение неисправности требует определения критерия и метода, специфичных для каждого типа неисправности [24], [25]. Рассматриваемые типы неисправностей датчиков включают смещение, дрейф, деградации прецизионности и залипание. Для каждого типа применяется соответствующий метод обнаружения,

поэтому каждое срабатывание обосновывается комбинацией выбранного критерия и метода, адекватных наблюдаемому отклонению.

1. Критерий и метод обнаружения неисправности типа смещение

Из теоретического анализа невязок, представленного в разделе 2.3, следует, что $r_{(t)} = b + w_{(t)}$. Иными словами, невязки демонстрируют постоянное отклонение b с момента возникновения неисправности датчика. Следовательно, критерий обнаружения смещения основан на установлении минимального значения b , начиная с которого будет объявляться наличие аномалии. Для определения значения b необходимо проанализировать отклик опорной модели на набор данных, содержащих неисправность, с явным учетом шума или нормальных вариаций процесса.

Поскольку смещение порождает постоянное отклонение (сдвиг), для его обнаружения можно применить метод последовательных разностей. Этот метод заключается в сравнении абсолютной разности между последовательными измерениями невязок $\Delta r_{(t)}$ с пороговым значением b . Если разность $\Delta r_{(t)}$ превышает b , то неисправность считается обнаруженной. Разности вычисляются с помощью выражения (2.13):

$$\Delta r_{(t)} = r_{(t)} - r_{(t-1)} \quad (2.13)$$

где $\Delta r_{(t)}$ – абсолютная разность между последовательными невязками;

$r_{(t)}$ – значение невязки в момент времени t ;

$r_{(t-1)}$ – невязки в момент времени $t - 1$.

2. Критерий и метод обнаружения неисправности типа дрейф

При неисправности типа дрейф вектор невязок отражает прогрессирующую линейную тенденцию, которая моделируется как $r_{(t)} = d * t + w_{(t)}$ (см. раздел 2.3).

Критерий обнаружения основан на оценке значения наклона d и проверке того, превышает ли он заданное критическое пороговое значение. Значение d определяется путем анализа отклик опорных моделей на данные, содержащие неисправность.

Дополнительно, для снижения вероятности ложных срабатываний требуется, чтобы условие сохранялось в течение нескольких последовательных отсчетов (или моментов времени) перед объявлением о наличии дрейфа. Для оценки наклона и обнаружения прогрессирующего изменения сигнал анализируется с помощью неперекрывающихся скользящих окон. В пределах каждого окна вычисляется прогрессирующее изменение Δr_i как разность между последним и первым значением невязки в окне по формуле (2.14):

$$\Delta r_i = r_{\text{кон}} - r_{\text{нач}} \quad (2.14)$$

где Δr_i – прогрессирующее изменение в окне;

$r_{\text{нач}}$ – значение первой невязки в окне;

$r_{\text{кон}}$ – значение последней невязки в окне;

i – индекс окна от 1 до 3.

3. Критерий и метод обнаружения неисправности типа деградация прецизионности

Неисправность типа деградация прецизионности датчика приводит к увеличению дисперсии его измерений, что статистически выражается в росте стандартного отклонения невязок. Фактически это проявляется как возрастание шума в измерительном канале.

В связи с этим критерий обнаружения неисправности типа деградация прецизионности может быть обоснован на основе фиксации опорного значения, рассчитанного как максимальное среднеквадратическое отклонение (СКО) невязок между всеми датчиками $w_{\max(t)}$, установленными по периметру крышки гидротурбины, при нормальной работе ГА.

4. Критерий и метод обнаружения неисправности типа залипание

Наиболее характерным признаком неисправности датчика типа залипание является неизменность его показаний даже при изменении других параметров технологического процесса. В статистических терминах это означает, что дисперсия измерений неисправного датчика стремится к нулю. Данное свойство может быть использовано в качестве критерия для обнаружения неисправностей данного типа.

На основе расчета минимальной оценки среднеквадратического отклонения для датчиков осевой деформации в условиях нормальной работы ГА можно определить нижний порог вариации показаний датчиков ($w_{min(t)}$). Этот порог будет служить пороговым значением для обнаружения неисправностей.

2.4.2 Локализация неисправностей

После обнаружения неисправности алгоритм приступает к локализации того, какой именно датчик (или датчики) ее имеет. Поскольку датчики установлены по периметру крышки гидротурбины, все они имеют общую тенденцию деформации, как показано на рисунке 2.4. Это означает, что изменение нормальных условий эксплуатации ГА может быть ошибочно интерпретировано алгоритмом как неисправность сразу нескольких датчиков.

Например, повышение уровня вибрации при работе ГА отразится в разброс измерений. Однако это будет свидетельствовать не о проблеме с датчиками, а о закономерном изменении технологического процесса.

По этой причине необходимо соотносить обнаружение неисправности с динамикой других измеряемых параметров. Поскольку деформация крепежных шпилек зависит от напора воды и от генерации электрической мощности, обнаружение должно анализироваться совместно с этими переменными.

2.4.3 Классификация типа неисправности

На этапе обнаружения подтверждается факт наличия неисправности в системе датчиков. На этапе локализации идентифицируется конкретный неисправный датчик, а также подтверждается, что выявленная аномалия не вызвана изменением условий эксплуатации ГА.

Классификация неисправностей предполагает идентификацию характерных паттернов в векторах невязок $r(t)$, формируемых на базе аналитической избыточности. При наделении алгоритма моделями различных типов неисправностей он получает способность классифицировать контролируемые отклонения. При этом эффективность указанной классификации зависит также от количества доступной информации, которая определяет информативность паттернов, соответствующих каждой неисправности. Традиционный метод

решения данной задачи заключается в сравнении паттерна выявленной неисправности с набором предопределенных эталонных моделей (паттернов) [31].

2.4.4 Диагностика неисправностей

Диагностика неисправностей является завершающим этапом, в ходе которого состояние датчика определяется на основе анализа его технических характеристик. Для повышения достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины необходимо обеспечить достоверность результатов измерений датчиков, размещенных по периметру крышки.

Как указано в разделе 1.4, достоверность результатов измерений осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины достигается путем диагностики метрологической исправности каждого датчика системы контроля. Если степень выявленной неисправности превышает допустимые пределы, влияющие на точность или воспроизводимость измерений, соответствующие результаты следует признать недостоверными.

Для решения задачи диагностики состояния датчика (исправен / неисправен) требуется установить предельные значения контроля метрологической исправности. В качестве основы предлагается использовать максимальную абсолютную допустимую погрешность датчика (e_{max}), а также количественную оценку допустимой дисперсии, характерной для нормального режима работы ГА.

2.5 Выводы по главе 2

1. Проведенный анализ показал, что принципы структурной и временной избыточности не позволяют в полной мере обеспечить достоверность результатов измерений в рассматриваемой системе. В связи с этим обосновано, что решение проблемы достигается применением принципа аналитической избыточности.

2. Разработана методология построения опорных моделей для реализации принципа аналитической избыточности, который позволяет получить дополнительную информацию (невязки) на основе комбинации эмпирических моделей и линейного фильтра Калмана.

3. Выполнен теоретический анализ характерных паттернов невязок для четырех типов функциональных неисправностей датчиков: смещение, дрейф,

деградация прецизионности и залипание. Полученные паттерны положены в основу разработки критериев обнаружения и диагностики указанных неисправностей в рассматриваемой системе.

4. Разработана методология построения алгоритма обнаружения указанных неисправностей и диагностики метрологической исправности датчиков. Алгоритм базируется на анализе невязок, формируемых с помощью опорных моделей, и включает четыре этапа: обнаружение, локализацию, классификацию и диагностику.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК

3.1 Описание крепления крышки гидротурбины и системы сбора данных

3.1.1 Характеристика гидротурбины и ее крышки

Контроль осевой деформации крепежных шпилек осуществляется на радиально-осевой гидротурбине типа Френсиса, установленной на высоконапорной ГЭС. Как показано в разделе 1.1, крышка гидротурбины относится к наиболее ответственным элементам ГА. Ее фланец крепится к фланцу статора с помощью шпилек, равномерно распределенных по периметру. Перечень характеристик гидротурбины и ее крышки, имеющих значение для организации измерений, приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики гидротурбины и ее крышки, влияющие на процесс контроля деформаций (составлено автором на основе [1, 13])

Параметр	Значение	Влияние на процесс контроля деформации шпилек
Номинальная мощность, МВт	640	определяет диапазон рабочих нагрузок на шпильки
Максимальный напор, м	194	влияет на амплитуду циклических деформаций
Диаметр крышки, м	8,6	определяет требуемое количество датчиков по окружности
Количество крепежных шпилек, шт.	80	определяет дискретность пространственного контроля

3.1.2 Система измерения и расположения датчиков

Система установлена для контроля осевой деформации крепежных шпилек является комплексом программно-технических ПТК КМ-Дельта. Как описывается в документах [19], данная система предназначена для измерений линейных перемещения торцов шпилек относительно калибровочных стержней, установленных внутри восьми шпилек гидротурбин и выработки сигналов об опасной и аварийной деформации шпилек (рисунок 3.1).

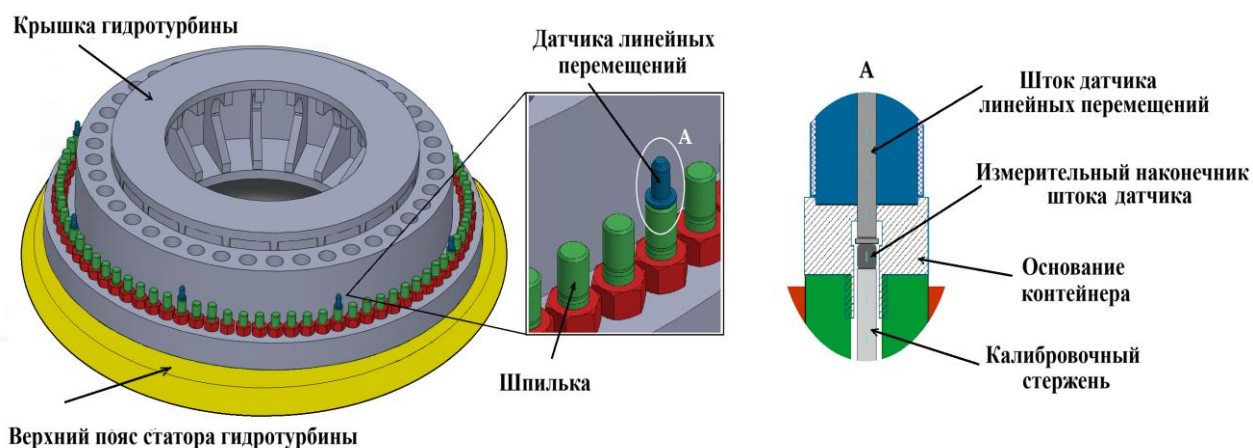


Рисунок 3.1 – Схема установки датчиков на крепежные шпильки крышки гидротурбины: А – внутренний вид установки датчика на шпильку (составлено автором на основе [7]).

ПТК КМ-Дельта является интеллектуальной многоканальной измерительной системой, интегрирующей функцию «метрологического самоконтроля» и разработанной в соответствии с ГОСТ Р 8.734 для увеличения межповерочного интервала с одного года до четырех лет. В таблице 3.2, показывается основные характеристики измерительной системы.

Таблица 3.2 – Метрологические характеристики системы ПТК КМ-Дельта (составлено автором на основе [19])

Система ПТК КМ-Дельта				
Количество измерительных каналов	Диапазон измерения перемещения МКЛП при монтаже, мкм	Диапазон измерения перемещения МКЛП при эксплуатации, мкм*	Пределы абсолютной погрешности, мкм	Цена единицы наименьшего разряда кода, мкм
8	от 5100 до 8300	от 250 до 760	± 10	0,5
*после монтажа значение перемещения МКЛП условно устанавливает равным 490 мкм.				
Преобразователь ЛИР-ДА 13А				
Диапазон измерения перемещения, мм	Пределы абсолютной погрешности, мкм	Измерительное усилие, Н	Масса (без кабеля), кг	
от -5 до 5	± 5	$\leq 1,5$	0,25	

3.1.3 Условия проведения измерений осевой деформации

Измерения деформации крепежных шпилек проводились в реальных условиях эксплуатации ГА. Непрерывная регистрация выполнялась в течение 21 дня с использованием восьми датчиков (S1–S8). Контроль осевой деформации осуществлялся в трех режимах работы: останов, холостое вращение и генерация

(при полной нагрузке и при 70 % номинальной мощности). Регистрация электрической мощности, напора воды и осевой деформации проводилась синхронно с интервалом 1 секунда (частота дискретизации 1 Гц).

3.2 Методика реализации принципа аналитической избыточности и построения опорных моделей

На основе теоретических положений, сформулированных в разделе 2.2, в настоящем подразделе определяется методика реализации принципа аналитической избыточности для формирования дополнительной информации от датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины. Схема реализации принципа представлена на рисунке 3.2.

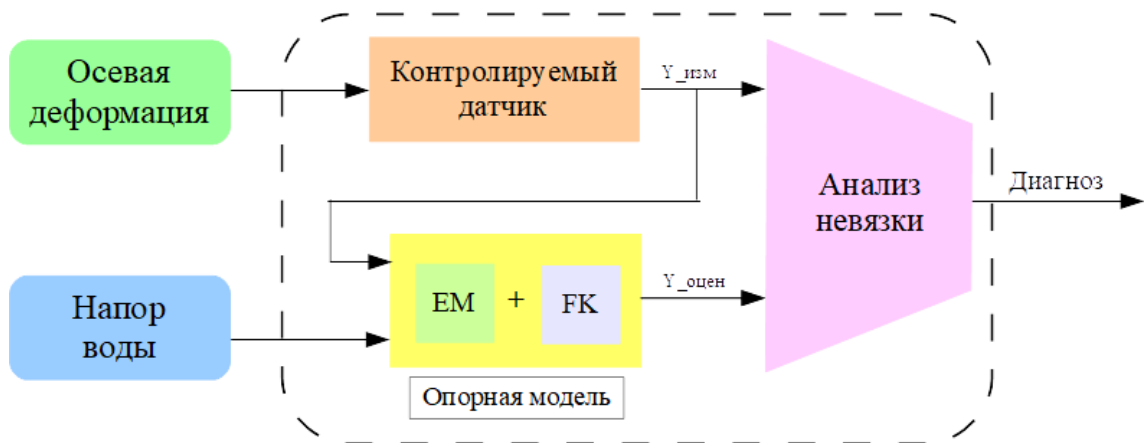


Рисунок 3.2 – Схема аналитической избыточности для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков (составлено автором на основе [38])

Необходимая модель для реализации данного принципа построена на основе комбинации эмпирической модели (далее – ЕМ) и фильтра Калмана (далее – FK). Методология построения опорных моделей для датчиков S1–S8 подробно изложена в подразделе 2.1.2. На рисунке 3.3 приведена схема реализации данной методологии с указанием используемых наборов данных.

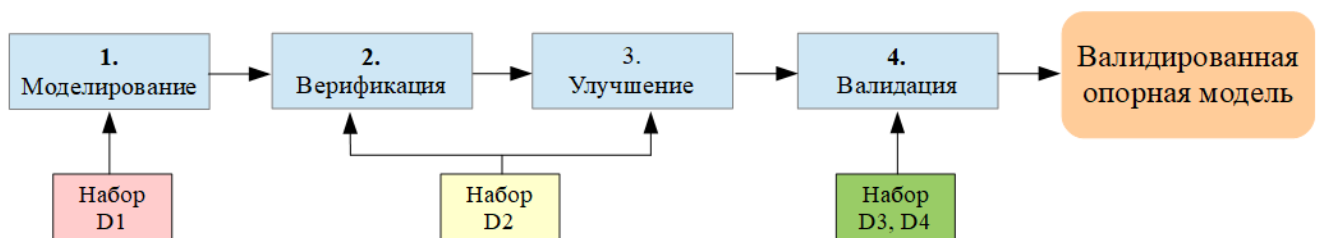
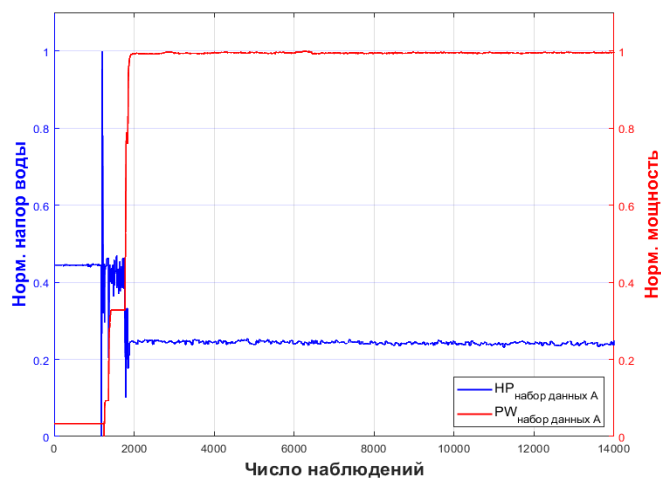


Рисунок 3.3 – Схема построения опорных моделей датчиков осевой деформации (составлено автором)

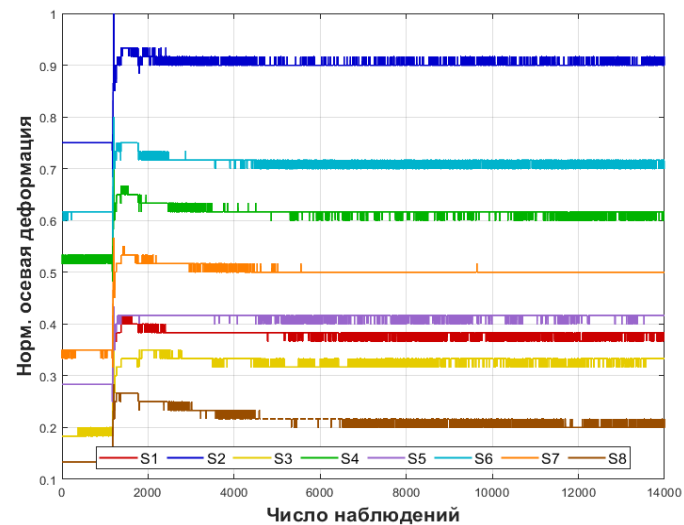
Для каждого этапа применены соответствующие наборы данных:

- набор D1 применен для оценки параметров ЕМ (этап моделирования);
- набор D2 использован для верификации ЕМ и улучшения оценивание осевой деформации шпилек с FK (этапы верификации и улучшения);
- набор D3 применен для валидации опорных моделей (этап валидации);
- данные набора D4 (дополнительные измерения) использованы в одной из процедур валидации опорных моделей.

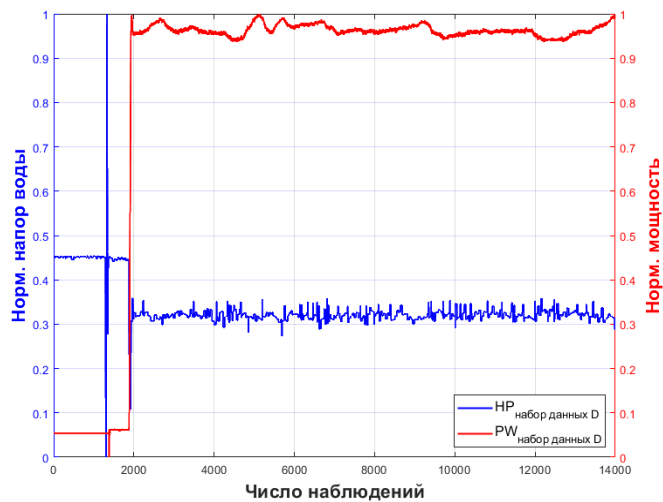
Наборы данных D1, D2 и D3 соответствуют измерениям электрической мощности, напора воды и осевой деформации шпилек при эксплуатации ГА на полной нагрузке. Набор данных D4 соответствует измерениям указанных параметров при работе ГА на частичной нагрузке (70 % от номинальной). Кроме того, все наборы данных сформированы при работе ГА в режимах 2 (холостое вращение) и 3 (генерация). На рисунке 3.4 представлены результаты изменения, соответствующих наборам D1 и D4. Наборы D2 и D3 не включены в рисунок 3.4, однако демонстрируют тенденции, схожие с набором D1.



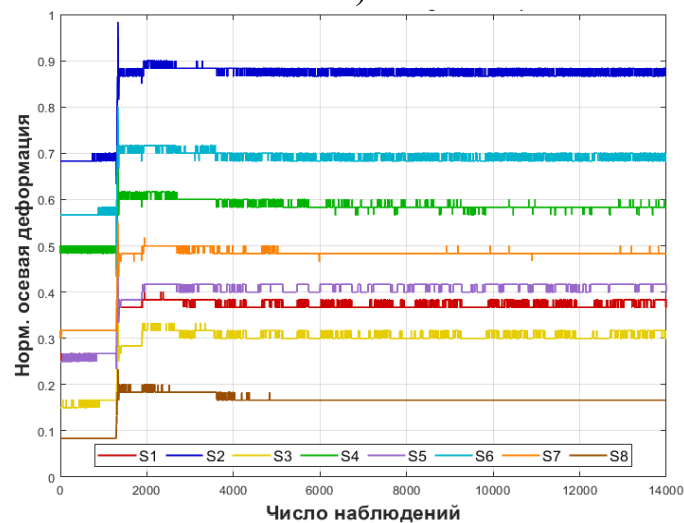
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.4 – Данные генерируемой мощности (PW), напор воды (HP) и осевой деформации крепежных шпилек (S1–S8):
а) и б) набор данных D1; в) и г) набор данных D4 (составлено автором)

3.2.1 Формирование эмпирических моделей динамики деформации шпилек

Для каждой крепежной шпильки (датчики S1–S8) строится ЕМ, связывающая входное воздействие (напор воды) с выходной переменной (осевая деформация).

Структура ЕМ обоснована теоретическим анализом динамики деформации крепежных шпилек, выполненным в подразделе 2.2.1. Математическая структура выбранной ЕМ соответствует модели второго порядка в области Лапласа и описывается передаточной функцией (3.1):

$$\frac{Y_{i(s)}}{H_{(s)}} = G_{i(s)} = \frac{Kp_i(s + Tz_i)}{(Tp1_i + s) \times (Tp2_i + s)}; \quad i = 1, \dots, 8 \quad (3.1)$$

где $G_{i(s)}$ – передаточная функция, описывающая динамику деформации i -й шпильки;

Kp_i , Tz_i , $Tp1_i$, $Tp2_i$ – параметры, характеризующие динамические свойства соответствующей шпильки при воздействии напора воды;

i – номер датчика.

Идентификация параметров выполняется в среде MATLAB с использованием пакета System Identification Toolbox (функция tfest). Для каждого из восьми каналов S1–S8 рассчитывается индивидуальный набор параметров ($Kp_i, Tz_i, Tp1_i, Tp2_i$), что позволяет учесть неоднородность распределения нагрузки по периметру крышки гидротурбины. Для идентификации используются данные измерений набора D1, соответствующие работу ГА в режиме холостого вращения и генерации. Выбор данного переходного режима обусловлен тем, что он содержит наиболее информативные динамические возмущения деформации шпилек.

Оценка параметров выполняется методом адаптивного Гаусса – Ньютона. Данный метод предназначен для решения задач нелинейной регрессии, что соответствует структуре модели (3.1), и обеспечивает устойчивую сходимость при умеренных вычислительных затратах. Результаты оценки параметров ЕМ для каждой крепежной шпильки соответствии со структурой $G_{i(s)}$ приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметров эмпирических моделей (составлено автором)

Параметр	Эмпирические модели							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Kp	2,24	2,55	3,57	1,80	3,13	2,16	3,21	2,46
Tz	-2,52	-3,81	-0,13	-5,11	-1,36	-3,03	-0,50	-0,86
$Tr1$	32,26	35,21	33,06	29,12	33,65	32,40	33,37	25,88
$Tr2$	0,95	0,97	0,85	0,95	0,95	0,91	0,92	0,95

3.2.2 Процедура оценки погрешности прогнозных моделей

Для оценки способности ЕМ прогнозировать динамики осевой деформации крепежных шпилек необходимо проанализировать систематическую погрешность (смещение) их прогнозов.

Как написано в работе [59], смещение (*Bias*) для выборки из N измерений определяется как среднее арифметическое разностей между измеренными и опорными значениями. *Bias* определяется выражением (3.2).

$$Bias \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{x}_j - x_j) \quad (3.2)$$

где N – количество измерений;

x_j – измеренное (опорное) значение для j -го измерения;

$\hat{x}_j$ – прогнозируемое значение, полученное с помощью эмпирической модели.

В качестве опорных значений приняты измеренные значения ($Y_{изм}$) из набора данных D2. Знак смещения позволяет установить, завышает или занижает модель прогнозируемые значения ($Y_{прогн}$) по сравнению с реальными измерениями: положительное смещение указывает на систематическое занижение прогноза, отрицательное – на завышение.

Кроме того, проводится качественный анализ способности эмпирических моделей $G_{i(S)}$ воспроизводить динамику осевой деформации в переходном и установившемся режимах. Переходный режим соответствует интервалу реакции системы на изменение напора воды до достижения равновесия. Установившийся режим наступает, когда напор воды стабилизируется, а деформация достигает постоянного значения.

На рисунке 3.5 показаны измеренные ($Y_{изм}$) и прогнозируемые ($Y_{прогн}$) значения осевой деформации для шпильки S1. В таблице 3.4 приведены результаты

расчета систематической погрешности прогнозов осевой деформации, полученных с помощью эмпирических моделей для каждой крепежной шпильки (S1–S8).

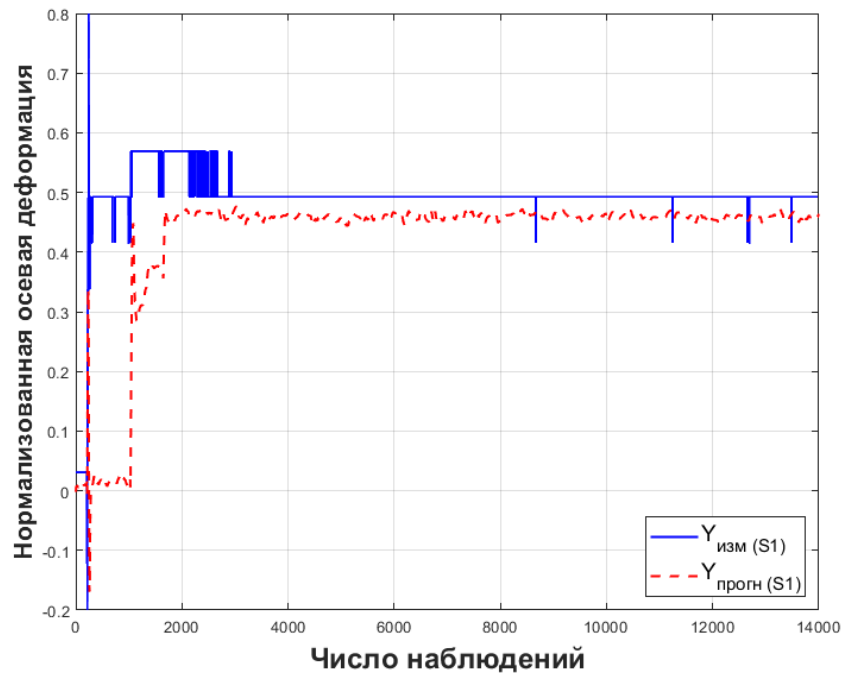


Рисунок 3.5 – Измеренные и прогнозируемые значения осевой деформации крепежной шпильки S1 (составлено автором)

Таблица 3.4 – Систематическая погрешность (*Bias*) прогнозов осевой деформации (составлено автором)

	Эмпирические модели							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
<i>Bias</i> , мкм	-0,46	-0,62	-0,46	-0,16	-0,23	-0,56	-0,43	-0,42

3.2.3 Методика оценки неопределенности эмпирических моделей

При построении эмпирических моделей $G_{i(S)}$ имеют место различные факторы, влияющие на результаты измерений (как обосновано в подразделе 2.2.3). Поскольку эти факторы влияют как на сами измерения, так и на оценки параметров моделей ($Kp_i, Tz_i, Tp1_i, Tp2_i$), возникает необходимость количественной оценки их неопределенности. Методика оценки неопределенности эмпирических моделей аналитическим методом и методом Монте-Карло заключается в следующем:

Оценки неопределенности аналитическим методом

Исходя из математической структуры модели $G_{i(S)}$, принимается начальное допущение о некоррелированности параметров ($Kp_i, Tz_i, Tp1_i, Tp2_i$), между собой. Это допущение позволяет вычислить коэффициенты чувствительности c_i как

частные производные выходной переменной модели (осевой деформации) по каждому из параметров $(\frac{\partial Y}{\partial Kp}, \frac{\partial Y}{\partial Tz}, \frac{\partial Y}{\partial Trp1}, \frac{\partial Y}{\partial Trp2})$.

Стандартная неопределенность u_i каждого параметра определяется на основе его дисперсии, которая извлекается из диагонали ковариационной матрицы, полученной в процессе идентификации параметров адаптивным методом Гаусса – Ньютона. Стандартная неопределенность вычисляется как квадратный корень из дисперсии. $u_i = \sqrt{\sigma_i^2}$, где σ_i – дисперсия i -го параметра.

Суммарная стандартная неопределенность $u_c(y)$ для каждой модели рассчитывается по формуле (2.4). Затем определяется расширенная неопределенность U_{AM} с уровнем доверия 95 %, что соответствует коэффициенту охвата $k = 2$.

Оценки неопределенности методом Монте-Карло

Оценка неопределенности ЕМ с помощью метода Монте-Карло выполняется посредством N стохастических имитаций параметров $Kp_i, Tz_i, Trp1_i, Trp2_i$. Для этого значения параметров, предварительно оцененные адаптивным методом Гаусса – Ньютона, моделируются с использованием нормальных распределений. Данный выбор обоснован тем, что применяемый метод оценки обеспечивает получение ковариационных матриц параметров, расчет которых основан на предположении о нормальности этих оценок.

Математическое ожидание каждого распределения соответствует номинальному значению соответствующего параметра, а стандартное отклонение σ_i вычисляется как квадратный корень из диагональных элементов ковариационной матрицы, полученной в процессе оценки параметров. Пределы вариации для каждого параметра устанавливаются в диапазоне $3\sigma_i$ относительно номинального значения, что охватывает приблизительно 99,7 % распределения.

На основе этих распределений генерируется N случайных наборов параметров, что позволяет построить N эмпирических моделей для каждого датчика S1–S8. К каждой из этих моделей прикладывается входной сигнал (напор воды), в результате чего получается N откликов (прогнозных значений деформации)

для каждого момента времени. Стандартное отклонение полученных откликов рассматривается как стандартная неопределенность модели, обусловленная неопределенностью параметров.

Наконец, для определения расширенной неопределенности каждой модели U_{MC} стандартное отклонение умножается на коэффициент охвата $k = 2$, соответствующий уровню доверия 95 %.

В таблице 3.5 представлены результаты оценки неопределенности эмпирических моделей S1–S8 аналитическим методом и методом Монте-Карло.

Таблица 3.5 – Неопределенности эмпирических моделей (составлено автором)

Неопределенность	Эмпирические модели							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
U_{AM} , мкм	0,10	0,12	0,12	0,10	0,11	0,10	0,12	0,11
U_{MC} , мкм	0,13	0,17	0,17	0,14	0,17	0,14	0,17	0,14

3.2.4 Применения фильтра Калмана к эмпирическим моделям

На основе теории применения фильтра Калмана для улучшения оценки состояния деформации крепежных шпилек, изложенной в подразделе 2.2.4, необходимо представить эмпирическую модель $G_{i(s)}$ в форме пространства состояний.

Данное представление получается путем преобразования передаточной функции $G_{i(s)}$ в управляемую каноническую форму второго порядка, как описано в [34]. В непрерывном времени такое представление имеет вид (3.3):

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u; \text{ где } A_i = \begin{bmatrix} -\frac{Tp1_i + Tp2_i}{Tp1_i \times Tp2_i} & 1 \\ -\frac{1}{Tp1_i \times Tp2_i} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} \frac{Kp_i \times Tz_i}{Tp1_i \times Tp2_i} \\ \frac{Kp_i}{Tp1_i \times Tp2_i} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$y_i = C_i x_i + D_i u; \text{ где } C_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_i = 0$$

где x_i – вектор состояния;

$\dot{x}_i$ – производная вектора состояния;

u – входная переменная;

y_i – выходная переменная;

A_i – матрица динамики;

B_i – матрица входа;

C_i – матрица выхода;

D_i – матрица прямой передачи;

i – номер датчика.

Поскольку измерения поступают с частотой 1 Гц, непрерывная модель преобразуется в дискретную методом нулевого порядка (zero-order hold) с шагом дискретизации $\Delta t = 1$ с. В результате получены дискретные матрицы F_i , G_i и H_i , которые используются в рекуррентном алгоритме фильтра Калмана. Дискретная модель имеет вид (3.4):

$$\begin{aligned} x_{i,k} &= F_i x_{i,k-1} + G_i u_{i,k-1} + w_{k-1} \\ z_{i,k} &= H_i x_{i,k} + v_k \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $x_{i,k}$ – вектор состояния системы в момент времени k ;

$x_{i,k-1}$ – вектор состояния системы в предыдущий момент времени $k-1$;

$u_{i,k-1}$ – вектор управляющего воздействия;

$z_{i,k}$ – вектор измерения величины, которая модель пытается оценить косвенно через состояние системы;

матрицы F_i , G_i и H_i описывают динамику системы и связь между состоянием и измерением. Члены w_{k-1} и v_k соответствуют шуму процесса и шуму измерения соответственно, оба моделируются как случайные гауссовские величины с нулевым средним и ковариациями Q , R .

Настройка ковариационных матриц

Ковариация шума измерения R определяется как максимальная дисперсия измерений осевой деформации, полученных от восьми датчиков S1–S8 при работе ГА в установившемся процессе (в режиме генерации). Выбор максимальной дисперсии обеспечивает консервативную оценку шума, что повышает робастность моделей.

Ковариация шума процесса Q рассчитывается на основе расширенной неопределенности U эмпирических моделей. Поскольку расширенная неопределенность получена с коэффициентом охвата $k = 2$ (уровень доверия 95 %), дисперсия вычисляется по формуле (3.5):

$$\sigma^2 = \left(\frac{U}{k} \right)^2 \quad (3.5)$$

где $U = U_{\text{AM}}$ для аналитического метода или $U_{\text{МС}}$ для метода Монте-Карло.

На основе дискретной модели и ковариационных матриц Q и R фильтр Калмана работает в два этапа: предсказание (прогноз) и коррекция (обновление). Реализация этих этапов выполняется в соответствии с рекуррентным алгоритмом, описанным в подразделе 2.2.4. Фильтр Калмана применяется независимо к каждому из восьми датчиков S1–S8.

Таким образом, применение линейного фильтра Калмана к эмпирическим моделям позволяет сформировать опорные модели S1–S8, необходимые для реализации принципа аналитической избыточности.

В качестве примера на рисунке 3.6 для крепежной шпильки S1 сопоставлены измеренные ($Y_{\text{изм}}$) и оцененные значения ($Y_{\text{оцен}}$).

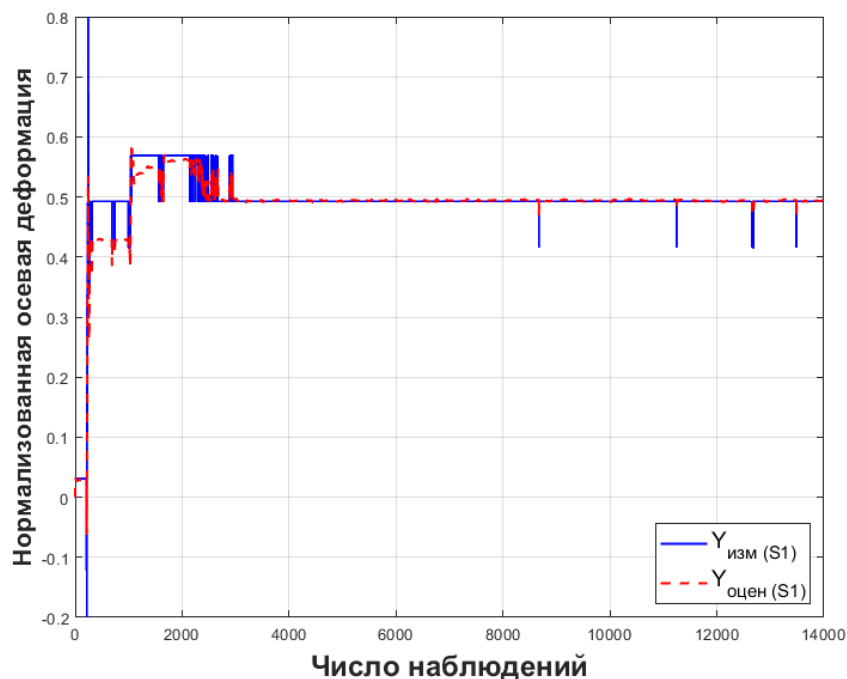


Рисунок 3.6 – Измеренные и оцененные значения осевой деформации крепежной шпильки S1 (составлено автором)

В таблице 3.6 приведены результаты расчета систематической погрешности оценивания осевой деформации, полученных с помощью опорными моделями для каждой крепежной шпильки.

Таблица 3.6 – Систематическая погрешность оценивания осевой деформации (составлено автором)

	Опорные модели							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
<i>Bias</i> , мкм	-0,02	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,03

3.3 Методика и результаты валидации опорных моделей

Валидация опорных моделей выполняется для оценки их точности и робастности при оценивание осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины. Валидация осуществляется при воздействии различных факторов, имитирующих эксплуатацию ГА в реальных условиях, и включает два основных этапа:

- имитация факторов, влияющих на результаты измерений;
- количественная оценка точности и робастности опорных моделей.

3.3.1 Имитация факторов, влияющих на результаты измерений

Для проверки точности и робастности опорных моделей в вычислительный эксперимент вводятся возмущения, имитирующие наиболее характерные помехи и искажения, возникающие при реальных измерениях осевой деформации. На основе анализа, выполненного в разделе 2.2.4, определены следующие типы возмущений.

1. Выбросы (импульсная помеха)

Данное возмущение определяется как кратковременные значения, значительно отклоняющиеся от ожидаемого значения, которые могут возникать из-за ошибок датчиков, нарушений передачи данных или редких физических явлений [26]. Выбросы моделируются на основе правила трех сигм (3.6).

$$x_{\text{выброс}} > x_{\text{изм}} + 3\sigma \quad (3.6)$$

где $x_{\text{изм}}$ – исходное значение;

σ – максимальное стандартное отклонение, рассчитанное по результатам измерений деформации восьми шпилек в установившемся процессе работы ГА.

Испытание на робастность к выбросам проводится путем добавления десяти случайным образом выбранных значений, превышающих 3σ , к данным осевой деформации шпилек в наборе D3.

2. Измерительный шум

Данный тип возмущения имитирует случайные вибрации ГА, электромагнитные помехи и шум аналого-цифрового преобразования. Этот шум присутствует в любом процессе сбора данных в реальных условиях и представляет собой непрерывный стохастический процесс. Имитация измерительного шума

выполняется путем добавления к исходным измерениям осевой деформации (набор D3) гауссовского шума, как показано в формуле (3.7).

$$x_{\text{шум}} = x_{\text{изм}} + \varepsilon_k, \quad \varepsilon_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{шум}}^2) \quad (3.7)$$

где $x_{\text{изм}}$ – исходное измерение;

ε_k – реализация гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_{\text{шум}}^2$. Уровень шума задается с амплитудой, не выходящей за пределы интервала $\pm 2 \sigma_{\text{шум}}$. Испытания проводятся при следующих уровнях шума: 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мкм.

3. Изменение режима нагрузки

Необходимо оценивать точность оценивания осевой деформации при эксплуатации ГА на различных уровнях нагрузки, определяемых потребностями энергосистемы. Необходимость такой оценки обусловлена тем, что параметры эмпирических моделей были определены на основе набора данных D1, собранного при работе ГА на полной нагрузке. Если оценивать прогностическую способность моделей исключительно в этом режиме, это приведет к завышенной и, следовательно, некорректной оценке их адекватности. Это связано с тем, что ГА в реальных условиях работает не только при полной, но и при частичной нагрузке (например, 70 % от номинальной). Для оценки точности моделей S1–S8 в условиях частичной нагрузки используется набор данных D4, отражающий работу ГА при 70% от номинальной нагрузки.

3.3.2 Метрики оценки качества опорных моделей

Для количественной оценки качества опорных моделей используются следующие метрики:

Точность

Метрика точности оценивает качество прогнозов моделей путем сопоставления прогнозируемых значений с измеряемыми. В данном исследовании точность определяется через вычисление средней абсолютной ошибки (MAE) [66]. MAE показывает, насколько в среднем прогнозы отклоняются от измеряемых значений, и выражается в тех же единицах измерения (мкм). Формула для расчета MAE имеет вид (3.8):

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |x_j - \hat{x}_j| \quad (3.8)$$

где N – количество измерений;

x_j – измеряемое значение для j -го измерения;

$\hat{x}_j$ – соответствующее прогнозируемое значение.

Чувствительность

Помимо точности, необходима оценка робастности моделей. В соответствии со стандартами ISO 15289 [60] и ISO 16336 [58], под робастностью системы понимается ее способность сохранять корректную и надежную работу при наличии недопустимых входных данных, неблагоприятных условий окружающей среды или внешних возмущений. В данном контексте чувствительность является ключевой метрикой, количественно характеризующей один из аспектов робастности — степень влияния изменений входных данных на выход модели.

В данной работе для оценки робастности моделей используется метрика чувствительности (S_A), описанная в [43]. Эта метрика оценивает способность модели сохранять точность прогнозов при отклонениях (dev) входных значений, вызванных, например, измерительным шумом или выбросами. Метрика S_A определяется формулой (3.9).

$$S_A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{\hat{x}_j^{dev} - \hat{x}_j}{x_j^{dev} - x_j} \right| \quad (3.9)$$

где N – количество измерений;

x_j – j -е измеряемое значение без отклонения;

$\hat{x}_j$ – соответствующий прогноз модели для этого значения;

x_j^{dev} – j -е измеряемое значение с отклонением (возмущением);

$\hat{x}_j^{dev}$ – соответствующий прогноз модели для этого значения с отклонением.

Значение S_A варьируется в диапазоне от 0 до 1. Значение, близкое к нулю, свидетельствует о низкой чувствительности модели к отклонениям, что является предпочтительным.

Коэффициент корреляции Пирсона

Коэффициент корреляции Пирсона (r) характеризует силу и направление линейной связи между прогнозируемыми $\hat{x}_j$ и измеренными x_j значениями. Его расчет приведен по формуле (3.10).

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x}) (\hat{x}_j - \bar{\hat{x}})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^N (\hat{x}_j - \bar{\hat{x}})^2}} \quad (3.10)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое измеренных значений;

$\bar{\hat{x}}$ – среднее арифметическое прогнозируемых значений.

Значения r , близкие к 1, указывают на высокую линейную согласованность прогноза с измерениями. В настоящем исследовании r используется как дополнительная метрика: модель считается приемлемой, если $r \geq 0,9$. Низкие значения $r < 0,8$ свидетельствуют о необходимости пересмотра структуры или параметров модели даже при удовлетворительных значениях MAE.

3.3.3 Результаты валидации опорных моделей

Графики, полученные в результате вычислительных экспериментов с опорными моделями при воздействии факторов, имитирующих реальные условия эксплуатации ГА, представлены на рисунках 3.7–3.9.

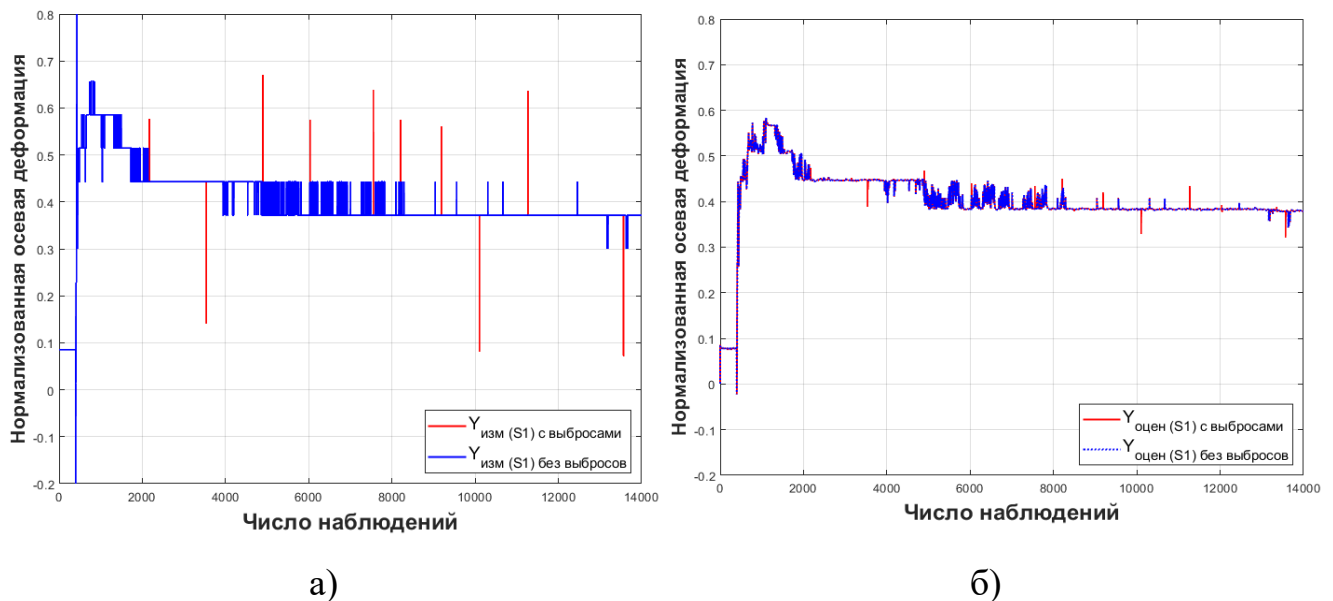
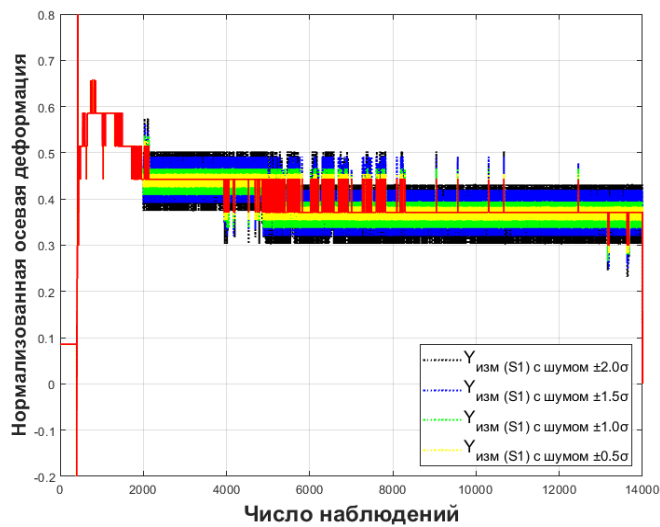
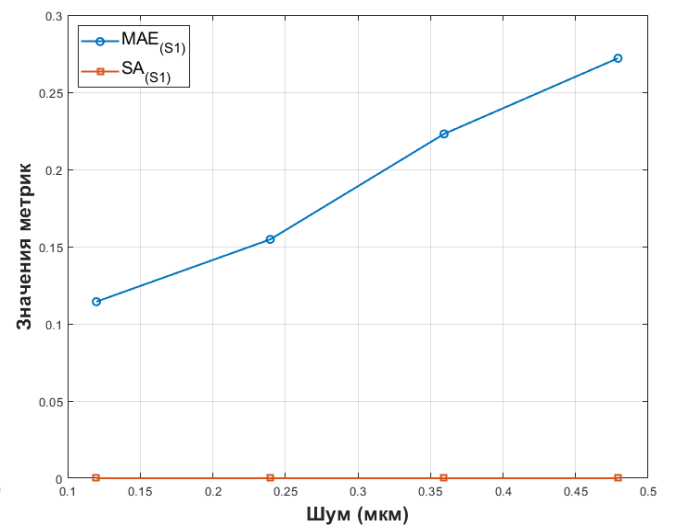


Рисунок 3.7 – Испытание опорной модели S2 при наличии выбросов: а) данные осевой деформации с выбросами и без них ($Y_{\text{изм}}$); б) оцененные значения осевой деформации ($Y_{\text{оцен}}$) (составлено автором)



а)



б)

Рисунок 3.8 – Испытание опорной модели S2 при наличии измерительного шума:

а) данные осевой деформации с разным уровнем шума; б) метрики точности (MAE) и робастности (S_A) в условиях шума (составлено автором)

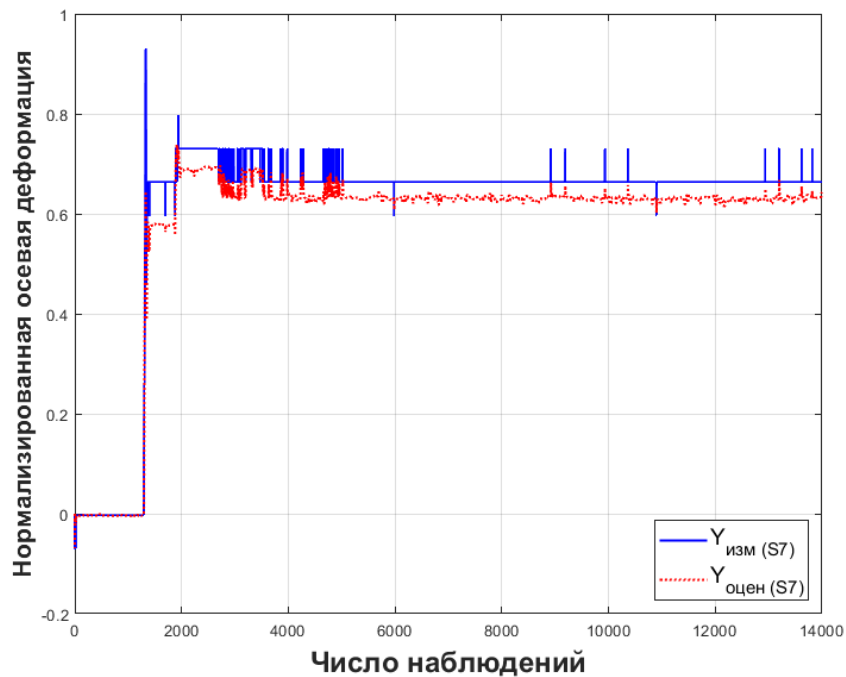


Рисунок 3.9 – Испытание опорной модели S7 при изменении режима работы ГА на частичной нагрузке (составлено автором)

В таблице 3.7 приведены результаты расчета метрик точности и робастности для каждой опорной модели S1–S8 под влиянием факторов, имитирующих реальные условия эксплуатации ГА.

Таблица 3.7 – Метрики точности (MAE) и робастности (S_A) опорных моделей при воздействии имитируемых факторов (составлено автором)

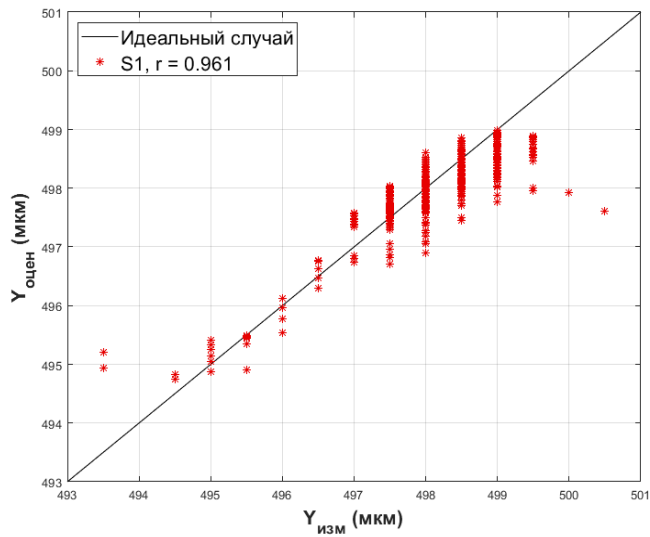
	Опорные модели							
Метрика	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
при наличии выбросов								
MAE, мкм	0,11	0,15	0,11	0,16	0,07	0,14	0,13	0,18
S_A	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
при наличии шума (уровень шума: ш1 = 0,5σ; ш2 = 1,0σ; ш3 = 1,5σ; ш4 = 2,0σ)								
MAE ш1, мкм	0,11	0,14	0,11	0,10	0,10	0,14	0,13	0,18
MAE ш2, мкм	0,15	0,18	0,15	0,14	0,14	0,17	0,17	0,20
MAE ш3, мкм	0,22	0,24	0,22	0,22	0,22	0,24	0,23	0,26
MAE ш4, мкм	0,27	0,28	0,27	0,27	0,26	0,28	0,28	0,30
S_A^*	$2,57 \times 10^{-5}$	$2,57 \times 10^{-5}$	$2,42 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-5}$
при эксплуатации ГА на полной нагрузке								
MAE, мкм	0,11	0,15	0,11	0,15	0,07	0,14	0,13	0,18
при эксплуатации ГА на частичной нагрузке (70% от номинальной)								
MAE, мкм	0,21	0,33	0,31	0,25	0,24	0,40	0,27	0,24

* Среднее значение для ш1, ш2, ш3, ш4.

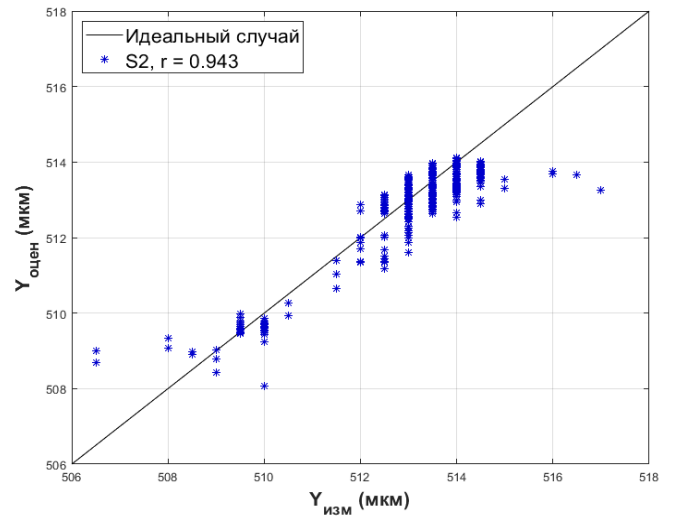
Кроме того, для оценки степени соответствия между измеренными и оценёнными значениями, полученными на основе опорных моделей, для каждой из шпилек (S1–S8) был вычислен коэффициент корреляции Пирсона. Результаты расчётов приведены в таблице 3.8, а корреляционные графики представлены на рисунках 3.10 и 3.11.

Таблица 3.8 – Коэффициент корреляции Пирсона (r) опорных моделей при эксплуатации ГА на полной нагрузке (составлено автором)

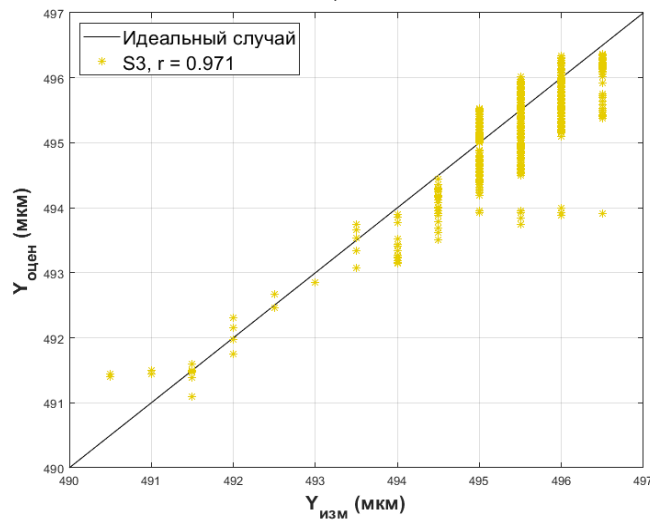
	Опорные модели							
Метрика	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
r	0,96	0,94	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,98



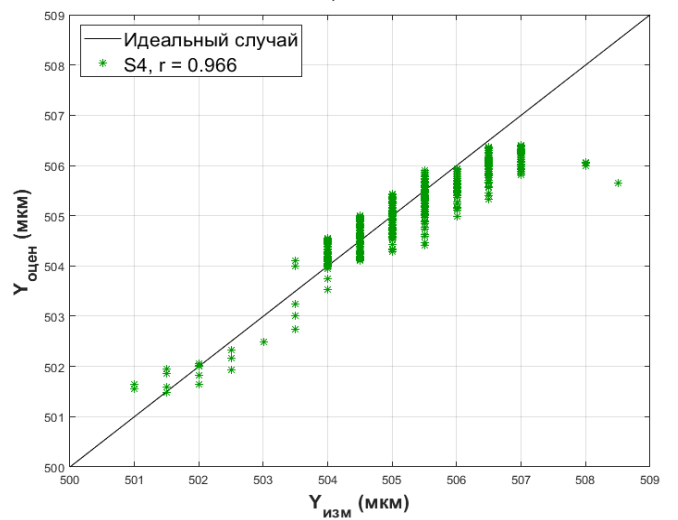
а)



б)

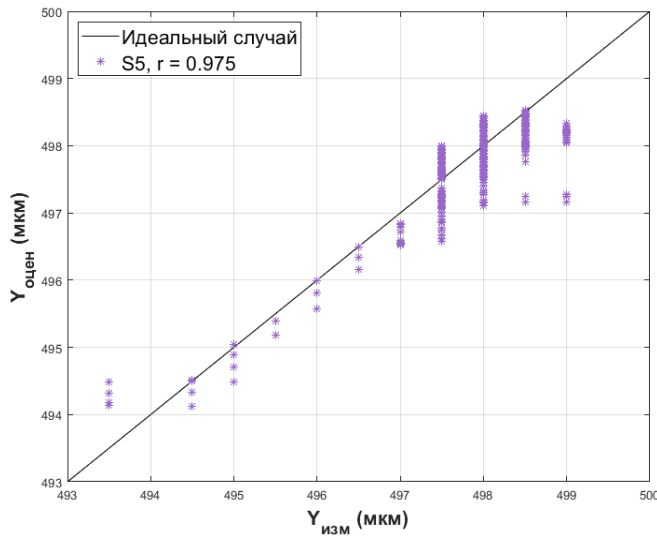


в)

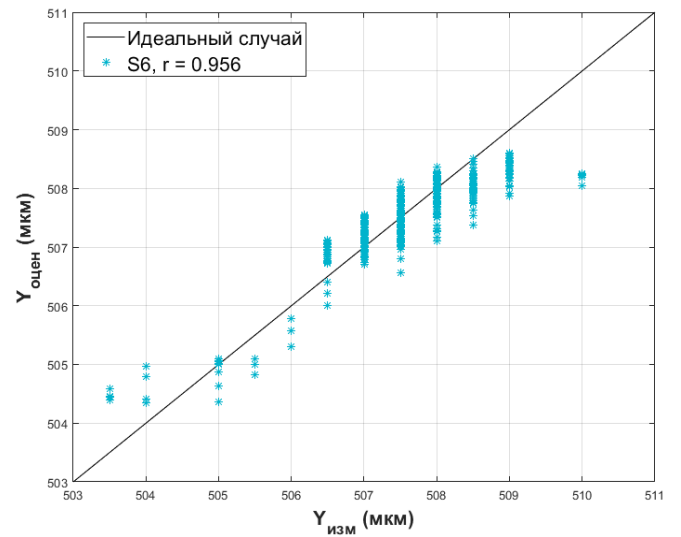


г)

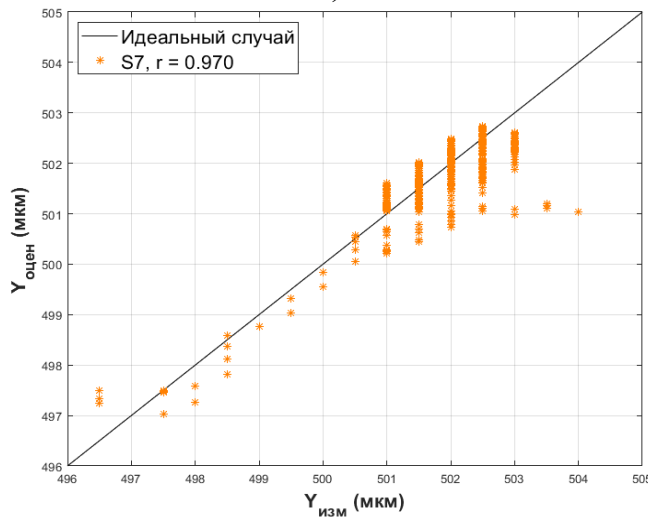
Рисунок 3.10 – Корреляция между измеренными ($Y_{изм}$) и оцененными ($Y_{оцен}$) значениями: а)–г) осевая деформация шпилек S1–S4 (составлено автором)



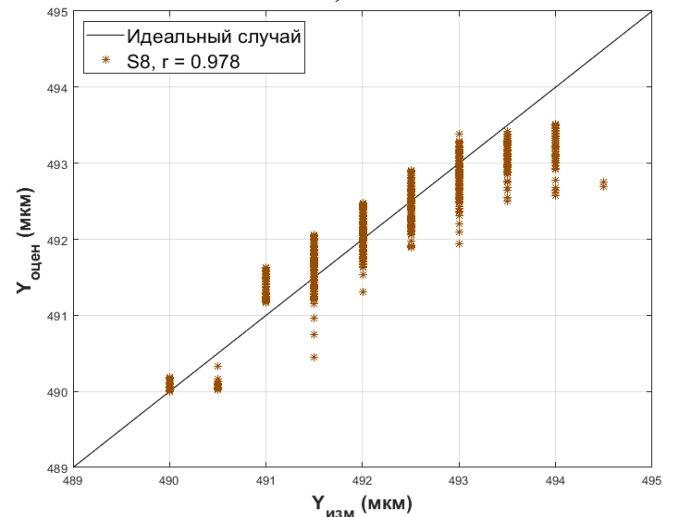
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 – Корреляция между измеренными ($Y_{изм}$) и оцененными ($Y_{оцен}$) значениями: а)–г) осевая деформация шпилек S5–S8 (составлено автором)

3.4 Исследование отклика опорных моделей на неисправности датчиков

Как отмечено в подразделе 2.1.2, принцип аналитической избыточности позволяет формировать дополнительную информацию (невязки) для обнаружения неисправностей в датчиках. В настоящем подразделе определяются методика моделирования неисправностей и методика анализа отклика опорных моделей при имитации неисправностей.

3.4.1 Моделирование типов неисправностей

На основе анализа функциональных неисправностей датчиков, приведенного в разделе 1.3, в вычислительный эксперимент вводятся имитации наиболее

характерных неисправностей датчиков осевой деформации. Моделирование выполняется на основе следующих математических моделей [67].

1. Смещение (bias)

Неисправность по смещению моделируется путем добавления постоянного смещения к измеренному значению, как выражается в (3.11).

$$x_{bias} = (1 + bias\%) * x_{meas} \quad (3.11)$$

где x_{bias} – показание датчика со смещением;

x_{meas} – исходное измеренное значение;

$bias\%$ – процент добавленного смещения от абсолютной погрешности системы.

Испытание проводятся на 10, 25 и 50 % от абсолютной допустимой погрешности система контроля деформации шпилек.

2. Дрейф (drift)

Для имитации дрейфа используется линейная модель (формула 3.12), постепенно изменяющая значение измерения во времени:

$$x_{drift} = \left(1 + \frac{z - z_{init}}{z_{end} - z_{init}} drift\% \right) * x_{meas} \quad (3.12)$$

где x_{drift} – показание датчика с дрейфом;

z – текущий номер измерения;

z_{init} – номер измерения в момент начала неисправности;

z_{end} – номер измерения в конечный момент моделирования;

$drift\%$ – процент добавленного дрейфа от абсолютной погрешности системы.

Испытание проводятся на 10, 25 и 50 % от абсолютной допустимой погрешности система контроля деформации шпилек.

3. Деградация прецизионности (degradation of precision)

Деградация прецизионности моделироваться добавлением гауссовского шума с возрастающей амплитудой к результатам измерений (формула 3.13).

$$x_{prec} = x_{meas} \pm var \quad (3.13)$$

где x_{prec} – показание датчика с деградацией прецизионности;

var – гауссов шум с нулевым средним и дисперсией, равной заданному уровню деградации.

Для имитации прогрессирующей деградации применяется три уровня шума, соответствующие цене деления датчика: 0,5 мкм, 1,0 мкм и 1,5 мкм.

4. Залипание (stuck-at)

Неисправность залипание моделируется фиксацией показаний датчика на значении, достигнутом в момент возникновения неисправности. Это значение остается постоянным до конца измерений независимо от изменений реальной осевой деформации. Данная неисправность моделируется формулой (3.14).

$$x_{stuck} = x_{meas}(z_{init}) \quad (3.14)$$

где x_{stuck} – показание датчика с залипшим значением;

z_{init} – номер измерения в момент начала неисправности.

3.4.2 Процедура проведения испытаний с имитацией неисправностей

Для оценки отклика опорных моделей на имитируемые неисправности выполняется следующая последовательность действий.

1. Формирование исходных данных и внесение неисправности

На основе данных измерений осевой деформации крепежных шпилек из набора D3 в сигнал каждого датчика S1–S8 вносится имитация одного из типов неисправностей (смещение, дрейф, деградация прецизионности, залипание). Момент возникновения неисправности выбирается случайным образом, но таким образом, чтобы ГА уже находился в установившемся режиме работы.

2. Прогнозирование опорными моделями

На вход каждой опорной модели (для каждого датчика S1–S8) подается сигнал с внесенной неисправностью. Модель выполняет оценивание осевой деформации шпилек, и полученные оцененные значения сравниваются с измеренными значениями (без неисправности).

3. Формирование вектора невязок

В соответствии с теоретическими положениями раздела 2.3, вектор невязок для каждого датчика S1–S8 формируется как разность между измеренным значением и оценкой (формула 3.15), полученной от соответствующей опорной модели:

$$r_{i,k} = y_{i,k} - \hat{y}_{i,k} \quad (3.15)$$

где $y_{i,k}$ – показание i -го датчика в момент времени k ;

$\hat{y}_{i,k}$ – оценка опорной модели для этого датчика.

Полученные невязки для различных типов неисправностей и каждой датчиком S1–S8 сохраняются для последующего анализа в форме векторов невязок ($r_{i,k}$). Эти данные формируют базу для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков на этапе анализа и диагностики.

3.4.3 Результаты отклика опорных моделей на неисправности датчиков

Для лучшего понимания на рисунках показания неисправного датчика (неисправные) сопоставляются с показаниями датчика, работающего корректно (опорные).

На рисунках невязка между неисправными и опорными значениями отображена в виде базовой линии, которая моделирует ситуацию, когда разница между измеренными и оцененными значениями осевой деформации крепежных шпилек отсутствует.

Результаты испытаний отклика опорных моделей на неисправности датчиков типа смещение, дрейф, деградация прецизионности и залипание представлены на рисунках 3.12–3.15.

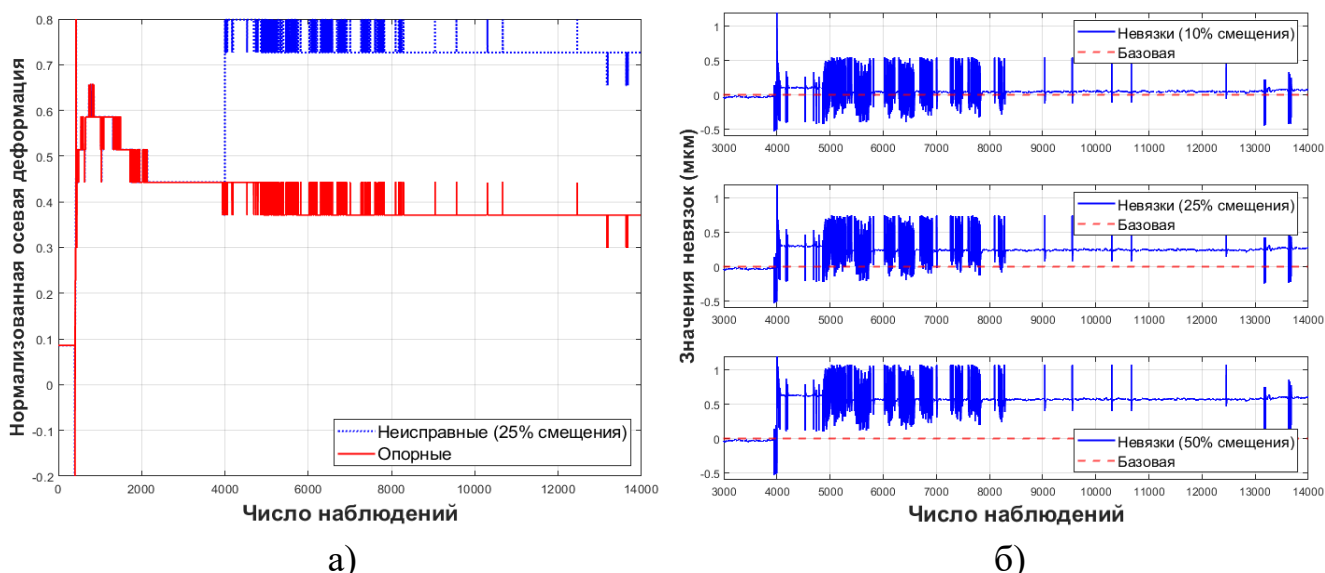
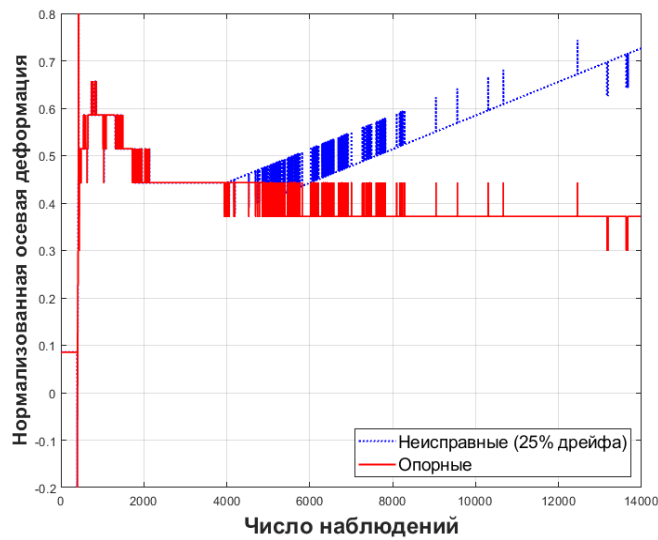
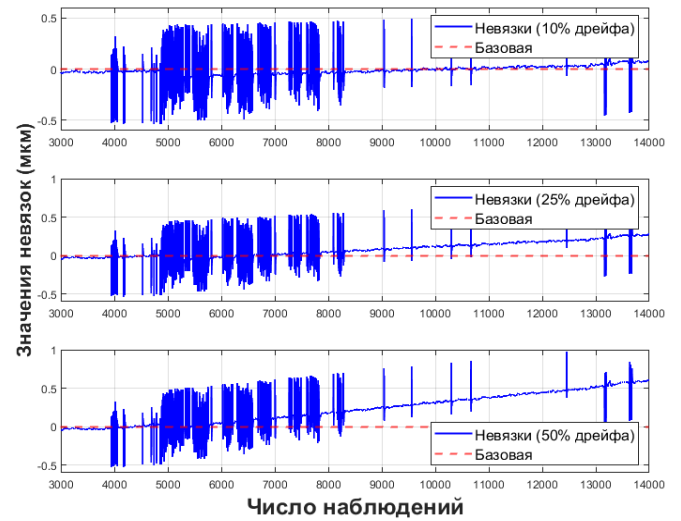


Рисунок 3.12 – Отклик опорной модели S1 на неисправность типа смещения:

а) неисправные и опорные значения; б) поведение невязки (составлено автором)



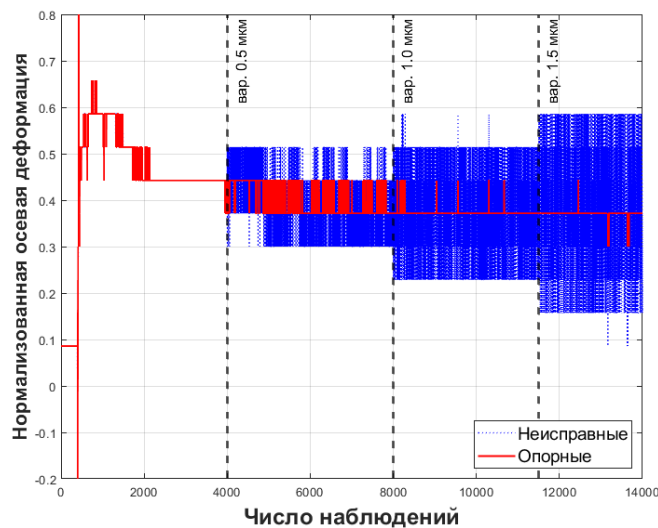
а)



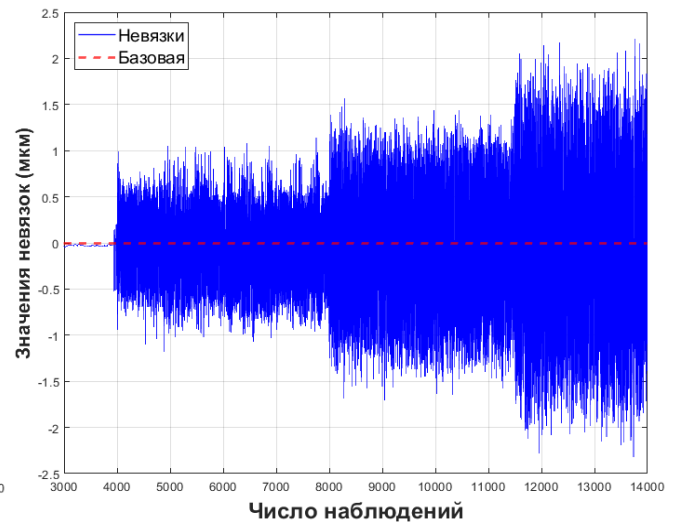
б)

Рисунок 3.13 – Отклик опорной модели S1 на неисправность типа дрейфа:

а) неисправные и опорные значения; б) поведение невязки (составлено автором)



а)



б)

Рисунок 3.14 – Отклик опорной модели S1 на неисправность типа деградации прецизионности: а) неисправные и опорные значения; б) поведение невязки (составлено автором)

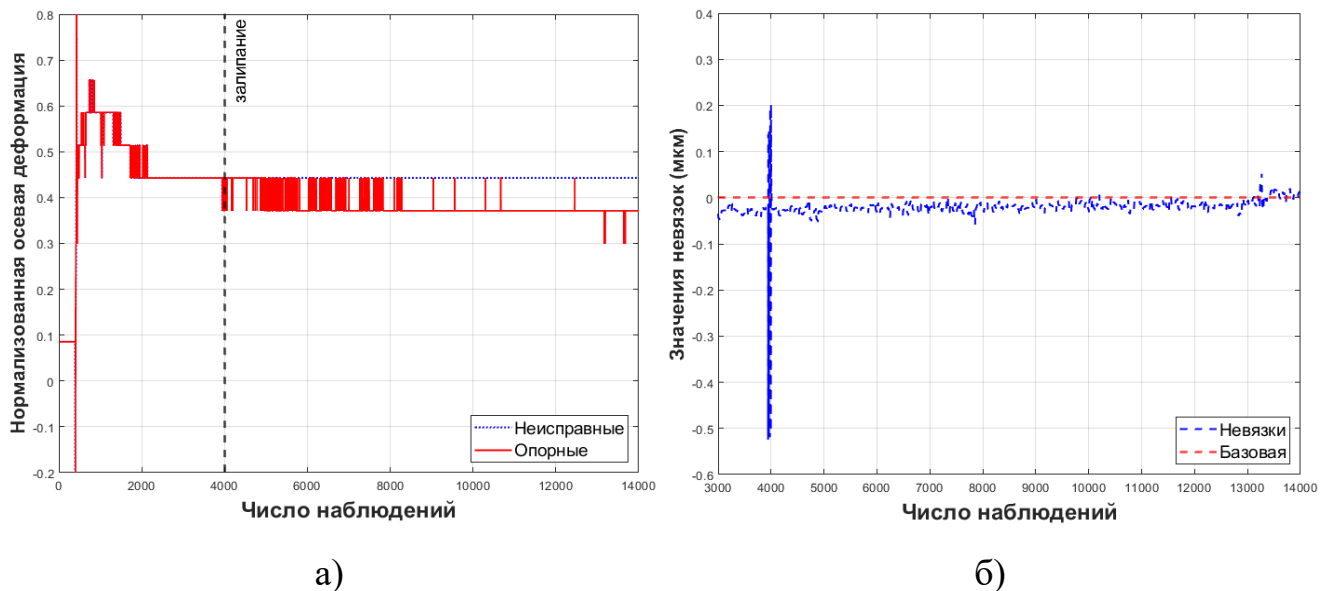


Рисунок 3.15 – Отклик опорной модели S1 на неисправность типа залипания:
а) неисправные и опорные значения; б) поведение невязки (составлено автором)

3.5 Методика обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации

Как было описано в подразделе 2.1.2, на основе формирования принципа аналитической избыточности создается метод обнаружения и диагностики неисправностей датчиков. Основываясь на теории обнаружения и диагностирования неисправностей, изложенной в разделе 2.4, были определены четыре этапа – обнаружение, локализация, классификация и диагностика, – которые составляют основу предлагаемой методологии. Применение этих этапов на векторы невязок ($r_{i,k}$) позволяет не только обнаруживать неисправности а также диагностировать техническое состояние датчиков, измеряющих осевую деформацию крепежных шпилек крышки гидротурбины. Методика для применения указанных этапов показывается ниже.

3.5.1 Пороговые правила обнаружения неисправностей

Определение порогов обнаружения основывается на критериях и методах выявления, установленных для каждого типа неисправности в разделе 2.4.1, а также на результатах (векторах невязок), полученных в ходе испытаний на отклик опорных моделей S1–S8 при моделировании неисправностей.

Порог для неисправности типа «смещение»

В разделе 2.4.1 установлено, что неисправность типа смещение обнаруживается при выполнении условия $\Delta r_{(t)} \geq b$. Поскольку $\Delta r_{(t)}$ соответствует последовательным разностям между значениями невязок при возникновении смещения b , его значение должно быть меньше абсолютной погрешности измерительной системы (10 мкм). Кроме того, для определения порога $\Delta r_{(t)}$ следует учитывать значения невязок $\Delta r_{i,k}$, полученные в ходе испытаний отклика моделей со смещением на 10, 25 и 50 % от значения абсолютной погрешности измерения.

Порог для неисправности типа «дрейф»

Неисправность типа дрейф обнаруживается, если $\Delta r_i \geq d$ трижды подряд (с помощью скользящих окон), как описано в подразделе 2.4.1. Значение порога Δr_i определяется на основе анализа максимальной желаемой скорости изменения d за время t . Для испытаний на обнаружение это время принимается равным 1 часу, что соответствует размеру окна, необходимого для применения метода скользящих окон.

Порог для неисправности типа «деградация прецизионности»

Согласно критерию обнаружения неисправности типа деградация прецизионности, описанному в подразделе 2.4.1, неисправность фиксируется при выполнении условия $w_{i(t)} \geq w_{max(t)}$ трижды подряд. Порог $w_{max(t)}$ определяется путем вычисления среднеквадратического отклонения (далее – СКО) измерений максимальной осевой деформации по всем датчикам (S1–S8) при работе ГА в установившемся процессе (при частичной или полной нагрузке).

Порог для неисправности типа «залипание»

Как описано в подразделе 2.4.1, если дисперсия измерений значительно снижается и выполняется условие $w_{i(t)} < w_{min(t)}$ трижды подряд, то обнаруживается неисправность типа «заклинивание». Значение порога $w_{min(t)}$ определяется как минимальное СКО среди всех датчиков (S1–S8) при работе ГА в установившемся процессе (при частичной или полной нагрузке).

Замечания по обнаружению неисправностей

Определение размера окон

Размер скользящих окон устанавливается равным 3600 отсчетам (измерениям), что соответствует одному часу анализа вектора невязок. Из-за того, что обнаружения неисправностей датчиков проводятся в конце каждой дня, анализируется 24 окон в каждой вектор невязок.

Формирование матрицы данных

Поскольку описанные критерии и методы применяются к каждому из контролируемых датчиков, результаты обнаружения, то есть, значения Δr_t (для смещения) и Δr_i (для дрейфа, деградации прецизионности и залепания) сохраняются в матрице $M_{u \times v}$. Где u – количество контролируемых датчиков (8 строк, соответствуют датчикам S1–S8); v – количество анализируемых скользящих окон плюс индекс (время) обнаружения (всего 4 столбца). Четвертый столбец отводится под индекс обнаружения.

Особенности для неисправности типа смещение

При обнаружении смещения в первый элемент строки $u_{i,1}$ записывается значение Δr_t , второй $u_{i,2}$ и третий $u_{i,3}$ заполняются нулями, а в четвертый $u_{i,4}$ заносится момент (индекс), в котором неисправность была зафиксирована. Благодаря этому каждая строка матрицы $M_{u \times v}$ содержит ровно четыре элемента.

Случай отсутствия неисправности

Если после применения всех описанных критериев ни одна неисправность не была обнаружена в датчиках, то в Δr_t сохраняется значение СКО анализируемого вектора невязок $\Delta r_{i,k}$, а в качестве индекса обнаружения используется последний индекс вектора невязок (измерение номер 86400).

Поведение невязок в длительных периодах эксплуатации ГА

Хотя критерии обнаружения основаны на отклике опорных моделей S1–S8 (то есть на характерных паттерных невязок), не менее необходимо проанализировать поведение невязок в течение длительных и непрерывных периодов работы ГА.

3.5.2 Локализация неисправного датчика

Для исключения ложноположительных срабатываний при обнаружении неисправностей датчиков необходимо соотносить выявляемые отклонения с информацией о процессе генерации электрической энергии, как показано в анализе, представленном в разделе 2.4.2.

Локализация неисправного датчика и определение того, вызвано ли зафиксированное отклонение изменением режима генерации электроэнергии, включает следующие этапы:

1. Анализ напора воды

Вычисляется скорость изменения (наклон) напора воды с помощью трижды подряд неперекрывающихся скользящих окон. Для каждого окна берутся первое и последнее значения, и вычисляется их разность. Результаты сохраняются в векторе HP_i , содержащем три элемента. Если напора воды не увеличивается, значения HP_i будут близки к нулю. При увеличении напоре воды эти значения покажут положительную, возрастающую тенденцию.

2. Обнаружение изменений режима работы ГА

На основе данных об измеренной электрической мощности определяются моменты (временные индексы), в которые ГА переключается из режима 2 (холостое вращение) в режим 3 (генерация) или наоборот. Эти индексы сохраняются в векторе PW_i .

3. Связь между векторам невязки и векторами HP и PW

Для каждого из контролируемых датчиков итеративно анализируется соответствующая строка матрицы $M_{u \times v}$ и сравнивается с элементами векторов HP_i и PW_i следующим образом:

а) для анализируемой строки (обозначенной u_i), если ее второй элемент равен нулю, то извлекается ее четвертый элемент и сравнивается с элементами вектора PW_i . Если четвертый элемент совпадает с любым из элементов PW_i , то обнаружение смещения признается недействительным: аномалия обусловлена изменением режима работы ГА.

Данное утверждение основывается на том, что переход из режима 2 (холостое вращение) в режим 3 (генерация) вызывает ступенчатое изменение (скачок) в невязках, которое может быть ошибочно интерпретировано как смещение датчиков.

б) второй элемент строки не равен нулю, выполняются следующие проверки:

4. Проверка для дрейфа

Проверяется, что все три элемента анализируемой строки превышают значение d (пороговый наклон), а значения HP_i близки к нулю. Если оба условия выполняются, делается вывод о наличии неисправности в анализируемой строке u_i при отсутствии роста напора воды.

5. Проверка для деградации прецизионности

Проверяется, что все три элемента анализируемой строки превышают $w_{max(t)}$, а СКО напора воды не увеличилось относительно своего нормального значения $w_{HPmax(t)}$. Если условия выполняются, идентифицируется неисправность при отсутствии изменений в измерениях напора воды.

6. Проверка для залипания

Проверяется, что все три элемента анализируемой строки превышают $w_{min(t)}$, а СКО напора воды не уменьшилось относительно своего нормального значения $w_{HPmin(t)}$. Если условия выполняются, идентифицируется неисправность при отсутствии изменения (уменьшения) в измерениях напора воды.

3.5.3 Классификация неисправного датчика

Для классификации типа неисправности датчика выбирается строка u_i , соответствующая диагностируемому датчику. Далее ее значения сопоставляются с критериями этапа обнаружения согласно следующим правилам:

Случай 1: Смещение

Если строка u_i содержит значение Δr_t , полученное на этапе обнаружения, и выполняется неравенство $\Delta r_t \geq b$, то неисправность классифицируется как смещение. В противном случае гипотеза о смещении отклоняется, а значение Δr_t соответствует СКО вектора невязок в условиях отсутствия неисправности анализируемого датчика.

Момент обнаружения соответствует временному индексу (v_4), при котором Δr_t впервые превысило порог b .

Случай 2: дрейф, деградация прецизионности или залипание

Если строка u_i содержит невязки Δr_i , анализируются три компоненты (столбцы v_{1-3}), соответствующие окнам анализа: Δr_1 , Δr_2 и Δr_3 .

- дрейф – классифицируется когда условия Δr_1 , Δr_2 и $\Delta r_3 \geq d$. Порог d установлен в этапе обнаружения.

- деградация прецизионности – классифицируется когда значение элементов Δr_1 , Δr_2 и $\Delta r_3 \geq w_{\max(t)}$. Значение порога $w_{\max(t)}$ рассчитан в этапе обнаружения и показывает увеличение дисперсии сигнала.

- залипание – классифицируется при Δr_1 , Δr_2 и $\Delta r_3 < w_{\min(t)}$. Как и другие пороги, это пороговое значение определяется на этапе обнаружения и указывает, что дисперсия измерений уменьшилась ниже нормального уровня.

Время обнаружения для этих типов неисправностей определяется как индекс последнего элемента анализируемой строки (v_4).

3.5.4 Диагностика неисправного датчика

Для диагностики исправного состояния датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек требуется определить пределы на основе максимальной погрешности измерения системы контроля ($e_{\max}$) и максимального ($w_{\max(t)}$) и минимального ($w_{\min(t)}$) разброса между ее измерениями в условиях нормальной работы ГА, как установлено в подразделе 2.4.4.

Критерии диагностики датчиков

1. Смещение – если значение неисправности типа смещение Δr_t превышает максимальную абсолютную допустимую погрешность $e_{\max}$, датчик признается неисправным.

2. Дрейф – если значения Δr_1 , Δr_2 и Δr_3 , характеризующие дрейф, превышают максимально допустимый наклон $d_{\max}$, причем эта тенденция с течением времени приведет к превышению $e_{\max}$, датчик признается неисправным. Параметр $d_{\max}$

представляет собой предельно допустимую скорость изменения (наклон) сигнала на заданном временном интервале.

3. Деградация прецизионности – при выполнении условия Δr_1 , Δr_2 и $\Delta r_3 \geq 3 \cdot w_{\max(t)}$ датчик признается неисправным. Коэффициент 3 соответствует критерию «трех сигм» применительно к статистике скользящего окна и свидетельствует о том, что наблюдаемый разброс превышает ожидаемый при номинальной работе ГА.

4. Залипание – если Δr_1 , Δr_2 и $\Delta r_3 < w_{\min(t)}$ и в течение анализируемого периода зафиксировано изменение режима работы ГА (переключение между режимами 2 и 3), датчик признается неисправным. Данный критерий позволяет избежать ошибочной классификации как отказа тех интервалов, где сигнал закономерно имеет низкую дисперсию вследствие неизменного режима эксплуатации ГА. Дополнительная проверка факта изменения режима необходима для подтверждения того, что датчик утратил способность реагировать на динамику процесса.

3.6 Разработка алгоритма автоматического обнаружения и диагностики неисправности датчиков осевой деформации

Алгоритм предназначен для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков систем контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины [14]. Функционирование алгоритма осуществляется в конце каждого дня и включает четыре основных этапа: обнаружение неисправностей, локализацию неисправного датчика, классификацию типа неисправности и вынесение диагностического заключения.

Принцип работы алгоритма

Алгоритм вычисляет невязку ($r_{i,k}$) между измерением ($Y_{\text{изм}}$) и оцененными ($Y_{\text{оцен}}$) значением сигнала. При превышении пороговых значения b , d , $w_{\max(t)}$, $w_{\min(t)}$ фиксируется потенциальная неисправность. Далее алгоритм проверяет, не связано ли зафиксированная неисправность с изменением режима генерации электрической энергии, и идентифицирует датчики, в которых присутствует

неисправность. На основе характера изменения последовательности невязок алгоритм классифицирует тип неисправности: смещение, дрейф, деградация прецизионности либо залипание. Результатом работы алгоритма является диагностическое заключение о состоянии (исправен/ неисправен) каждого контролируемого датчика.

Разработанный алгоритм реализует последовательность из основных семи шагов, начиная с начальной настройки данных, необходимых для его работы:

1. Настройка алгоритма. Определяются количество датчиков, параметры модели (Kp_i , Tz_i , $Tr1_i$, $Tr2_i$), матрицы Q и R , максимально допустимая погрешность e_{max} , а также пороговые значения b , d , $w_{max(t)}$, $w_{min(t)}$.

2. Формирование наборы данных. Регистрируются электрическая мощность (PW), напор воды (HP) и осевые деформации S1–S8 ($Y_{изм}$). Затем вычисляются оценочные значения ($Y_{оцен}$) и формируется вектор невязок $r_{(t)}$ для каждого датчика.

3. Обнаружение. Вектор невязок $r_{(t)}$ сравнивается с заданными порогами. В случае превышения любого из них формируется сигнал тревоги.

4. Локализация. Анализируется взаимосвязь между невязками $r_{(t)}$ и переменными процесса PW и HP для идентификации конкретного датчика, в котором произошел неисправность.

5. Классификация. Определяется тип неисправности датчика: смещение, дрейф, деградация прецизионности или залипание.

6. Диагностика. Проверяется, работает ли датчик в пределах максимально допустимой погрешности e_{max} . При превышении этого предела выдается сигнал тревоги о неисправном состоянии датчика.

7. Отчет контроля. Формируется отчет о состоянии датчиков S1–S8.

На рисунке 3.16 представлен разработанный алгоритм обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

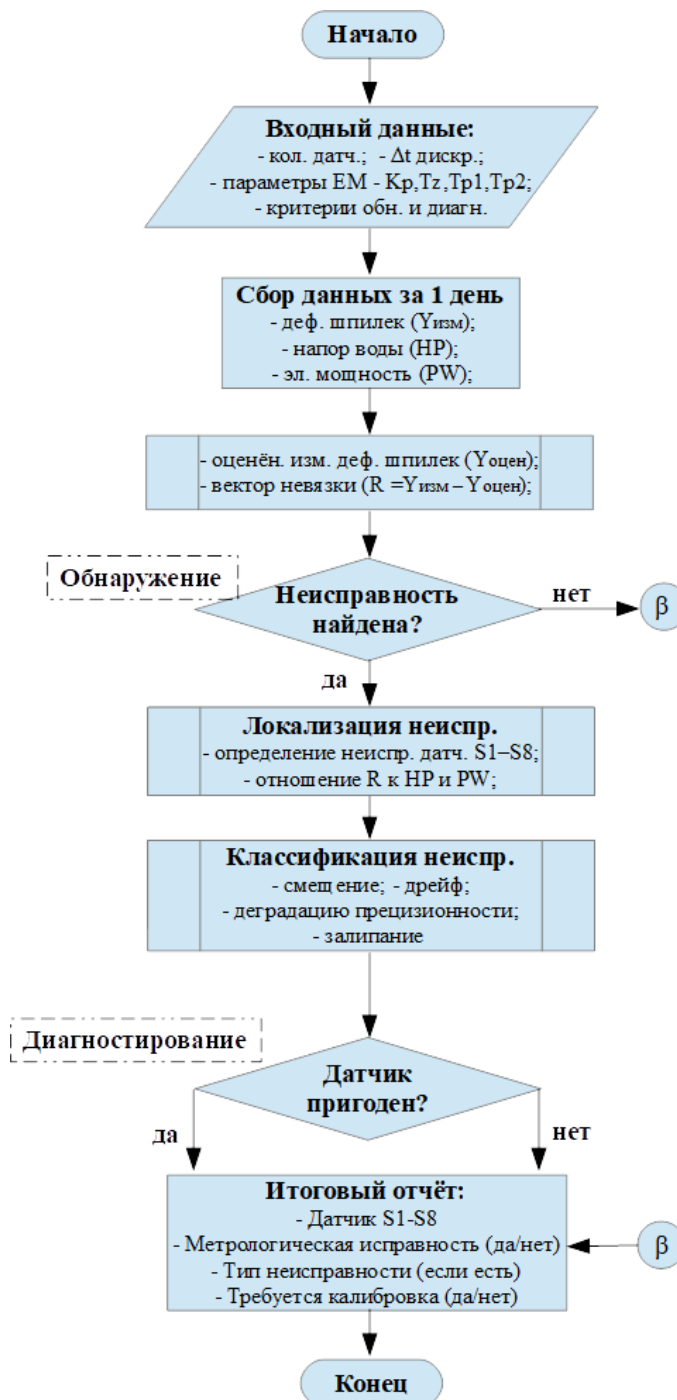


Рисунок 3.16 – Схема разработанного алгоритма обнаружения неисправностей и диагностики метрологической исправности датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины (составлено автором)

3.7 Проверка разработанного алгоритма в условиях, имитирующих функциональные неисправности

Установление порогов обнаружения

Для определения порогов обнаружения в первую очередь анализируются векторы невязок, полученные для каждого в течение длительных периодов работы

ГА. На рисунке 3.17 представлены записи напора воды, вырабатываемой электрической мощности, а также соответствующие каждому датчику невязки, вычисленные на основе измерений осевой деформации с датчиками и значений, оцененных с помощью опорных моделей, ассоциированных с S1–S8.

Теперь необходимо изучить характер поведения невязок в течение полного дня работы ГА. На рисунке 3.18 вновь представлены временные ряды вырабатываемой электрической мощности, напора воды и невязок, но теперь соответствующие одному дню контроля (десятому дню).

Из графика 3.17 наблюдается, что невязки изменяются в диапазоне ± 2 мкм. На графике 3.18 видно, что их поведение остается практически постоянным в течение дня, с некоторыми пиками, обусловленными изменениями режима работы ГА.

С другой стороны, испытания отклика моделей на смоделированные неисправности показывают, что невязки компенсируют эффекты смещения и дрейфа: реальная величина неисправности не отражается в невязках, хотя они сохраняют свои характерные паттерны. Также были вычислены максимальное и минимальное СКО в нормальных (штатных) условиях работы ГА, причем наибольший разброс наблюдается у датчика S7, а наименьший – у датчика S2.

На основании всего вышеизложенного пороговые значения для обнаружения неисправностей устанавливаются следующим образом: $b = 5$ мкм, $d = 0,03$ мкм, $w_{max(t)} = 0,3$ мкм, $w_{min(t)} = 0,1$ мкм.

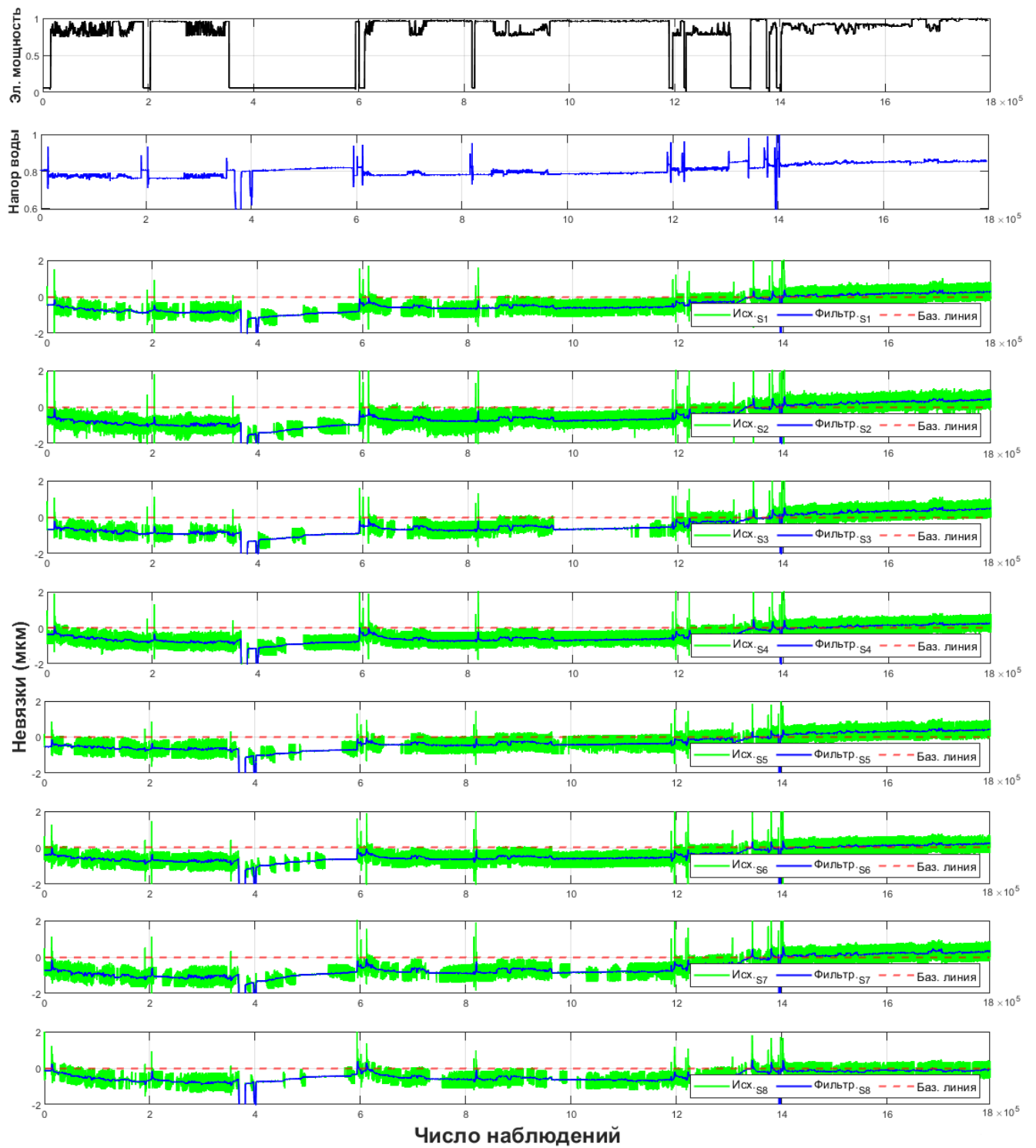


Рисунок 3.17 – Измерения электрической мощности, напора воды и рассчитанные невязки для датчиков S1–S8 в течение 21 дня контроля осевой деформации крепежных шпилек (составлено автором)

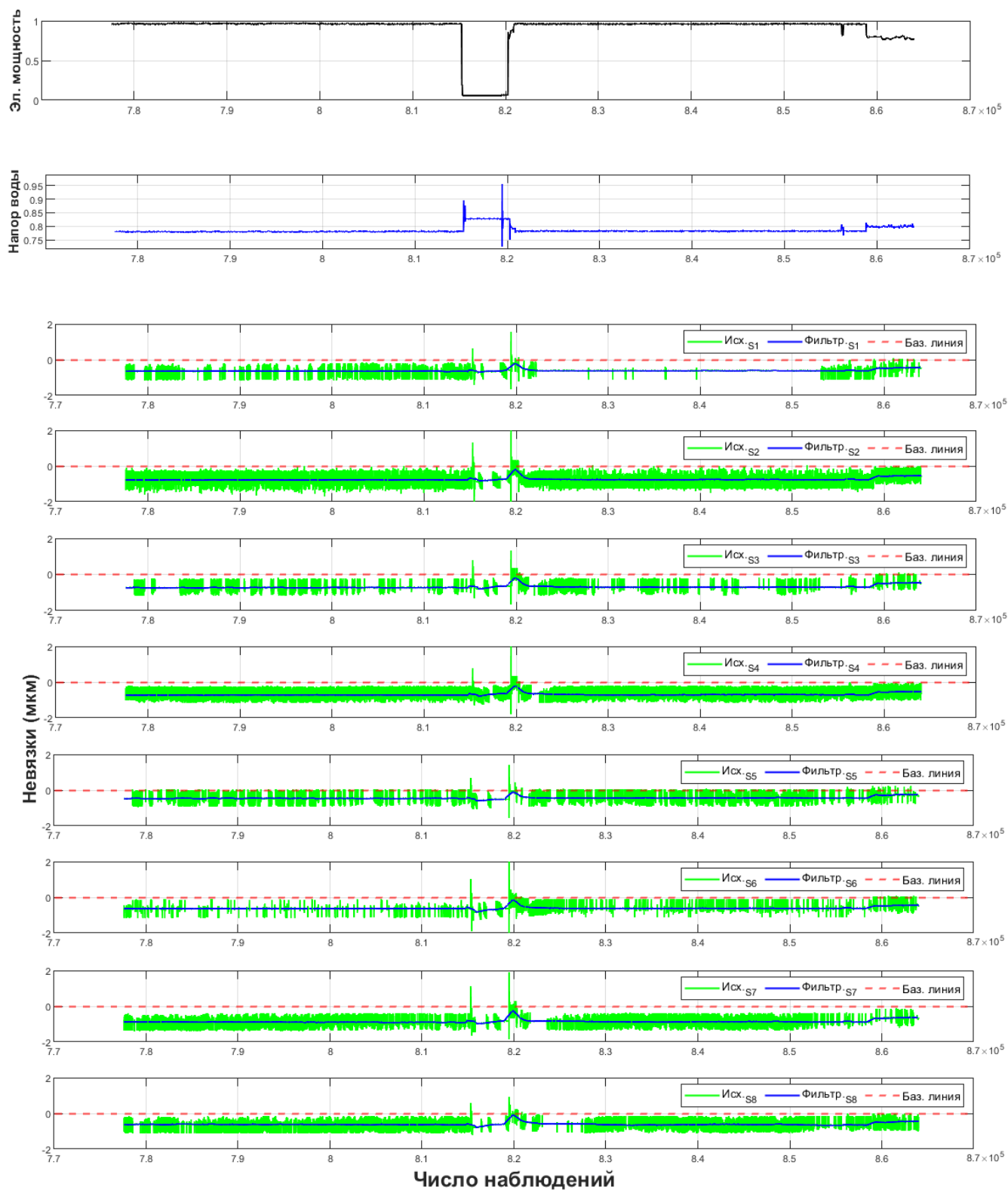


Рисунок 3.18 – Измерения электрической мощности, напора воды и невязок датчиков S1–S8 в течение десятого дня контроля осевой деформации крепежных шпилек (составлено автором)

Моделирование сигналов с неисправностями

С целью формирования тестовых сигналов в измерения осевой деформации крепежных шпилек, соответствующие датчикам S1, S3, S5 и S7 (измерения за 14-й день), были внесены неисправности типа залипание, деградация прецизионности, дрейф и смещение соответственно. На рисунке 3.19 представлены измерения электрической мощности, напора воды, а также оригинальные ($Y_{изм}$) и смоделированные ($Y_{смод}$) данные осевой деформации.

На основе порогов для диагностики технического состояния датчиков осевой деформации, определенных по критериям, описанным в подразделе 3.5.4, установлены следующие значения:

$b_{max} = 10$ мкм, $d_{max} = 0,04$ мкм, $w_{max(t)} = 0,9$ мкм (по критерию трех сигм), $w_{min(t)} = 0,1$ мкм.

На рисунке 3.20 представлен отчет об обнаружении и диагностике неисправностей датчиков.

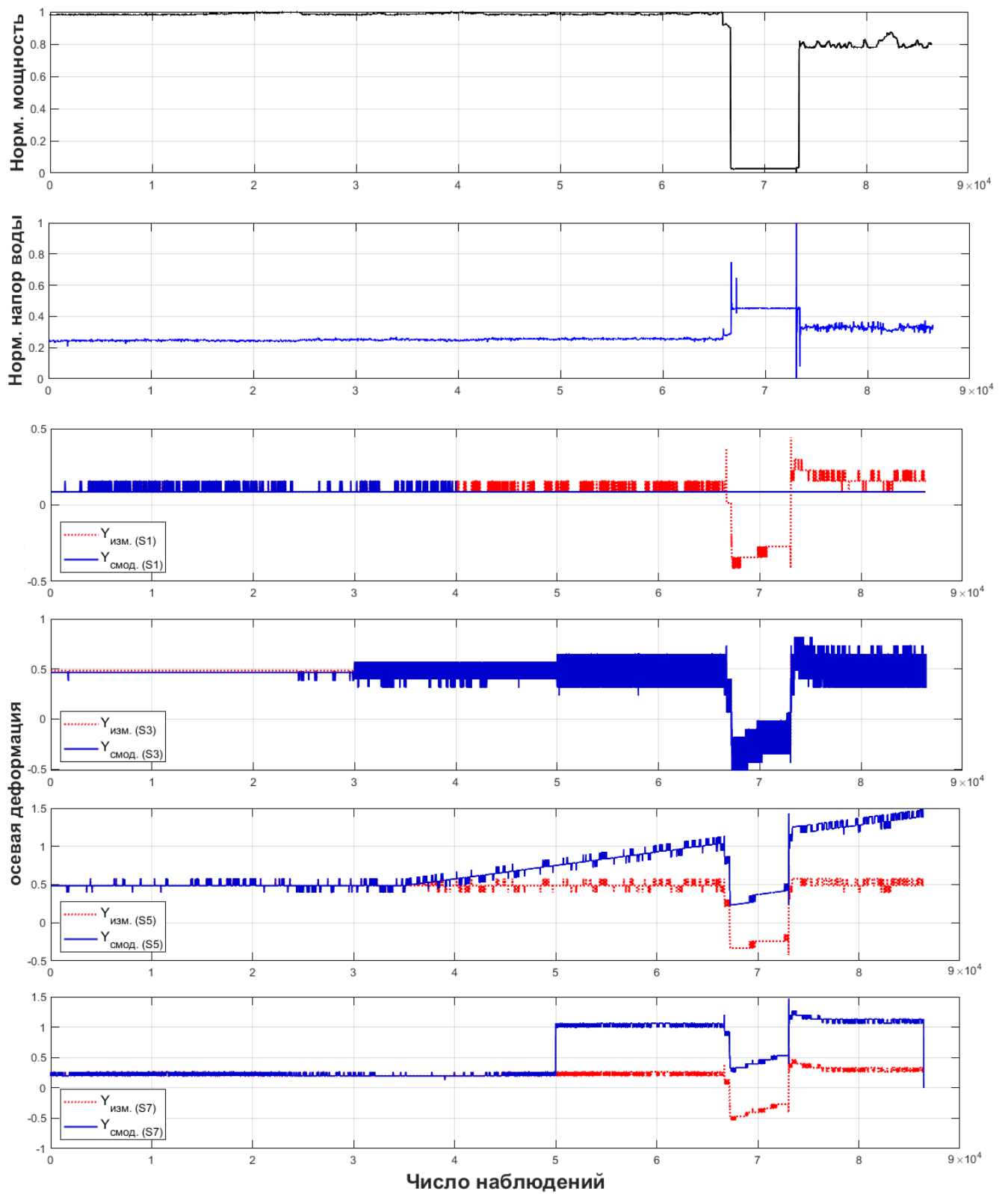


Рисунок 3.19 – Тестовые сигналы осевой деформации крепежных шпилек
(составлено автором)

Обзор	S1	S2	S3	S4
{ 'Тип неискр.' }	"Залипание"	"Нет неискр."	"Дегградация"	"Нет неискр."
{ 'Значение неискр. (мкм)' }	"0.02"	"0.17"	"0.75"	"0.19"
{ 'Время неискр. (с)' }	"86400"	"86400"	"31002"	"86400"
{ 'Метр. исправность' }	"Неисправен"	"Исправен"	"Исправен"	"Исправен"
Обзор	S5	S6	S7	S8
{ 'Тип неискр.' }	"Дрейф"	"Нет неискр."	"Смещение"	"Нет неискр."
{ 'Значение неискр. (мкм)' }	"0.06"	"0.21"	"5.99"	"0.17"
{ 'Время неискр. (с)' }	"40000"	"86400"	"50001"	"86400"
{ 'Метр. исправность' }	"Неисправен"	"Исправен"	"Исправен"	"Исправен"

Рисунок 3.20 – Результаты диагностики неисправности датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины (составлено автором)

3.8 Выводы по главе 3

1. На основе принципа аналитической избыточности построены эмпирические модели для датчиков S1–S8, параметры которых идентифицированы с использованием адаптивного метода Гаусса–Ньютона. Применение фильтра Калмана позволило улучшить точность оценивания, снизив систематическую погрешность до значений не более $-0,03$ мкм. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) составили не менее 0,94, что свидетельствует о высокой корреляции моделей.

2. Подтверждена робастность опорных моделей при воздействии возмущений, характерных для реальных условий эксплуатации. В ходе вычислительных экспериментов с имитацией выбросов, измерительных шумов и изменений режима нагрузки метрика чувствительности S_A не превысила $1,00 \times 10^{-4}$, а средняя абсолютная ошибка (MAE) сохранялась в пределах 0,07–0,30 мкм. Это доказывает высокую устойчивость моделей к помехам и изменениям режимов.

3. Разработан алгоритм, позволяющий однозначно выявлять тип неисправности и диагностировать техническое состояние датчиков. Предложена система решающих правил, которые различают смещение, дрейф, дегградацию и залипание по характеру изменения невязки (сдвигу, тренду, росту или падению дисперсии). Обнаружение неисправностей привязано к поведению напора воды и электрической мощности агрегата. Это снимает неоднозначность интерпретации на

ранних стадиях неисправностей и позволяет выбрать корректную стратегию технического обслуживания.

4. Экспериментальная проверка алгоритма на смоделированных неисправностях подтвердила полную работоспособность и достоверность алгоритма. При внесении в сигналы датчиков S1 (залипание), S3 (деградация), S5 (дрейф) и S7 (смещение) алгоритм корректно идентифицировал каждый тип неисправности, сформировал отчет с указанием времени, типа неисправности и диагностического заключения о состоянии датчиков на основе их метрологической исправности. Результаты представлены графиками невязок и итоговым отчетом (рисунки 3.19–3.21).

ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ КРЕПЕЖНЫХ ШПИЛЕК КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ НА ГЭС

Для повышения достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины (как было показано в разделе 2.1) предлагается формировать дополнительную информацию о датчиках осевой деформации на основе принципа аналитической избыточности. Данная информация содержит характерные паттерны неисправностей датчиков, обнаружение и анализ которых позволяют диагностировать состояние датчиков в условиях длительной непрерывной работы ГА. При этом под повышением достоверности контроля осевой деформации понимается применение метода и программных решений, обеспечивающих достоверность результатов измерений в реальных условиях эксплуатации за счет обнаружения и диагностики неисправностей датчиков, что снижает риск аварии ГА.

Ниже на основе анализа полученных результатов при разработке метода обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины (описанных в главах 2 и 3) рассмотрены и обоснованы основные положения.

4.1 Анализ работоспособности опорных моделей для оценки осевой деформации крепежных шпилек

Теоретический анализ, выполненный в главе 2, показывает, что принцип аналитической избыточности позволяет обнаруживать и диагностировать неисправности датчиков. Для реализации данного принципа и его применения к датчикам осевой деформации необходимо построить математическую модель, оценивающую состояние деформации крепежных шпилек. В этом контексте предложение по построению математических моделей (опорных моделей) для каждого контролируемой шпильки основано на комбинации эмпирической модели и применении линейного фильтра Калмана. Как поясняется в разделе 3.2, это позволяет улучшить оценку динамики деформации крепежных шпилек с помощью двух этапов: прогноз и коррекции.

Согласно определению, данному в разделе 3.3.2, точность оценки состояния осевой деформации крепежных шпилек и робастность опорных моделей S1–S8 оценивались с помощью метрик точности (MAE) и чувствительности (S_A). Результаты, полученные в ходе испытаний с факторами, имитирующими реальную работу ГА (см. раздел 3.3), показывают следующее:

1. Поведение при выбросах (аномальных значениях). На рисунке 3.7 видно, что введенные выбросы не оказывают существенного влияния на оценку деформации крепежных шпилек. Кроме того, в таблице 3.7 показано, что максимальное значение метрики MAE достигает 0,18 мкм, что соответствует примерно 2 % погрешности измерения системы контроля ПТК КМ-Дельта. В свою очередь, значение метрики робастности S_A близко к нулю ($1,00 \times 10^{-4}$), что подтверждает робастность опорных моделей к выбросам.

2. Поведение при шуме измерений. Увеличение шума измерений непосредственно влияет на точность оценки осевой деформации крепежных шпилек, как показано на рисунке 3.8. При увеличении шума измерений на 2 мкм максимальное значение метрики MAE достигает 0,3 мкм (3 % погрешности измерения системы контроля) как отражено в таблице 3.7. С другой стороны, рассчитанное максимальное среднее значение метрики S_A составляет $2,56 \times 10^{-5}$. Оба результата демонстрируют, что опорные модели минимизируют влияние шума измерений и с точностью оценивают осевую деформацию крепежных шпилек даже при наличии шума.

3. Поведение при изменении режима работы. ГА работает как при полной, так и при частичной нагрузке. Как было пояснено в разделе 3.3.1, необходимо изучить точность оценки опорных моделей при изменении режима работы. На рисунке 3.9 видно, что опорные модели S1–S8 оценивают деформацию крепежных шпилек с меньшей точностью при работе ГА на 70 % от номинальной нагрузки. Результаты показывают, что максимальное значение метрики MAE достигает 0,4 мкм, как указано в таблице 3.7. Хотя точность оценки деформации шпилек снизилась, это значение составляет менее 5 % погрешности измерения системы контроля.

4. Поведение при длительном периоде эксплуатации. Как было установлено в разделе 3.2, опорные модели были построены с использованием наборов данных об осевой деформации крепежных шпилек при работе ГА между вторым и третьим режимами работы (холостое вращение и генерация). Однако после длительных периодов эксплуатации ГА переходит в свой первый режим работы (останов). Данный переход также влияет на точность, с которой опорные модели S1–S8 оценивают осевую деформацию крепежных шпилек.

На рисунке 4.1 представлены результаты измерений и оценки осевой деформации шпилек в ходе эксплуатации ГА в течение 21 дня, охватывающие все три режима работы. Из данного рисунка видно, что опорные модели способны оценивать осевую деформацию шпилек как в переходных, так и в установившихся процессах при работе ГА на полной и частичной нагрузке. Однако заметно, что оценка осевой деформации крепежных шпилек отклоняется от реальных измеренных значений, когда ГА переходит в свой первый режим работы. Это напрямую влияет на метрику точности опорных моделей S1–S8, как показано в таблице 4.1.

Анализ таблицы 4.1 показывает, что по сравнению с результатами, представленными в таблице 3.7 (где максимальное значение метрики MAE достигает 0,40 мкм), максимальное значение метрики MAE при учете длительного периода эксплуатации ГА во всех трех режимах работы достигает 0,74 мкм. Следовательно, с помощью разработанных опорных моделей S1–S8 обеспечивается точность оценки осевой деформации крепежных шпилек менее 1 мкм, что эквивалентно 10 % абсолютной погрешности системы контроля.

Таблица 4.1 – Метрика точности MAE за 21 день эксплуатации ГА (составлено автором)

	Опорные модели							
Метрика	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
MAE, мкм	0,58	0,72	0,66	0,58	0,49	0,53	0,74	0,50

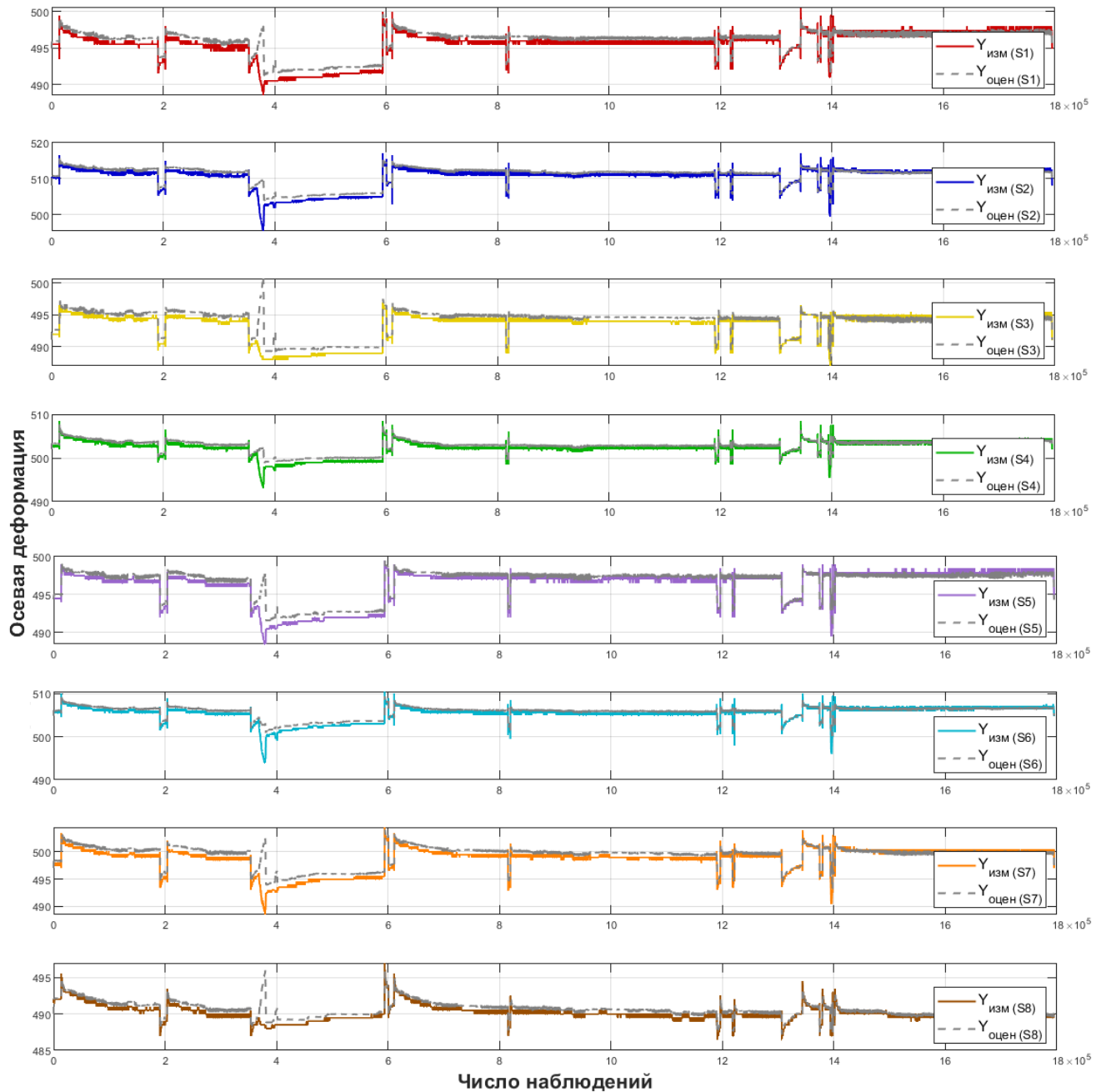


Рисунок 4.1 – Измеренные и оцененные значения деформации крепежных шпилек (S1–S4) за 21 день эксплуатации ГА (составлено автором)

4.2 Анализ обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации системы контроля

Дополнительная информация, формируемая на основе математических моделей, позволяет теоретически обнаруживать неисправности датчиков и посредством диагностического анализа определять их техническое состояние, как подробно описано в подразделе 2.1. Обнаружение и диагностика базируются на

установлении критериев и применении конкретных методов для каждого типа неисправности в соответствии с разделом 2.4.

Однако предварительно необходимо проанализировать отклик опорных моделей на неисправности датчиков, то есть определить, какая дополнительная информация может быть получена с помощью разработанных моделей. На основе результатов испытаний, проведенных в подразделе 3.4.3, установлено следующее.

1. Отклик опорных моделей на смещение. На рисунке 3.12б виден сдвиг значений невязок, вызванный неисправностью. При неисправностях типа смещение величиной 10, 25 и 50 % от погрешности измерения системы контроля получены приближенные значения невязок 0,1; 0,3 и 0,6 мкм соответственно. Иными словами, при неисправности в 1 мкм (10 % погрешности измерения системы) возникает сдвиг в 0,1 мкм. Это указывает на то, что опорные модели частично компенсируют неисправность. Кроме того, момент возникновения неисправности типа смещение отражается в получаемых невязках без искажений.

2. Отклик опорных моделей на дрейф. Аналогично неисправности типа смещение, на рисунке 3.13б наблюдается компенсация неисправности типа дрейф со стороны опорных моделей. Компенсация влияет как на характерный наклон графика, обусловленный неисправностью, так и на время, в течение которого неисправность становится заметной. Например, на рисунке 3.13а видно, что неисправность, введенная со значением 25 % от погрешности измерения системы контроля на 4000-м измерении, генерирует невязки с меньшим наклоном, становящиеся заметными начиная с 7000-го измерения.

Компенсация, наблюдаемая при указанных неисправностях, происходит на втором этапе (этапе коррекции) фильтра Калмана при оценке осевой деформации шпилек. Фильтр Калмана вычисляет оптимальное значение состояния деформации на основе матриц Q и R (ковариационных матриц шума процесса и шума измерения соответственно), принимая решение – больше доверять модели деформации шпильки или показаниям датчика. Компенсация реализуется при расчета коэффициента Калмана для каждого измерения. Поскольку вычисленные невязки демонстрируют компенсацию, фильтр Калмана при небольших отклонениях

оказывает большее доверие показаниям датчиков. Однако, когда измерения начинают отклоняться от нормального поведения на величины, превышающие 2,5 мкм (25 % погрешности измерения системы), фильтр Калмана больше доверяет значениям, прогнозируемым моделью, и сдвиг становится более очевидным, как показано на рисунках 3.12б и 3.13б.

3. Отклик опорных моделей на деградацию прецизионности. Реакция на деградацию точности (прецизионности). На рисунке 3.14б видно, что разброс значений невязок возрастает с увеличением имитируемой неисправности, обусловленной деградацией прецизионности. Таким образом, деградация результатов измерений четко отражается в получаемых невязках. Кроме того, величина неисправности не компенсируется (в отличие от двух предыдущих случаев), а момент ее возникновения однозначно идентифицируется по невязкам.

4. Реакция на залипание. Как показано на рисунке 3.15б, при имитации неисправности типа залипание датчика в момент ее возникновения в невязках появляется пик. В дальнейшем, поскольку измеренные значения осевой деформации крепежных шпилек остаются постоянными, невязки характеризуются низким разбросом, близким к нулю.

Таким образом, результаты анализа отклика опорных моделей на различные типы неисправностей показывают, что невязки являются информативным признаком для их обнаружения и диагностики. При этом смещение и дрейф частично компенсируются фильтром Калмана, тогда как деградация точности и залипание отражаются в невязках практически без компенсации.

Поведение невязок в течение длительных периодов работы ГА

Характерные паттерны, полученные в невязках для каждого типа неисправности, составляют основу для разработки алгоритма обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля. Тем не менее необходимо также проанализировать поведение невязок в течение длительных периодов работы ГА, чтобы определить пороги обнаружения, как поясняется в подразделе 3.5.1.

На основе результатов поведения невязок в течение 21 дня непрерывной работы ГА (представленных на рисунке 3.17) установлено, что значения невязок варьируются в диапазоне ± 2 мкм.

При анализе векторов невязок для каждой контролируемой шпильки в течение одного дня работы ГА видно, что их значения остаются практически постоянными. Иными словами, в нормальных условиях эксплуатации ГА и при исправной работе датчиков невязки имеют почти постоянную тенденцию. Данная тенденция временно нарушается только при изменении режима работы ГА, что вызывает появление пиков в общей динамике невязок.

Связь между поведением невязок и процессом выработки электроэнергии

Поведение ГА в процессе выработки электроэнергии проявляется в изменениях напора воды и вырабатываемой электрической мощности. Изменение этих двух величин необходимо учитывать, чтобы избежать ложных срабатываний при обнаружении неисправностей датчиков, как объясняется в подразделе 3.5.2.

Методика, представленная в подразделе 3.5.2 для установления связи между поведением указанных величин и значениями невязок, основана на предварительном определении нормального поведения параметров напора воды и выработки электрической мощности (HP_i , PW_i , $w_{HP\max(t)}$, $w_{HP\min(t)}$), а также на их анализе на этапе локализации. Это гарантирует, что обнаруженная неисправность действительно соответствует неисправности датчика, а не изменению параметров, связанных с процессом выработки электроэнергии.

После классификации типа обнаруженной неисправности техническое состояние датчиков системы контроля определяется на основе их метрологической исправности. Данный подход обоснован тем, что неисправности влияют на результаты измерений, приводя к несоблюдению установленных метрологических характеристик, таких как погрешность и прецизионность измерений, в процессе непрерывной работы ГА. Следовательно, обеспечивая соблюдение этих установленных метрологических характеристик измерительной системы, повышается достоверность контроля деформации крепежных шпилек крышки турбины.

Таким образом, на основе полученных результатов о поведении невязок, а также анализа поведения параметров напора воды и вырабатываемой электрической мощности, достигается следующее: обнаружение неисправностей типа смещение и дрейф величиной более 5 мкм; обнаружение деградации прецизионности, когда значение среднего квадратического отклонения (СКО) превышает 0,3 мкм; обнаружение залипания, когда СКО снижается ниже 0,1 мкм; диагностика технического состояния датчиков по их метрологической исправности.

4.3 Рекомендации по интеграции метода в системы мониторинга ГЭС

Интеграция разработанного метода в действующие системы контроля осевой деформации крепежных шпилек (например, ПТК КМ-Дельта) выполняется на программном уровне без внесения конструктивных изменений в измерительное оборудование, что является ключевым преимуществом предлагаемого подхода. Внедрение предполагает выполнение следующих организационно-технических этапов.

Оценка технической возможности интеграции

Перед началом работ проводится анализ существующей системы контроля установленны на ГЭС. Для реализации метода необходимы следующие данные, доступные в штатном режиме работы гидроагрегата (ГА):

- измерения осевой деформации крепежных шпилек;
- измерения напора воды;
- измерения генерируемой электрической мощности.

Измерения перечисленных параметров должны выполняться синхронно и с частотой дискретизации не хуже 1 Гц.

Интеграция разработанного метода в систему нижнего уровня

Построение опорных моделей для реализации разработанного метода составляет основу, обеспечивающую корректное определение состояния датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек. Каждый гидроагрегат на ГЭС считается уникальным. Из исследования осевой деформации шпилек

следует, что деформация шпилек также будет различаться: тенденция деформации аналогичная, но величина деформации разная.

Таким образом, построение каждой опорной модели должно быть индивидуальным. Кроме того, значения порогов обнаружения и диагностики также будут разными для каждого гидроагрегата на ГЭС.

Интеграция разработанного метода в систему верхнего уровня

Разработанный метод реализуется в виде автономного программного модуля, который функционирует на сервере системы сбора данных или на выделенном промышленном контроллере. Интеграция включает три уровня.

1. Уровень сбора данных

Из штатной системы контроля (ПТК КМ-Дельта или аналог) поступают потоки данных от датчиков осевой деформации, датчика напора воды и датчика электрической мощности.

2. Уровень обработки

Программный модуль выполняет:

- вычисление вектора невязок;
- расчет признаков для обнаружения неисправностей (последовательные разности, наклон в скользящих окнах, среднеквадратическое отклонение невязок);
- применение пороговых правил обнаружения и решающей логики, описанных в разделе 3.5;
- определение состояния датчиков системы контроля (диагностика).

3. Уровень представления

Результаты диагностики (номер неисправного датчика, тип неисправности, временная метка, заключение о метрологической исправности) передаются:

- диспетчеру ГЭС – в виде мнемосхемы с цветовой индикацией состояния каждого датчика (например, зеленый – исправен, желтый – предупреждение, красный – неисправность);
- в архивную базу данных – для формирования отчетов и последующего анализа трендов метрологической исправности;

- в систему управления техническим обслуживанием – для автоматического создания заявок на поверку или замену датчика.

4.4 Ограничения разработанного метода и его интеграции

Несмотря на то, что реализация предложенного метода требует только программных ресурсов, что является его существенным преимуществом, в процессе исследования были выявлены следующие ограничения, которые необходимо учитывать при практическом применении.

1. Переход между режимами работы ГА

Построенные опорные модели не обеспечивают корректного оценивания осевой деформации крепежных шпилек при переходе ГА из режима 2 (холостое вращение) в режим 1 (останов). Вследствие этого в момент перехода вычисленные значения невязок могут превышать установленные пороги обнаружения, что приводит к риску возникновения ложных срабатываний алгоритма. Данное ограничение требует дополнительной обработки переходных режимов либо временного отключения диагностики на этапе останова.

2. Обнаружение неисправностей типа дрейф сложной формы

При разработке метода анализ неисправности типа дрейф ограничился моделью линейного возрастающего дрейфа. Однако в реальных условиях эксплуатации дрейф датчиков может иметь экспоненциальный или переменный характер. Предложенный алгоритм не гарантирует надежного обнаружения таких нестандартных форм дрейфа, что сужает область его применимости для некоторых типов неисправности датчиков.

3. Необходимость перестроения моделей после технического обслуживания

После выполнения ремонтных или профилактических работ на ГА или его крепежных шпильках требуется повторное построение опорных моделей и переопределение пороговых критериев обнаружения. Данная процедура не может быть выполнена автоматически и требует участия квалифицированного специалиста. Это ограничивает степень автономности метода и увеличивает эксплуатационные затраты.

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработанные опорные модели S1–S8 на основе эмпирической модели и фильтра Калмана обеспечивают оценку осевой деформации крепежных шпилек с точностью менее 1 мкм (что не превышает 10 % абсолютной погрешности системы контроля ПТК КМ-Дельта) в условиях длительной эксплуатации ГА, включая переходные и стационарные процессы работы. При этом модели демонстрируют робастность к выбросам, шуму измерений и изменению режимов работы ГА.

2. Анализ отклика опорных моделей на различные типы неисправностей датчиков показал, что невязки являются информативным признаком для их обнаружения и диагностики. Установлено, что смещение и дрейф частично компенсируются фильтром Калмана (обнаруживаются при величине более 5 мкм), тогда как деградация прецизионности ($СКО > 0,3$ мкм) и залипание ($СКО < 0,1$ мкм) отражаются в невязках без компенсации, что позволяет однозначно идентифицировать момент и тип неисправности.

3. Установлено, что интеграция разработанного метода в системы контроля осевой деформации крепежных шпилек на ГЭС обеспечивается тремя иерархическими уровнями: нижним (построение моделей), уровнем обработки (хранение данных и вычисление признаки технического состояния датчиков) и верхним (интеграция результаты диагностики датчиков с системой управления гидроагрегата).

4. Выявлены ограничения разработанного метода, которые необходимо учитывать при его практическом применении: некорректное оценивание деформации при переходе ГА из режима холостого вращения в режим останова (риск ложных срабатываний); отсутствие гарантий обнаружения дрейфа сложной (экспоненциальной, переменной) формы; необходимость повторного построения моделей после технического обслуживания, что снижает автономность метода и увеличивает эксплуатационные затраты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научной задачи – разработка метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, направленного на повышение достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации гидроагрегата.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ конструкции узла крепления, механических и гидравлических нагрузок, вызывающих деформацию крепежных шпилек крышки гидротурбины, а также систем измерения деформации и методов обеспечения достоверности их результатов, позволил доказать важность и необходимость разработки новых методов обеспечения результатов измерений в системах непрерывного контроля деформации крепежных шпилек в условиях длительных межповерочных интервалов.

2. Экспериментальная оценка принципа структурной избыточности и теоретический анализ временной и аналитической избыточности показывают, что аналитическая избыточность является наиболее применимой для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины.

3. Разработка опорных моделей осевой деформации крепежных шпилек, основанных на применении линейного фильтра Калмана к представлению в пространстве состояний каждой эмпирической модели, позволяет оценивать деформацию каждой шпильки во время работы ГА, а также формировать невязки, необходимые для реализации принципа аналитической избыточности.

4. Валидация опорных моделей применительно к выбросам, измерительному шуму и изменениям режима работы ГА подтверждает их высокую точность и робастность для оценки состояния деформации крепежных шпилек и обеспечения реализации аналитической избыточности в условиях, имитирующих реальную

эксплуатацию. Однако наблюдается, что когда ГА переходит в режим 1 (останов), опорные модели не оценивают корректно динамику деформации крепежных шпилек.

5. Анализ отклика опорных моделей на смоделированные неисправности датчиков типа смещение, дрейф, деградация прецизионности и залипание демонстрирует, что каждый тип неисправностей формирует невязки с характерными паттернами. Изучение этих паттернов позволило установить критерии обнаружения и диагностики, на основе которых был разработан алгоритм, автоматически обнаруживающий неисправности датчиков и диагностирующий их метрологическую исправность.

6. Факторы, влияющие на деформацию крепежных шпилек, методология построения опорных моделей, а также результаты валидации моделей и алгоритма обнаружения и диагностики позволили разработать рекомендации по практической реализации предложенного метода в системах контроля осевой деформации крепежных шпилек крышек гидротурбин на ГЭС.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут направлены на оценку неопределенности измерений в условиях реальной эксплуатации ГА, а также на анализ связи между деформацией крепежных шпилек и другими сигналами (например, деформацией крышки гидротурбины) для улучшения алгоритмов обнаружения и диагностики неисправностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов, С. А. Анализ эффективности способов повышения устойчивости Саяно-Шушенской ГЭС / С. А. Абакумов, А. В. Виштибеев, Е. А. Королук // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 2. – С. 21-27.
2. Абдульмянов, Т. Р. Моделирование резонансных вибраций в гидроагрегатах ГЭС с широким диапазоном рабочей зоны / Т. Р. Абдульмянов, Л. Т. Епифанова, В. К. Епифанов, [и др.]. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 4(56). – С. 113-123.
3. Буров, А. Е. Оценка живучести конструкции крепления крышки гидротурбины в аварийной ситуации / А. Е. Буров // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 44(4). – С. 10-14.
4. Гнитько, В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния крепежа фланцевых соединений гидротурбин / В. И. Гнитько, О. Ф. Полищук, А. Ю. Черкасский, Н. А. [и др.] // Проблемы машиностроения. – 2017. – № 1(20). – С. 36-44.
5. ГОСТ Р 8.734–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. Москва: Стандартинформ, 2011. – 24 с.
6. ГОСТ Р 55260.3.2–2013. Гидроэлектростанции. Часть 3-2. Гидротурбины. Методики оценки технического состояния. Москва: Стандартинформ, 2016. – 92 с.
7. Егоров, В. В. Оценка влияния режима работы гидроагрегатов на осевое усилие и крепежные элементы гидроагрегатов / В. В. Егоров, К. А. Демшин // Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, Саяногорск-Черемушки, 25–26 апреля 2019 года. – Саяногорск-Черемушки: Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, 2019. – С. 160-167. – EDN WDJUGY.

8. Еренков, О. Ю. Контроль процессов деформирования и разрушения твердых полимерных материалов по значениям параметров сигналов акустической эмиссии / О. Ю. Еренков, А. В. Гаврилова // Пластические массы. – 2007. – Т. 10. – С. 29–31.

9. Кириянов, В. П. Анализ алгоритмов самокалибровки в оптических датчиках угловых перемещений / В. П. Кириянов, А. Д. Петухов, А. В. Кириянов // Автометрия. – 2022. – № 3 (58). – С. 12–23.

10. Козлов, Ю. Н. Компьютерный анализатор дефектов для ультразвуковой дефектоскопии шпилек крепления крышек турбин гидроэлектростанций / Ю. Н. Козлов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2023. – Т. 7. – С. 78–83.

11. Михалев, В. В. Опыт ультразвукового контроля шпилек крепления крышек гидроагрегатов ГЭС / В. В. Михалев, Д. М. Давыдов, С. В. Шишкин // Дефектоскопия. – 2011. – Т. 4. – С. 50–56.

12. Молев, Ф. В. Система безопасности гидротехнического оборудования современной ГЭС / Ф. В. Молев, А. Г. Сергушев, В. С. Игнатьев // Гидротехника. – 2019. – № 55 (2). – С. 45–47.

13. Платонов, Д. В. Математическое моделирование нестационарных явлений в гидротурбине Саяно-Шушенской ГЭС / Д. В. Платонов, А. В. Минаков, А. А. Дектерев // Труды Академэнерго. – 2013. – № 1. – С. 73–84.

14. Ремпель, Г. И. Современный подход к анализу НДС агрегатных блоков высоконапорных ГЭС со сталежелезобетонной конструкцией спиральной камеры / Г. И. Ремпель, А. М. Бударин, А. П. Долгих // Гидротехническое строительство. – 2024. – № 10. – С. 31–40.

15. **Ривас, Э. Ю.** Цифровая метрология как ответ на развитие интеллектуального производства / **Э. Ю. Ривас**, А. В. Вячеславов, А. С. Уманский // Приборы. – 2024. – № 4(286). – С. 41–54. – EDN OQRWVP.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617174 Российская Федерация. Программа для обнаружения и устранения выбросов в больших данных измерений для датчиков перемещения. Заявка

№ 2024614933: заявл. 13.03.2024: опубл. 29.03.2024 / А. В. Вячеславов, Э. Юхра Ривас, Д. С. Громыка; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с. : ил. – Текст: непосредственный.

17. Стрельникова, Е. А. Использование компьютерных технологий при модернизации крышек гидротурбин типа ПЛ 20-В-500 / Е. А. Стрельникова, Т. Ф. Медведовская, Е. Л. Медведева, [и др.]. // Проблемы машинобудування. – 2018. – № 1(21). – С. 35-44.

18. Тайманов, Р. Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р. Е. Тайманов, К. В. Сапожникова // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: Материалы конференции с международным участием, 18–20 октября 2010 года – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – С. 1088-1099. – EDN SYLOQV.

19. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений утверждённые типы средств измерений регистрационный № 77721-20. Описание типа средства измерений. Комплексы Программно-Технические ПТК КМ- Дельта: Приказ № 1604 от 04 июля 2024 г. – Москва. – 11 с.

20. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений утверждённые типы средств измерений регистрационный № 51181-12 описание типа средства измерений. Комплексы Мониторинга Линейных Деформаций Восьмиканальные ПТК КМ- Дельта-8-СМ: Приказ № 1339 от 15 сентября 2014 г. – Москва. – 4 с.

21. Хорошилов, В. С. Прогнозирование процесса перемещений высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации после аварии 2009 г. / В. С. Хорошилов, А. Г. Барлиани, П. Н. Губонин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 6(714). – С. 48-62.

22. Шубарев В. Математическое моделирование процесса сборки силоизмерительной шайбы / В. Шубарев, В. Мельников, Н. Иванов, [и др.]. // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2013. – Т. 128. – С. 32-39.

23. Электрические сети : Саяно-Шушенская ГЭС - Гидроэнергетическое оборудование - крупнейшие в мире гидротурбины и гидрогенераторы. – Санкт-Петербург. – URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/sayano-shushenskaya-ges/Page-9.html> (дата обращения: 25.06.2026).

24. **Юхра Ривас, Э.** Анализ статистических методов обнаружения выбросов при измерениях напора воды в гидроагрегате / **Э. Юхра Ривас, А. В. Вячеславов** // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 300-302. – EDN QUFLYL.

25. **Юхра Ривас, Э.** Алгоритм обнаружения выбросов в больших массивах результатов измерений (данных) с применением статистических методов анализа / **Э. Юхра Ривас, К. В. Гоголинский** // Приборы. – 2023. – № 9(279). – С. 35-45. – EDN CDVMQT.

26. **Юхра, Р. Э.** Обнаружение и устранение выбросов в больших базах данных измерений с помощью статистических методов / **Р. Э. Юхра** // Российская наука в современном мире : Сборник статей LVIII международной научно-практической конференции, Москва, 30 ноября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2023. – С. 86-88. – EDN BDYTWI.

27. **Юхра, Э.** Умное производство и его связь с цифровой метрологией / **Э. Юхра, А. В. Вячеславов** // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 406-408. – EDN SPQACU.

28. Pohl A. A review of wireless SAW sensors // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2002. – Vol. 47, – No. 2. – P. 317-332.

29. Ahmad R. Enhanced drift self-calibration of low-cost sensor networks based on cluster and advanced statistical tools // Measurement. – 2024. – Vol. 236. – P. 115158.

30. ASME PCC-1–2022. Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly. – New York: American Society of Mechanical Engineers, – 2022. – 118 p.
31. Arpin-Pont, J. Strain gauge measurement uncertainties on hydraulic turbine runner blade / J. Arpin-Pont, M. Gagnon, S. A. Tahan, [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2012. Vol. 15, no. 6. P. 062042.
32. Belgacem, H. Toward Reliable and Intelligent Sensor Systems: A Comprehensive Study of Fault Diagnosis and Mitigation / H. Belgacem, I. Chihi // IEEE Sensors Reviews. 2025. Vol. 2. P. 511–536.
33. Butt, F. A. Self-calibration of wireless sensor networks using adaptive filtering techniques / F. A. Butt, M. Jalil, S. Liaquat, [et al.] // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – Art. no. 103775.
34. Chammas, A. Drift detection and characterization for fault diagnosis and prognosis of dynamical systems / A. Chammas, M. Sayed-Mouchaweh, [et al.] // International Conference on Scalable Uncertainty Management. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 113–126.
35. Chen, B. Kalman filtering / B. Chen, L. Dang, N. Zheng, J. C. Principe // Kalman Filtering Under Information Theoretic Criteria. – Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 11–51.
36. Chen, F. Computation of static stresses of the head cover bolts in a pump turbine / F. Chen, L. Chen, Z. Wang, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 493, No. 1. P. 012143.
37. Chen, L. Study on dynamic stress variation of head cover bolt during transient operation of pump turbine / L. Chen, H. Li, M. Huang, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2752, No. 1. P. 012084.
38. Chen, Y. Self-validating sensor technology and its application in artificial olfaction: A review / Y. Chen, M. Wang, Z. Chen, [et al.] // Measurement. 2025. Vol. 242. P. 116025.
39. Chen, Y. Self-Loosening Failure Analysis of Bolt Joints under Vibration considering the Tightening Process / Y. Chen, Q. Gao, Z. Guan // Shock and Vibration. 2017. Vol. 2017. Art. no. 2038421.

40. Chow, E. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems / E. Chow, A. Willsky. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1984. – Vol. 29. – No. 7. – P. 603–614.

41. Eraliev, O. M. U. Experimental investigation on self-loosening of a bolted joint under cyclical temperature changes / O. M. U. Eraliev, Y. H. Zhang, K. H. Lee, [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 13. – No. 8. – P. 16878140211039428.

42. Gao, L. Sensor drift fault diagnosis for chiller system using deep recurrent canonical correlation analysis and k-nearest neighbor classifier / L. Gao, D. Li, L. Yao, [и др.] // ISA Transactions. – 2022. – Vol. 122. – P. 232–246.

43. Garvey, J. Validation of on-line monitoring techniques to nuclear plant data / J. Garvey, D. Garvey, R. Seibert, [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2007. – Vol. 39. – No. 2. – P. 133–142.

44. Gaur, H. M. Design for Stuck-at Fault Testability in MCT based Reversible Circuits / H. M. Gaur, A. K. Singh, U. Ghaneka // Defense Science Journal. – 2018. – Vol. 68. – No. 4. – P. 381–387.

45. Gibson, R. F. Experimental and numerical characterization of relaxation in bolted composite joints / R. F. Gibson, S. D. Thoppul // Composite Materials and Joining Technologies for Composites, Volume 7: Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. New York, NY: Springer New York, 2013. – P. 39–49

46. Gogolinskiy, K. V. Metrological Assurance and Standardization of Advanced Tools and Technologies for nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0) / K. V. Gogolinskiy, V. A. Syasko // Research in Nondestructive Evaluation. 2020. № 5–6 (31). C. 325–339.

47. Hashemian, H. M. On-line monitoring applications in nuclear power plants / H. M. Hashemian // Progress in Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 53. – No. 2. – P. 167–181.

48. He, L. Research and application of deformation measurement method of hydraulic turbine head cover / L. He, W. Deng // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2310. – No. 1. – P. 012043.

49. Henry, M. On-line compensation in a digital Coriolis Mass Flow meter / M. Henry // Flow Measurement and Instrumentation. – 2001. – Vol. 12. – No. 2. – P. 147–161.
50. Henry, M. P. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples / M. P. Henry, D. W. Clarke // Control Engineering Practice. – 1993. – Vol. 1. – No. 4. – P. 585–610.
51. Hong, Z. Optimization Analysis of Head Cover Structure of High Head Pump Turbine / Z. Hong, H. Shihai, Z. Junpeng, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2752. – No. 1. – P. 012087.
52. Hua, H. Strain Sensor-Based Fatigue Prediction for Hydraulic Turbine Governor Servomotor in Complementary Energy Systems / H. Hua, Z. Zhang, X. Liu, [и др.] // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – No. 18.
53. IEC 60193:2019. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines — Model acceptance tests. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019. – 472 p.
54. IEC 62256:2017. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines — Rehabilitation and performance improvement. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. – 186 p.
55. ISO 5725-1:2023. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions. – Geneva: International Organization for Standardization, 2023. – 30 p.
56. ISO 10012:2026. Quality management — Requirements for measurement management systems. – Geneva: International Organization for Standardization, 2026. – 26 p.
57. ISO 13372:2012. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vocabulary. – Geneva: International Organization for Standardization, 2012. – P. 24.
58. ISO 16336:2014. Applications of statistical and related methods to new technology and product development process — Robust parameter design (RPD). – Geneva: International Organization for Standardization, 2014. – 46 p.

59. ISO 21748:2017. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 44 p.

60. ISO/IEC/IEEE 15289:2017. Systems and software engineering — Content of life-cycle information items (documentation). – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 54 p.

61. ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering — Vocabulary. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 522 p.

62. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement / Joint Committee for Guides in Metrology. – Paris: JCGM, 2008. – 120 p.

63. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method / Joint Committee for Guides in Metrology. – Paris: JCGM, 2008. – 90 p.

64. Jia, Y. A method for analysis of head cover deformation and vibration amplitude in Francis hydro-turbine system by combination of CFD and FEA / Y. Jia, F. C. Li, X. Z. Wei, [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – Vol. 31. – No. 9. – P. 4255–4266.

65. Kajmakovic, A. Degradation Detection in a Redundant Sensor Architecture / A. Kajmakovic, K. Diwold, K. Römer, [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – No. 12.

66. Khoshvaght, H. A critical review on selecting performance evaluation metrics for supervised machine learning models in wastewater quality prediction / H. Khoshvaght, R. R. Permala, A. Razmjou, [и др.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13. – No. 6. – P. 119675.

67. Kullaa, J. Detection, identification, and quantification of sensor fault in a sensor network / J. Kullaa // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 40. – No. 1. – P. 208–221.

68. Kumar, G. C. Design and Analysis of a Compact Hydraulic Bolt Tensioner / G. C. Kumar, S. R. Mungara, J. Sanjan // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2332. – No. 1. – P. 012013.

69. Lafleur, F. Acoustic and mechanical measurements of an hydraulic turbine's generator in relation to power levels and excitation forces / F. Lafleur, S. Bélanger, L. Marcouiller, A. Merkouf // *Structural Dynamics, Volume 3: Proceedings of the 28th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2010*. New York, NY: Springer New York, 2011. – P. 225–231.

70. Liao, X. Study on optimization design of pump turbine with high head based on CFD technique / X. Liao, Y. Zheng, C. Zhang, [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2024. – Vol. 1411. – No. 1. – P. 012035.

71. Link, R. E. An introduction to the design and behavior of bolted joints / Link R. E. // *Journal of Testing and Evaluation*. – 1991. – Vol. 19. – No. 5. – P. 417–418.

72. Liu, H. High-frequency ultrasonic methods for determining corrosion layer thickness of hollow metallic components / H. Liu, L. Zhang, H. F. Liu, [et al.] // *Ultrasonics*. – 2018. – Vol. 89. – P. 166–172.

73. Liu, J. G. Design for Self-calibration of Instrumentation / J. G. Liu, U. Frühauf // *XVI IMEKO World Congress Proceedings*. – 2000. – Vol. 1. – P. 9.

74. Luo, Y. Stresses and relative stiffness of the head cover bolts in a pump turbine / Y. Luo, F. Chen, L. Chen, [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 493. – No. 1. – P. 012113.

75. Luo, Y. Study on stresses of head cover bolts in a pump turbine based on FSI / Y. Luo, F. Chen, L. Chen, [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 804. – No. 4. – P. 042062.

76. Mantilla-Viveros C. Fatigue Analysis of the Head Cover of a 100-MW Hydroelectric Power Plant / C. Mantilla-Viveros, R. Aponte, F. Casanova-Garcia // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2025. – Vol. 25. – No. 4. – P. 1850–1858.

77. Meyer, M. H. N. Experimental Investigations on load-bearing Capacity and characteristic Preload of Lockstud Systems / M. H. N. Meyer, M. Schwarz, R. Glienke, [и др.] // *ce/papers*. – 2023. – Vol. 6. – No. 3–4. – P. 1250–1255.

78. Mohanta, R. K. Sources of vibration and their treatment in hydro power stations-A review / R. K. Mohanta, T. R. Chelliah, [et al.] // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2017. – Vol. 20. – No. 2. – P. 637–648.
79. Pang, S. Study on suppression of cavitating vortex rope on pump-turbines by J-groove / S. Pang, B. Zhu, Y. Shen, [et al.] // Applied Energy. – 2024. – Vol. 360. – P. 122843.
80. Stephens, R. I. Metal Fatigue in Engineering / R. I. Stephens, A. Fatemi, [et al.]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. – 496 p.
81. Ren, J. Design of SAW sensor for longitudinal strain measurement with improved sensitivity / J. Ren, K. Anurakparadorn, H. Gu, [et al.] // Microsystem Technologies. – 2019. – Vol. 25. – No. 1. – P. 351–359.
82. Budynas, R. G. Shigley's mechanical engineering design / R. G. Budynas, J. K. Nisbett. 12th ed. New York: McGraw-Hill, 2024. – P. 593–598.
83. Rode, B. R. Effects of vortex rope formation in draft tube of reversible pump-turbine – A review / B. R. Rode, A. Kumar // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 99. – P. 113250.
84. Rousseau, R. I. The Tightening and Untightening Modeling and Simulation of Bolted Joints / R. I. Rousseau, A. H. Bouzid // Machines. – 2024. – Vol. 12. – No. 9.
85. Nassar, S. A. An Improved Stiffness Model for Bolted Joints / S. A. Nassar, A. Abboud // Journal of Mechanical Design. – 2009. – Vol. 131. – No. 12. – P. 121001.
86. Sharma, A. B. Sensor faults: Detection methods and prevalence in real-world datasets / A. B. Sharma, L. Golubchik, R. Govindan // ACM Trans. Sen. Netw. – 2010. – Vol. 6. – No. 3.
87. Sun, J. Transient vibration analysis of multi-system coupling in pumped storage power Stations: Insights into cavitation-induced flow and shaft dynamics / J. Sun, C. Feng, Y. Zhang, [et al.] // Energy. – 2025. – Vol. 328. – P. 136516.
88. Symonov, A. On-line monitoring of sensors //2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). – IEEE, 2023. – P. 1–6.

89. Taymanov, R. What makes sensor devices and microsystems “intelligent” or “smart”? / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Smart Sensors and MEMs. – Woodhead Publishing, 2018. – P. 1–22.

90. Tong, P. A novel eddy current sensor for displacement measurement with high accuracy and long range / P. Tong, L. Wu, A. Yanchen, [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23. – No. 11. – P. 12066–12075.

91. Torshizian, M. R. The analysis of failure for a stud bolt with reduced shank under dynamic loading / M. R. Torshizian, M. Ghayuri // Journal of simulation and analysis of novel technologies in mechanical engineering (Journal of solid mechanics in engineering). – 2021. – Vol. 13. – No. 2. – P. 5–11.

92. Fukuoka, T. Finite element simulation of the tightening process of bolted joint with a bolt heater / T. Fukuoka, Q. Xu // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2002. – Vol. 124. – No. 4. – P. 457–464.

93. Trapani, N. Fault detection and diagnosis methods for sensors systems: a scientific literature review / N. Trapani, L. Longo // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – Vol. 56. – No. 2. – P. 1253–1263.

94. Trivedi, C. Experimental and numerical studies of a high-head Francis turbine: a review of the Francis-99 test case / C. Trivedi, M. J. Cervantes, O. G. Dahlhaug // Energies. – 2016. – Vol. 9. – No. 2.

95. ul Hassan, I. Non-destructive testing methods for condition monitoring: A review of techniques and tools / I. ul Hassan, K. Panduru, P. J. Walsh // Procedia Computer Science. – 2025. – Vol. 257. – P. 420–427.

96. Vagnoni, E. Dynamic behavior of a Francis turbine during voltage regulation in the electrical power system / E. Vagnoni, D. Valentin, F. Avellan // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 125. – P. 106474.

97. Valentín, D. Feasibility of Detecting Natural Frequencies of Hydraulic Turbines While in Operation, Using Strain Gauges / D. Valentín, A. Presas, M. Bossio, [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – No. 1.

98. Wan, Y. Data-driven diagnosis of sensor precision degradation in the presence of control / Y. Wan, H. Ye // *Journal of Process Control*. – 2012. – Vol. 22. – No. 1. – P. 26–40.

99. Wang, L. Study on the dynamic response behaviour of the head cover-bolts-stay ring of a variable-speed pump-turbine / L. Wang, Z. Wang, S. Yang, [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2854. – No. 1. – P. 012091.

100. Wang, Z. Research on the Flow-Induced Stress Characteristics of Head-Cover Bolts of a Pump-Turbine during Turbine Start-Up / Z. Wang, J. Yang, W. Wang, [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – No. 5.

101. Xue, S. Mechanism analysis of the abnormal head-cover vibration of an ultra-high-head pump-turbine operating in pump mode by CFD and FEM / S. Xue, H. Tian, Y. Cheng, [et al.] // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – 2024. – Vol. 18. – No. 1. – P. 2351949.

102. Yan, X. Preload Control Method of Threaded Fasteners: A Review / X. Yan, Z. Liu, M. Zheng, [et al.] // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 37. – No. 1. – P. 97.

103. Yu, S. Study on the dynamic characteristics of the head cover-bolts-stay ring of a variable-speed pump-turbine / S. Yu, L. Wang, Z. Wang, [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2854. – No. 1. – P. 012090.

104. **Yujra Rivas, E.** Deformation Monitoring Systems for Hydroturbine Head-Cover Fastening Bolts in Hydroelectric Power Plants / **E. Yujra Rivas**, A. Vyacheslavov, K. V. Gogolinskiy, K. Sapozhnikova, R. Taymanov // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, Issue 8. – Art. 2548. – 26 p. DOI: 10.3390/s25082548.

105. **Yujra Rivas, E.** Fault Detection in Axial Deformation Sensors for Hydraulic Turbine Head-Cover Fastening Bolts Using Analytical Redundancy / **E. Yujra Rivas**, A. Vyacheslavov, K. Gogolinskiy, K. Sapozhnikova, R. Taymanov // *Sensors*. – 2026. – Vol. 26, Issue 3. – Art. 801. – 26 p. DOI: 10.3390/s26030801.

106. Zadoks, R. I. An Investigation of the Self-loosening Behavior of Bolts Under Transverse Vibration / R. I. Zadoks, X. Yu // *Journal of Sound and Vibration*. – 1997. – Vol. 208. – No. 2. – P. 189–209.

107. Zhang X. Sensor Bias Fault Detection and Isolation in a Class of Nonlinear Uncertain Systems Using Adaptive Estimation / X. Zhang // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2011. – Vol. 56. – No. 5. – P. 1220–1226.
108. Zhang, X. Development of online validation and monitoring system for the thermal performance of nuclear power plant in service / X. Zhang, H. Zhang, J. Hou, [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 195. – P. 110173.
109. Zhao, Q. Failure analysis on the bolt connecting the head-cover and stay ring in pumped storage unit: Part I-Experimental study / Q. Zhao, Y. Luo, L. Zhai, [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol. 153. – P. 107557.
110. Zhao, Q. Numerical simulation on the dynamic behavior of the bolt connecting the head-cover and stay ring in pumped storage unit / Q. Zhao, Y. Luo, J. Cao, [et al.] // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 80. – P. 110210.
111. Zhao, W. Flow-Induced Dynamic Behavior of Head-Cover Bolts in a Prototype Pump-Turbine during Load Rejection / W. Zhao, X. Huang, M. Yang, [et al.] // Machines. – 2022. – Vol. 10. – No. 12.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов исследования в деятельность ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ
РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
(РОССТАНДАРТ)



ВНИИМ

им. Д.И. Менделеева

Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева»

Московский пр., д. 19, Санкт-Петербург, 190005
Тел.: (812) 251-76-01, факс: (812) 713-01-14
e-mail: info@vniim.ru | www.vniim.ru
ИНН 7809022120, КПП 783901001, ОКПО 02566450
ОГРН 1027810219007, ОКТМО 40305000000,
ОКОПФ 65241, ОКОГУ 1323565, ОКФС 12

Утверждаю

Заместитель генерального директора по
научной работе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.
Менделеева»

Ю.В. Чекирда

2026 г.



№ _____
на № _____ от _____

АКТ

о внедрении/использовании результатов кандидатской диссертации

Юхра Ривас Эдди

по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды»

Научно-технический совет ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» составил настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в научной деятельности Проблемной лаборатории метрологического обеспечения компьютеризированных датчиков и интеллектуальных измерительных систем ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

В рамках анализа массивов данных измерений деформации шпилек для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков были использованы следующие результаты соискателя:

- метод генерации аналитической избыточности путём комбинации эмпирических моделей и линейного фильтра Калмана для создания опорных моделей, оценивающих осевую деформацию крепежных шпилек;
- алгоритм обнаружения неисправностей и диагностики метрологической исправности датчиков, измеряющих осевую деформацию крепежных шпилек, на основе анализа характерных невязок неисправностей типа смещение, дрейф, деградация прецизионности и залипание.



Использование указанных результатов позволяет:

- повысить достоверность результатов измерений системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины и безопасность эксплуатации оборудования;
- обеспечить непрерывный мониторинг технического состояния датчиков, что позволяет своевременно принимать решения об их обслуживании.

Результаты работы Юхра Ривас Эдди особый интерес представляют для ГЭС, персонал которых работает вахтовым методом, например, в горах Кавказа.

Руководитель проблемной лаборатории
метрологического обеспечения
компьютеризированных датчиков и ИИС
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Р.Е. Тайманов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов исследования в учебный процесс Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II

Утверждаю

Проректор по образовательной деятельности,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II

к.т.н., доц., Петраков Д.Г.

» 2026 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Юхра Ривас Эдди

**на тему: «Обоснование метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины»,
по научной специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» в учебный процесс**

Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Результаты диссертационного исследования Юхра Ривас Эдди на тему «Обоснование метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Разработанные автором теоретические положения разработки методики обнаружения и диагностики неисправностей датчиков, включающие построение модели, критерии обнаружения неисправностей и диагностики метрологического состояния датчиков, используется в рамках дисциплин: "Теория обработки сигналов", "Информационно-измерительные системы" специальности 27.03.01 "Метрология и метрологическое обеспечение", а также "Автоматизированные системы измерений и контроля", "Теория обработки сигналов" специальности 12.03.01 "Приборы и методы контроля качества и диагностики" в рамках лекционных и практических занятий.

Декан механико-машиностроительного
факультета

В.В. Максаров

Зав. каф. метрологии, приборостроения и
управления качеством

А.С. Уманский

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024617174

**Программа для обнаружения и устранения выбросов в
больших данных измерений для датчиков перемещения**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Вячеславов Александр Валерьевич (RU), Юхра Эдди
Ривас (BO), Громыка Дмитрий Сергеевич (RU)*



Заявка № 2024614933

Дата поступления 13 марта 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 марта 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов