

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

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

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат химических наук

Вячеславов Александр Валерьевич

Официальные оппоненты:

Костин Владимир Николаевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория комплексных методов контроля, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией;

Соломенчук Павел Валентинович

кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «КОНСТАНТА», ведущий специалист.

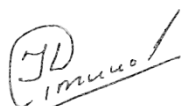
Ведущая организация – учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2026 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 1171**.

Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение надежности и безопасности гидроэлектростанций (ГЭС), включая гидроагрегаты, является приоритетной задачей электроэнергетики. Гидроагрегат (ГА) состоит из двух основных частей: генератора и гидравлической турбины (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 (рисунок 1).

Достоверность результатов измерений, получаемых от таких систем, традиционно обеспечивалась их периодической проверкой 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 крепеж-

ных шпилек, расположенных по ее периметру. В результате наблюдаются существенные различия в измеряемых значениях деформации шпилек (рисунок 2а), связанных с работой ГА на трех основных режимах: останов (1), холостое вращение (2) и генерация (3). Как показано на рисунке 2б, 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 исследований – процесс контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины, реализуемый с помощью многоканальной измерительной системы.

Предмет исследований – 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 неисправ-

ностей 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.), а также могут быть использованы в учебном процессе в Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II (акт внедрения от 08.06.2026 г.).

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» (г. Москва, 2023); VI, VII и VIII Международные форумы «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург, 2024–2026).

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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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 таблиц.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проанализированы режимы эксплуатации и источники нагрузок (механических и гидравлических) в радиально-осевых турбинах высокого давления. Определены напряжения и деформации в крышке гидротурбины и крепящих ее к опорному кольцу шпильках, а также выявлены факторы, влияющие на их деформацию. Рассмотрены методы и приборы контроля деформаций крышки и шпилек, показаны недостатки существующей системы контроля осевой деформации, снижающие достоверность измерений. Изучены современные подходы к обеспечению достоверности измерений; установлено, что в действующих системах не соблюдаются условия для контроля метрологической исправности. По итогам анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе обосновано применение принципа аналитической избыточности как основы для разработки метода обнаружения и диагностики неисправностей датчиков системы контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины. Обосновано построение опорных моделей на основе комбинации эмпирических моделей и линейного фильтра Калмана для формирования дополнительной информации (невязок) датчиков. Определена методология обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации на основе теоретического анализа характерных паттернов невязок.

В третьей главе для каждой крепежной шпильки выполнена оценка эмпирической модели на основе экспериментальных измерений осевой деформации и напора воды при работе ГА на полной нагрузке. К эмпирическим моделям применен фильтр Калмана, что позволило сформировать опорные модели для датчиков S1–S8. Валидация опорных моделей выполнена по критериям точности и робастности путем оценки отклика на выбросы, шум и изменение режима работы ГА. Проанализирован отклик опорных моделей на неисправности типов смещение, дрейф, деградация прецизионности и залипание. Интерпретация векторов невязок позволила установить критерии обнаружения, локализации, классификации и диагностики неисправностей датчиков. Разработанный алгоритм проверен путем внесения неисправностей в наборы данных осевой деформации шпилек.

В четвертой главе обсуждены полученные результаты, обосновывающие защищаемые положения, а также сформулированы рекомендации по интеграции предложенного метода в системах контроля на ГЭС. Также детализированы шаги по вводу в эксплуатацию и настройке разработанного алгоритма.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по диссертации.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Метод обеспечения достоверности результатов измерения системы контроля деформации крепежных шпилек основан на принципе аналитической избыточности. Данный принцип использует математические модели, описывающие динамику процесса, для формирования дополнительной информации (невязок между измеренным и оцененным значением), а также применяет методы анализа, позволяющие обнаруживать неисправности датчиков.

Анализ динамики деформации шпилек на различных режимах работы ГА – в зависимости от напора воды и выработки электроэнергии позволил сделать вывод, что необходимо разработать модель, оценивающую деформацию каждой шпильки. Каждая модель должна быть применима как в переходных, так и в установившихся процессах, а также при работе ГА на полной и частичной нагрузке.

Физико-математическая модель. На основе процесса измерения осевой деформации крепежных шпилек с помощью датчика линейных перемещений, и анализа силового взаимодействия между крышкой гидротурбины и шпилькой была разработана эквивалентная физико-математическая модель, представленная на рисунке 3. Применяя второй закон Ньютона, деформация шпильки (Y_2) связывается с деформацией крышки (Y_1), что приводит к уравнению (1) в комплексной области (s).

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

где m – масса штока и измерительного наконечника штока датчика, кг; k_2 – коэффициент жесткости пружины, кг/с²; b – коэффициент демпфирования амортизатора, кг/с. Наконечник штока датчика оказывает измерительную силу на калибровочный стержень, к массе m присоединены пружина и амортизатор, которые обеспечивают постоянный контакт между штоком и калибровочным стержнем.

Поскольку деформация шпильки (Y_2) вызвана гидростатическим давлением воды (F_H), которое изменяется в зависимости от напора воды, можно, используя закон Гука, связать деформацию

шпильки (Y_2) с изменением напора воды (H), получив уравнение (2) в комплексной области (s):

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

где A – площадь крышки гидротурбины, на которую действует сила гидростатического давления воды, m^2 ; ρ – плотность воды, kg/m^3 , g – ускорение силы тяжести, m/s^2 ; k_1 – коэффициент жесткости пружины, kg/c^2 , симулирующей сопротивление деформации шпильки.

Однако ребра жесткости крышки гидротурбины приводят к тому, что деформация каждой шпильки различна. Хотя уравнение (2) представляет собой общую модель динамики деформации шпилек, связать ее с конструктивными особенностями крышки сложно. Поэтому для каждой шпильки была оценена эмпирическая модель.

Эмпирическая модель. На основе экспериментальных данных о деформации шпилек и напоре воды, измеренных при работе ГА на полной нагрузке на режимах 2 (холостое вращение) и 3 (генерация), было оценено восемь эмпирических моделей (по одной для каждой контролируемой шпильки). Эти режимы были выбраны после анализа часов работы ГА, который показал, что преобладают режимы 2 и 3. Их математическая структура задается уравнением (3), которое основано на предыдущей физико-математической модели, описывающей динамику деформации с помощью передаточной функции второго порядка:

$$\frac{Y_{i(s)}}{H_{(s)}} = G_{i(s)} = \frac{Kp_i(s + Tz_i)}{(Tp1_i + s) * (Tp2_i + s)}; \quad i = 1, \dots, 8 \quad (3)$$

где $G_{i(s)}$ – передаточная функция, описывающая динамику деформации i -й шпильки; Kp , Tz , $Tp1$, $Tp2$ – параметры, характеризующие динамические свойства соответствующей шпильки при воздействии напора воды; i – обозначает конкретную модель для каждого датчика.

Значения параметров Kp , Tz , $Tp1$, $Tp2$, соответствующих каждой модели, представлены в таблице 1. Из-за возможных неточностей, вызванных шумом измерений, внешними помехами и дискретизацией, которые влияют на репрезентативность и качество набора данных, была количественно оценена неопределенность, связанная с каждой моделью с помощью аналитического метода (U_{AM}) и метода Монте-Карло (U_{MC}). Полученные значения составили менее 0,17 мкм

с уровнем доверия 95 % (таблица 1). Для проверки эмпирических моделей $G_{i(s)}$ систематическая погрешность ($Bias$) их прогнозов была оценена по формуле (4), что позволило определить, что модели занижают состояние деформации шпилек по сравнению с измеренными значениями (таблица 1).

$$Bias \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{x}_j - x_j) \quad (4)$$

где N – количество измерений, x_j – измеренное значение для j -го измерения, $\hat{x}_j$ – соответствующее прогнозируемое значение.

Кроме того, как показано на рисунке 4а, эмпирические модели $G_{i(s)}$ не воспроизводят должным образом динамику деформации шпилек в переходных процессах.

Точность оценки состояния деформации шпилек была улучшена путем применения линейного фильтра Калмана к представлению эмпирических моделей в их канонической управляемой форме второго порядка в дискретном времени, задаваемой уравнением (5):

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Fx_k + Gu_k + w_k \\ z_k &= Hx_k + v_k \end{aligned} \quad (5)$$

где x_{k+1} – вектор состояния системы в момент времени $k + 1$, x_k – вектор состояния системы в предыдущий момент времени k , u_k – вектор управляющего воздействия, z_k – вектор измерения величины, которая модель пытается оценить косвенно через состояние системы. Матрицы F , G , и H описывают динамику системы и связь между состоянием и измерением. Члены w_k и v_k соответствуют шуму процесса и шуму измерения.

Алгоритм фильтра Калмана работает в два этапа:

1. Прогноз: алгоритм вычисляет предварительную оценку состояния осевой деформации шпильки на основе динамической модели системы, включая соответствующую неопределенность (ковариацию) до получения текущего измерения.

2. Коррекция: как только становится доступным текущее измерение осевой деформации шпильки, предыдущий прогноз корректируется путем его объединения с измерением. Для этого вычисляется коэффициент усиления Калмана, который определяет, в какой

степени следует скорректировать прогноз в зависимости от неопределенности измерения и самого прогноза.

На рисунке 4б показано, что применение фильтра Калмана улучшает оценку деформации шпильки как в переходных, так и в установившихся процессах. Таким образом, комбинация эмпирических моделей (ЕМ) с применением линейного фильтра Калмана (ФК) позволяет получить опорные модели S1–S8 для формирования аналитической избыточности (рисунок 5). Оцененные значения ($Y_{\text{оцен}}$) соответствуют измеренным ($Y_{\text{изм}}$), что указывает на сильную положительную линейную корреляцию с коэффициентом Пирсона « r », близким к 1 (таблица 1 и рисунок 6).

Для валидации опорных моделей оценивались точность оценки состояния деформации шпилек и робастность моделей по отношению к влияющим факторам, таким как выбросы, шум измерений и работа ГА на полной и частичной нагрузке (70 % от номинальной нагрузки). Производительность оценки состояния осевой деформации опорных моделей была количественно оценена с помощью метрик точности (MAE) и чувствительности (S_A), определяемых формулами (6) и (7) соответственно:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |x_j - \hat{x}_j| \quad (6)$$

где N – количество измерений, x_j – измеряемое значение для j -го измерения, $\hat{x}_j$ – соответствующее оцененное значение.

$$S_A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{\hat{x}_j^{dev} - \hat{x}_j}{x_j^{dev} - x_j} \right| \quad (7)$$

где x_j – j -е измеряемое значение без отклонения, $\hat{x}_j$ – оценка модели для этого значения, x_j^{dev} – j -е измеряемое значение с отклонением, $\hat{x}_j^{dev}$ – оценка модели для этого значения с отклонением.

Из полученных результатов, отраженных в таблице 2, доказано, что максимальное значение метрики точности MAE составляет менее 1 мкм (что эквивалентно 10 % абсолютной погрешности измерения системы). Однако опорные модели S1–S8 не оценивают корректно осевую деформацию шпилек, когда ГА переходит в свой режим 1 (останов).

С другой стороны, значение метрики чувствительности S_A не превышает $1,00 \times 10^{-4}$, что свидетельствует о том, что опорные модели способны сохранять точность оценивания состояние деформации шпилек в условиях выбросов и шума измерений (таблица 2).

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.

Разработанный метод на основе принципа аналитической избыточности формирует дополнительную информацию для обнаружения неисправностей в датчиках, которые представляют собой потенциальную причину их отказа. Эта информация формируется путем вычисления вектора невязки, получаемого путем сравнения измеренных и оцененных значений (8):

$$r_j = x_j - \hat{x}_j \quad (8)$$

где r_j – вектор невязок, x_j – измеренное значение, $\hat{x}_j$ – соответствующее оцененное значение, j – номер измерения.

Для оценки отклика опорных моделей S1–S8 на неисправности и анализа поведения вектора невязок в измерения осевой деформации крепежных шпилек были введены значения, имитирующие функциональные неисправности (рисунок 7). Каждая неисправность была смоделирована математически: смещение – как постоянный сдвиг, дрейф – как линейное постепенное изменение (оба с величинами 10%, 25% и 50% от абсолютной погрешности измерения системы), деградация прецизионности – как возрастающая дисперсия (0,5; 1,0 и 1,5 мкм) и залипание – путем фиксации показаний датчика на значении в момент возникновения неисправности, игнорируя последующие изменения деформации.

Результаты векторов невязок, представленные на рисунке 8, показывают характерные паттерны для каждого типа неисправности.

В случаях смещения и дрейфа наблюдается, что величина неисправности компенсируется. То есть неисправность величиной 5 мкм (эквивалентно 50% абсолютной погрешности системы) формирует невязку $\approx 0,6$ мкм. В отличие от этого, при деградации прецизионности невязки не компенсируются. Что касается залипания, то значения невязок после неисправности колеблются случайным образом с низкой амплитудой.

Для разработки алгоритма обнаружения неисправностей и диагностики технического состояния датчиков осевой деформации была использована методология, включающая: обнаружение, локализацию, классификацию и диагностику. Было предложено использовать методы, основанные на анализе данных, такие как последовательные разности, наклон кривой и стандартное отклонение для обнаружения неисправностей, если значения невязок превышают заранее заданный предел. Локализация обнаруженной неисправности была достигнута путем сравнения векторов невязок датчиков, а также соотношений между изменениями напора воды и выработкой электрической мощности, что позволяет избежать ложных срабатываний. При классификации определялись величина, момент и тип возникшей неисправности. На основе установленных порогов контроля метрологической исправности датчиков проводится диагностирование: определяется, находится ли значение обнаруженной неисправности в допустимых пределах.

На основе анализа выработки электрической мощности, напора воды и векторов невязок для каждого датчика за 21 день эксплуатации ГА рекомендуется проводить обнаружение и диагностику в конце каждого дня.

Алгоритм был проверен путем анализа данных измерений электрической мощности, напора воды и осевой деформации. Разработанная схема алгоритма представлена на рисунке 9. В измерениях осевой деформации шпилек S1, S3, S5 и S7 были добавлены различные типы и величины неисправностей для подтверждения его корректной работы (рисунок 10). Результаты проверки подтверждают, что алгоритм обнаруживает неисправности типа смещение и дрейф величиной более 5 мкм, деградацию прецизионности при превышении среднеквадратическим отклонением (СКО) значения 0,3 мкм, а

также залипание, когда СКО ниже 0,1 мкм. На основе результатов были сформулированы рекомендации по интеграции метода в системах контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины на ГЭС.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **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.

2. **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.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. **Yujra Rivas, E.** Deformation Monitoring Systems for Hydro-turbine 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.

4. **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.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. 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.

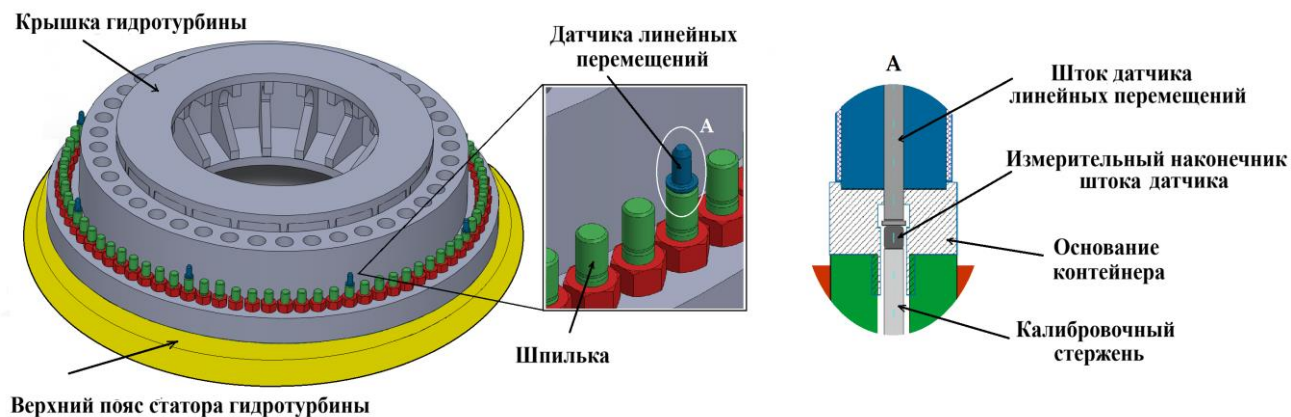


Рисунок 1 – Схема установки датчиков осевой деформации на крепежные шпильки крышки гидротурбины: А — внутренний вид установки датчика на шпильку

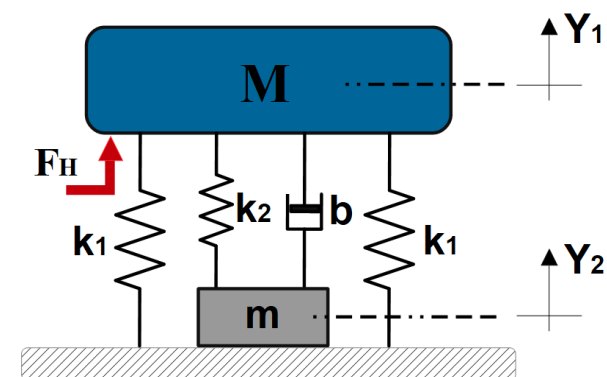


Рисунок 3 – Механическая модель процесса измерения осевой деформации крепежной шпильки

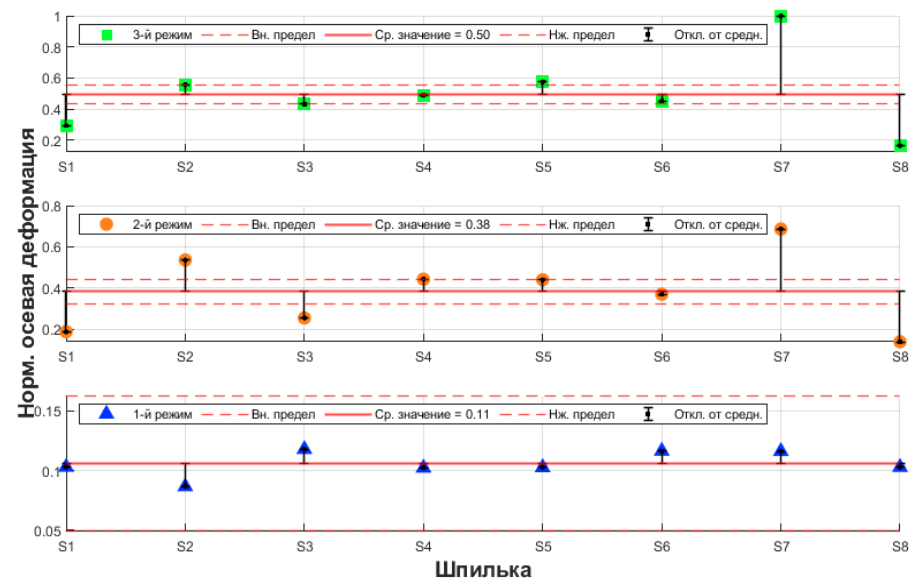
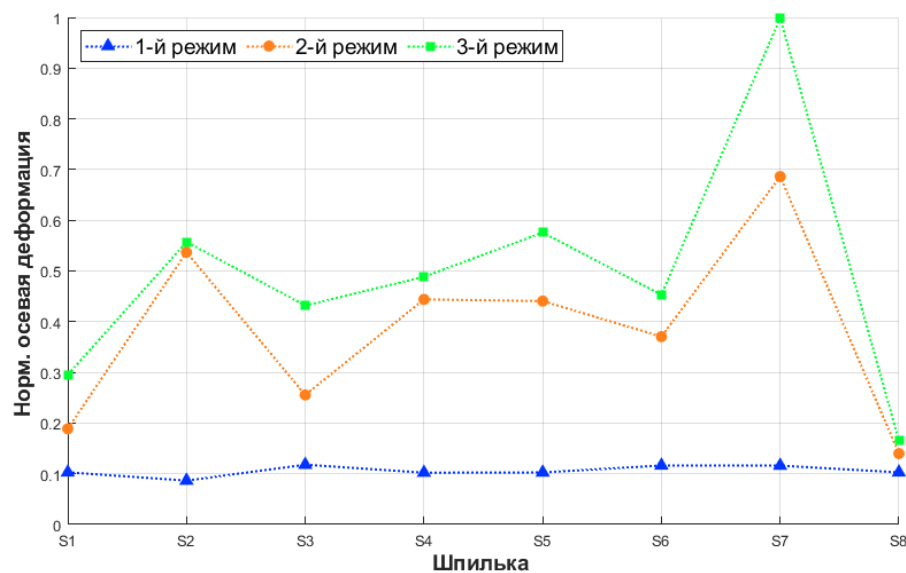


Рисунок 2 – Осевая деформация крепежных шпилек: а) деформация в зависимости от режима работы гидроагрегата; б) оценка функции метрологического самоконтроля на основе структурной избыточности

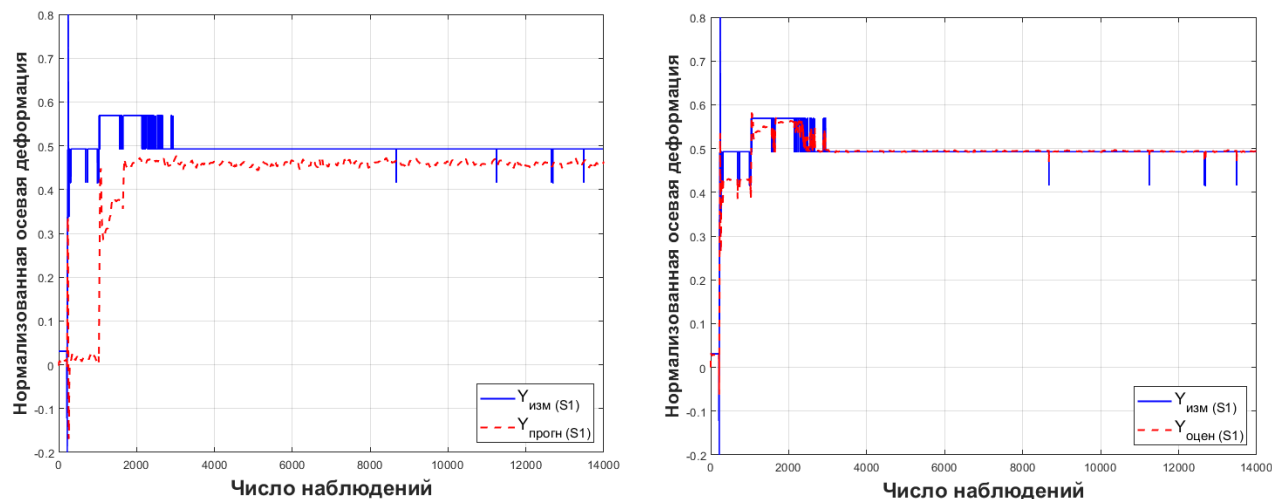


Рисунок 4 – Осевая деформация крепежной шпильки S1: а) прогнозная деформация по эмпирической модели (ЕМ); б) оцененная деформация по опорной модели (ЕМ + FK)

Таблица 1 – Результаты построения и верификации эмпирических и опорных моделей

Эмпирические модели								
Параметры	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
K_p	2,24	2,55	3,57	1,80	3,13	2,16	3,21	2,46
T_z	-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
Неопределенность ЕМ								
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
Систематическая погрешность ($Bias$) и коэффициент корреляции Пирсона (r)								
$Bias$ (ЕМ), мкм	-0,46	-0,62	-0,46	-0,16	-0,23	-0,56	-0,43	-0,42
$Bias$ (ЕМ+FK), мкм	-0,02	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	-0,03
r (ЕМ+FK)	0,96	0,94	0,97	0,97	0,97	0,96	0,97	0,98

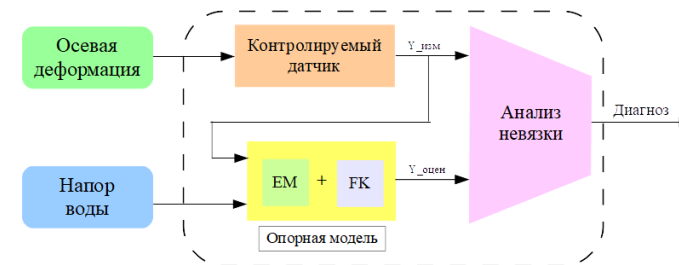


Рисунок 5 – Схема аналитической избыточности для обнаружения и диагностики неисправностей датчиков осевой деформации

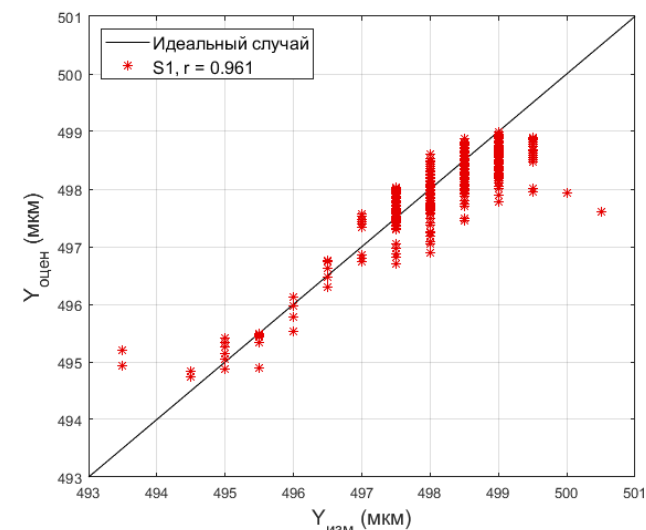


Рисунок 6 – Корреляция между измеренными ($Y_{изм}$) и оцененными ($Y_{оцен}$) значениями осевой деформации шпилек S1

Таблица 2 – Результаты метрик точности и робастности при валидации опорных моделей

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
Sa	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
при наличии шума измерений (уровень шума: $\sigma_1 = 1,5\sigma$; $\sigma_2 = 2,0\sigma$)								
MAE σ_1 , мкм	0,22	0,24	0,22	0,22	0,22	0,24	0,23	0,26
MAE σ_2 , мкм	0,27	0,28	0,27	0,27	0,26	0,28	0,28	0,30
*Sa	$2,57 \times 10^{-5}$	$2,57 \times 10^{-5}$	$2,42 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-5}$
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 σ_1 и σ_2

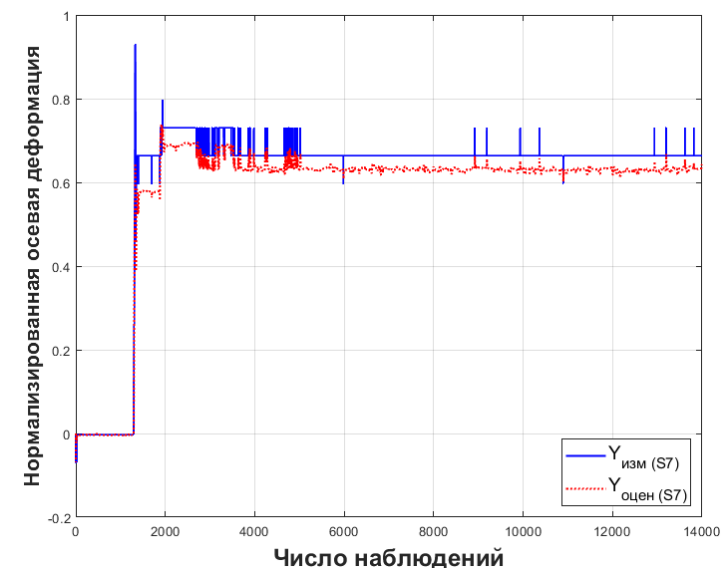


Рисунок 7 – Измеренные ($Y_{изм}$) и оцененными ($Y_{оцен}$) значения осевой деформации шпильки S7 при эксплуатации ГА на частичной нагрузке

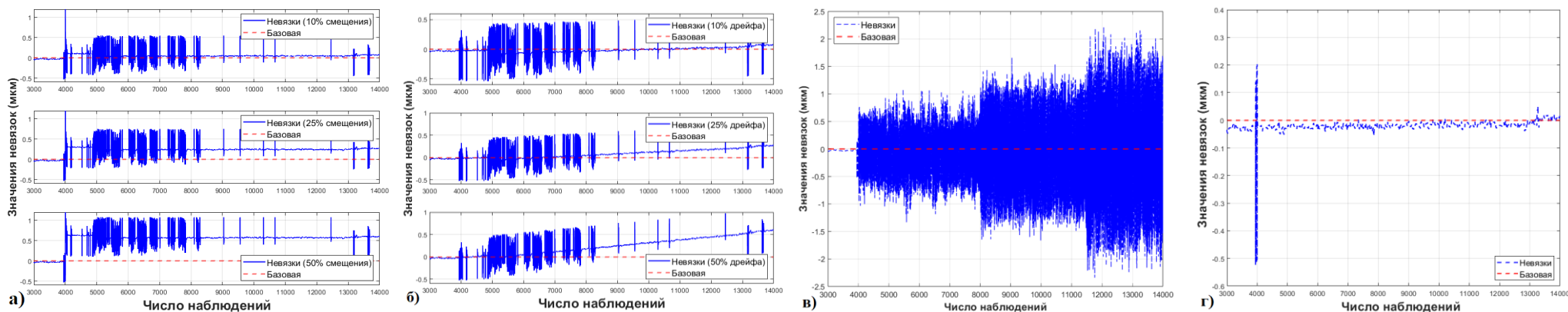


Рисунок 8 – Характерные паттерны невязок при неисправностях датчиков осевой деформации: а) смещение; б) дрейф; в) деградация прецизионности; г) залипание

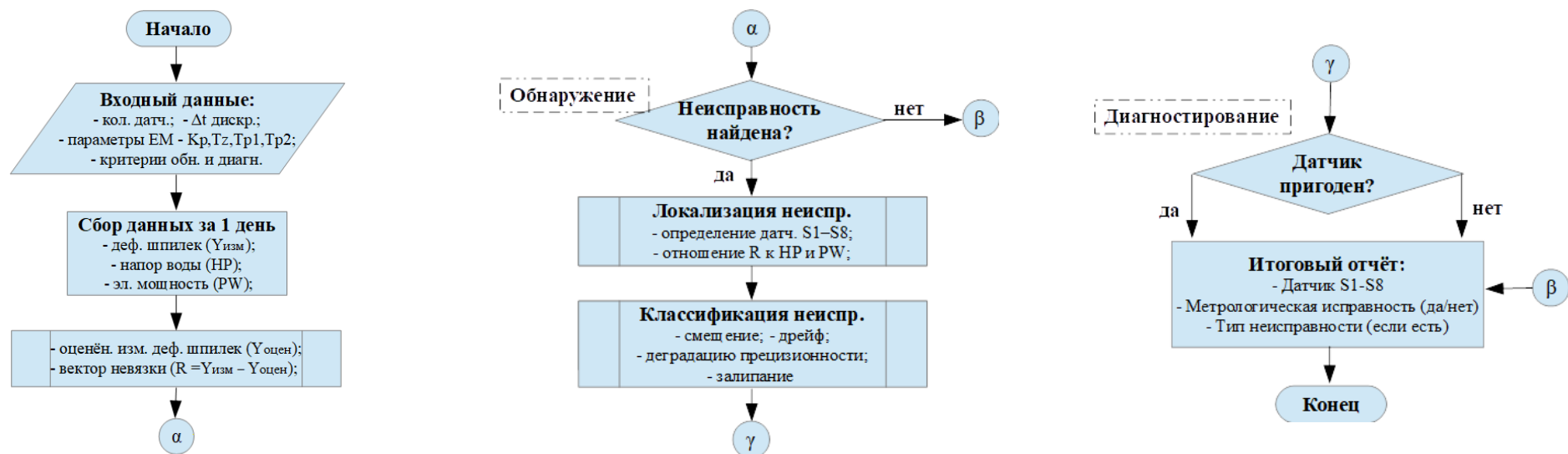


Рисунок 9 – Схема разработанного алгоритма обнаружения неисправностей и диагностики метрологической исправности датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины

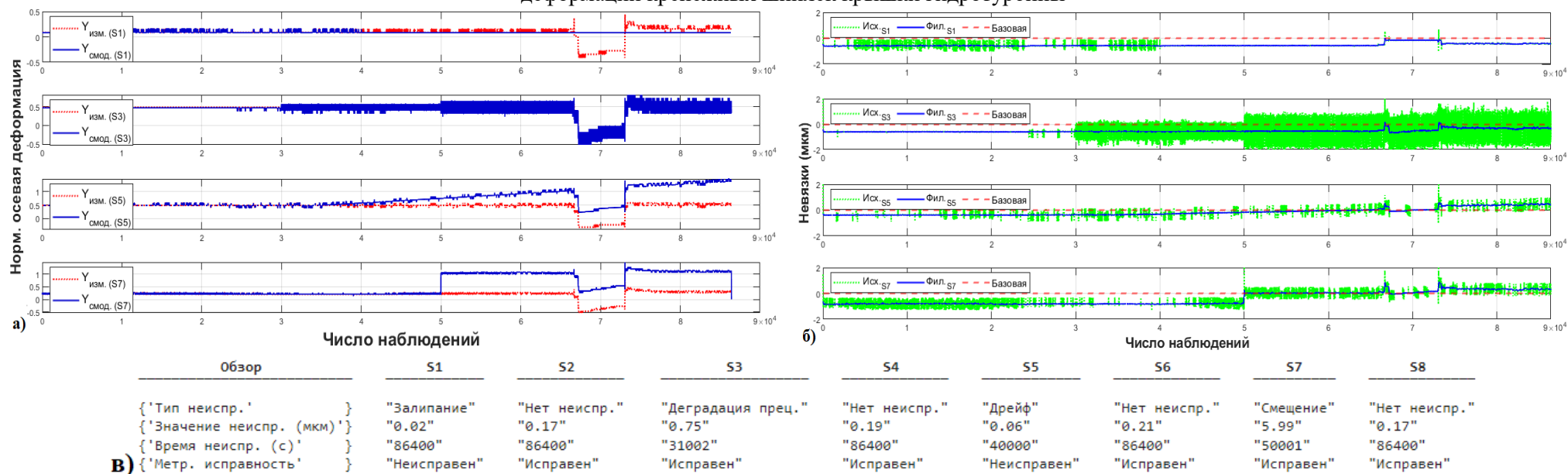


Рисунок 10 – Результаты проверки разработанного алгоритма: а) осевая деформация крепежных шпилек S1, S3, S5 и S7 при имитации неисправностей; б) полученные невязки; в) отчет об обнаружении неисправностей и диагностике технического состояния датчиков