

ОТЗЫВ

официального оппонента

главного научного сотрудника, заведующего лабораторией комплексных методов контроля Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, доктора технических наук Костина Владимира Николаевича на диссертацию Юхры Риваса Эдди на тему: «Обоснование метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

На отзыв представлены диссертация Юхра Ривас Эдди объемом 137 страниц машинописного текста и автореферат объемом 24 страницы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и трех приложений. В приложениях приведены акты внедрения результатов исследования и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Рассмотрение и анализ представленных материалов, а также опубликованных работ по теме диссертационного исследования позволили сформулировать следующие выводы.

Актуальность темы диссертации

Надежность и безопасность гидроагрегатов напрямую зависят от технического состояния крышки гидротурбины и крепежных шпилек, работающих в условиях переменных механических и гидродинамических нагрузок. Как обоснованно показано в работе, накопление повреждений в этих элементах может привести к аварийным последствиям, что делает контроль их осевой деформации критически важным.

Особую значимость проблеме придает необходимость обеспечения достоверности измерительной информации. Периодическая поверка датчиков затруднена из-за непрерывной эксплуатации гидроагрегата и сложности демонтажа; установленный межповерочный интервал составляет четыре года, что потенциально повышает риск несвоевременного обнаружения метрологической неисправности измерительных каналов. При этом существующие методы метрологического самоконтроля, основанные на

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-557 от 14.09.20
АУ УС

применении принципа структурной избыточности, в ряде случаев не обеспечивают необходимой достоверности результатов диагностирования датчиков, поскольку деформация шпилек по периметру крышки неодинакова вследствие конструктивных особенностей (наличия ребер жесткости).

В связи с этим задача автоматического обнаружения и классификации неисправностей датчиков без остановки агрегата и без их демонтажа является своевременной и практически востребованной.

Таким образом, **тема диссертационной работы** Юхры Риваса Эдди, направленная на повышение достоверности измерительной информации в системе непрерывного контроля ответственного элемента гидроагрегата в условиях длительной эксплуатации, **безусловно актуальна**.

Научная новизна диссертационной работы определяется разработкой способа автоматического обнаружения и выявления функциональных неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек на основе принципа аналитической избыточности.

В отличие от традиционного подхода к структурной избыточности (сопоставление показаний датчиков), автор обоснованно применяет аналитическую избыточность при контроле. Дополнительная информация формируется с использованием математических моделей динамики деформации крепежных шпилек. Это принципиально важно, так как конструкция крышки гидротурбины обуславливает индивидуальный характер деформации каждой шпильки, делая прямое сравнение показаний датчиков некорректным.

Новым является также комплексное использование эмпирических моделей деформации и фильтра Калмана для построения опорных моделей состояния (деформации) крепежных шпилек. Такое сочетание позволяет снизить систематическую погрешность прогнозирования до уровня в нескольких сотых микрометра, при коэффициентах корреляции с реальными данными 0,94–0,98.

Также следует отметить разработанную автором систему диагностических признаков и решающих правил, позволяющих не только обнаруживать отклонения в работе, но и локализовать неисправный датчик и классифицировать тип неисправности (смещение, дрейф, деградация прецизионности, залипание). При этом анализ невязок сопоставляется с режимными факторами работы гидроагрегата (напор воды, электрическая мощность), что снижает неоднозначность интерпретации сигналов. Количественные пороги обнаружения обоснованы и верифицированы на данных с имитированными неисправностями.

Таким образом, научная новизна диссертации заключается не в отдельном применении известных методов регрессионного моделирования или фильтра Калмана, а в их целенаправленном объединении с принципом аналитической избыточности применительно к конкретной измерительной системе, а также в разработке диагностической логики, учитывающей режимные факторы работы гидроагрегата.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность результатов обеспечивается логичной структурой исследования: от анализа объекта и методов измерения (глава 1) через теоретическое обоснование аналитической избыточности и методологию построения опорных моделей (глава 2) к экспериментальной валидации моделей (глава 3) и анализу работоспособности разработанного способа автоматического обнаружения и выявления функциональных неисправностей датчиков системы контроля осевой деформации крепежных шпилек на основе принципа аналитической избыточности (глава 4).

Положительной стороной является сочетание физического и компьютерного моделирования. Физико-математическая модель связывает деформацию шпильки с деформацией крышки и воздействием напора воды. Далее учитывается реальная неодинаковость деформации шпилек, обусловленная конструкцией крышки, и для каждого датчика строится индивидуальная опорная модель. Это обеспечивает связь теоретических предпосылок с реальными измерительными данными.

Качество моделей подтверждено количественными критериями: систематическая погрешность, средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент корреляции Пирсона и метрика чувствительности к возмущениям. По результатам валидации максимальные значения MAE для исследованных сценариев не превышают 1 мкм: при наличии выбросов - 0,07–0,18 мкм, при измерительном шуме - до 0,30 мкм, на частичной нагрузке 70 % - до 0,40 мкм. Метрика чувствительности к возмущениям не превышает $1,00 \times 10^{-4}$.

Обоснованность выводов усиливается за счет анализа как установившихся, так и переходных процессов, включая выбросы, шумы и изменения режима работы агрегата. При этом соискатель прямо указывает ограничение способа: при переходе гидроагрегата из холостого вращения в останов опорные модели не обеспечивают корректного оценивания динамики деформации шпилек. Такая открытость положительно характеризует критичность исследования.

Проверка диагностического алгоритма выполнена посредством математической имитации неисправностей в реальных наборах данных. Для датчиков S1, S3, S5 и S7 были смоделированы, соответственно, залипание, деградация прецизионности, дрейф и смещение. Алгоритм корректно идентифицировал внесенные типы неисправностей и сформировал диагностический отчет с указанием времени и типа неисправности.

Вместе с тем следует отметить, что достоверность разработанного алгоритма подтверждена для условий с имитацией неисправностей. Реальные неисправности датчиков в эксплуатационной системе в работе не представлены. Поэтому результаты следует трактовать как подтверждение работоспособности способа в воспроизведённых сценариях, а не как исчерпывающую оценку для всех возможных отказов.

В целом совокупность теоретических, расчётных и экспериментальных методов достаточна для обоснования научных положений в пределах заявленной области исследований. Выводы логически следуют из результатов и согласуются с поставленными задачами.

Научные результаты, их ценность

Основным научным результатом диссертации является способ автоматического обнаружения и диагностирования неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины. В процессе исследований автором были получены следующие результаты:

1) Установлена применимость аналитической избыточности. Автор показывает, что структурная избыточность в рассматриваемой системе ограничена неодинаковой деформацией шпилек, тогда как математические опорные модели позволяют формировать индивидуальную дополнительную информацию для каждого измерительного канала.

2) Разработаны физико-математическая и восемь эмпирических моделей динамики деформации, учитывающие индивидуальные характеристики каждой шпильки. Такой подход важен для измерительной техники, так как позволяет отказаться от предположения о тождественности каналов контроля.

3) Улучшены оценки состояния деформации крепежных шпилек посредством линейного фильтра Калмана. До его применения систематическая погрешность эмпирических моделей составляла от $-0,16$ до $-0,62$ мкм, тогда как после применения фильтра она уменьшилась до $-0,02$ мкм.

4) Верифицирована робастность моделей. Исследованы выбросы, измерительный шум и изменение режима работы гидроагрегата. Полученные

значения MAE показывают, что модели сохраняют приемлемую точность и устойчивость при исследованных возмущениях. Это существенно для практического использования метода в условиях реальной эксплуатации, где измерительные данные неизбежно содержат шум и отдельные аномальные значения (выбросы).

5) Выявлены характерные паттерны невязок при четырех типах неисправностей. Особенно важным является установление того, что смещение и дрейф частично компенсируются фильтром Калмана, поэтому их обнаружение зависит от величины отклонения, тогда как деградация прецизионности и залипание отражаются в невязках иначе. Такое разделение диагностических признаков составляет основу решающей логики алгоритма.

6) Разработан алгоритм автоматического обнаружения и диагностирования, включающий обнаружение факта неисправности, локализацию неисправного датчика, классификацию типа неисправности и диагностику метрологической исправности. Практическая ценность этого результата заключается в возможности выполнения диагностической процедуры без демонтажа датчиков и без остановки гидроагрегата.

Результаты диссертационного исследования в полной мере освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях в изданиях из Перечня ВАК и в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Кроме того, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы состоит в развитии способов обеспечения достоверности измерений через аналитическую избыточность в системах, где структурная избыточность ограничена конструктивными особенностями объекта. Методология показывает, как дополнительная информация формируется на основе математической модели без установки новых датчиков. Существенное значение имеет объединение эмпирических моделей и фильтра Калмана, что позволяет учитывать динамику деформации и получать диагностические невязки.

Практическая значимость определяется возможностью программной интеграции разработанного способа в существующую систему контроля без конструктивной модернизации измерительных средств как автономного программного модуля на сервере системы сбора данных либо на промышленном контроллере. Результаты диагностирования могут передаваться оператору,

сохраняться в архиве и использоваться системой технического обслуживания. В диссертации предусмотрены отдельные уровни сбора данных, обработки и представления результатов диагностирования.

Результаты исследования использованы для анализа массивов данных измерений деформации крепежных шпилек при обнаружении и диагностирования датчиков в Проблемной лаборатории метрологического обеспечения компьютеризированных датчиков и ИИС ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», что подтверждено актом внедрения от 06.05.2026 г.

Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанный способ целесообразно использовать как программное дополнение к многоканальным системам контроля осевой деформации крепежных шпилек крышек гидротурбин на ГЭС. Его применение представляется обоснованным для систем, в которых предусмотрено длительные непрерывные измерения и отсутствует возможность регулярного демонтажа датчиков для расширенной метрологической проверки.

При практической реализации необходимо учитывать положения диссертации об индивидуальности гидроагрегатов. Для каждого агрегата следует формировать собственный набор опорных моделей и определять собственные пороговые значения при обнаружении и диагностировании. Кроме того, представляется целесообразным использовать разработанный программный модуль в качестве дополнительного диагностического уровня, не подменяющего штатные процедуры поверки, технического обслуживания и контроля состояния агрегата. Информация о выявленной неисправности может использоваться для планирования проверки, замены или обслуживания соответствующего датчика.

Замечания и вопросы по работе

В целом диссертация производит положительное впечатление и является завершенным исследованием. Вместе с тем по результатам анализа текста диссертации и автореферата считаю необходимым сделать следующие замечания и сформулировать вопросы.

1. Верификация алгоритма выполнена на данных с математически смоделированными неисправностями, однако проверка на реальных эксплуатационных неисправностях отсутствует. В связи с этим возникает вопрос: как предполагается адаптировать установленные пороги и диагностические признаки к реальным неисправностям, параметры которых могут отличаться от смоделированных?

2. Исследование дрейфа ограничено линейной формой, тогда как в работе признается, что реальный дрейф может иметь экспоненциальный или переменный характер, для которого надежное обнаружение не гарантируется. Вопрос: возможно ли модифицировать систему признаков для выявления нелинейных форм дрейфа без существенного роста числа ложных срабатываний?

3. В работе показано, что максимальное значение MAE менее 1 мкм для исследованных сценариев, однако в ряде формулировок это значение приводится как обобщенная характеристика точности представленных решений. Следует уточнить, является ли это установленной границей ошибки для всех режимов или только результатом исследований в пределах рассмотренных условий.

4. Автореферат в целом достаточно полно отражает содержание диссертации, однако отдельные количественные результаты в нем приведены в сжатом виде. Для практического использования и оценки полученных результатов было бы полезно более явно отразить в автореферате ограничения способа, прежде всего невозможность корректного оценивания при переходе к режиму останова и ограничение по форме дрейфа. При этом основные результаты, структура исследования, методология, защищаемые положения и сведения о публикациях в автореферате представлены достаточно полно.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и относятся к перспективам дальнейших исследований, расширению области экспериментальной проверки и уточнению границ применимости результатов. Они не снижают общей положительной оценки диссертации и не ставят под сомнение обоснованность ее основных научных положений.

Заключение по диссертации

Диссертация Юхры Риваса Эдди «Обоснование метода автоматического обнаружения и диагностики неисправностей датчиков в системе контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой поставлена и решена актуальная научно-техническая задача повышения достоверности контроля деформации крепежных шпилек крышки гидротурбины при длительной непрерывной эксплуатации гидроагрегата.

По научному содержанию, глубине и полноте выполненных исследований, значимости и ценности полученных результатов, выводов и рекомендаций

диссертация соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Юхра Ривас Эдди**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией комплексных методов контроля ИФМ УрО РАН,
доктор технических наук

«02» сентября 2026 года



Костин Владимир Николаевич

Почтовый адрес: 620077, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18,

Телефон: +7 (343) 378-37-89

Адрес электронной почты: kostin@imp.uran.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.imp.uran.ru>

620077, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

Телефон/ факс: (343) 374-02-30 / (343) 374-52-44

Адрес электронной почты: physics@imp.uran.ru

Подпись В.Н. Костина заверяю
Ученый секретарь ИФМ УрО РАН
кандидат физ.-мат. наук



И.Ю. Арапова

2.09.2026