

ГУАП ОД	Документ зарегистрирован
	« 06 » 2026 г.
Вх. №	81-224/26

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Ушакова Михаила Витальевича

на диссертационную работу Епифанцева Кирилла Валерьевича «Модели и методы контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

### 1. Актуальность темы диссертационной работы

Основные принципы развития приборов для координатных измерений - координатно-измерительных машин, контурографов, профилометров и кругломеров в настоящее время трансформируются в методологию мультисенсорных измерительных приборов, которые могут суммировать несколько средств измерения в единый корпус с несколькими измерительными датчиками и преобразователями.

Методы работы мультисенсорных приборов сводятся к одновременному приёму нескольких входных потоков от разных датчиков, способных увеличить ширину отработанной информации и решить проблему наличия дорогостоящего оборудования за счет размещения нескольких приборов в одном корпусе. Однако, класс точности и методика поверки подобных приборов, имеющих несколько щупов в одном месте, остается под вопросом, так как по сути - это единый организм, который, однако, многие методики поверки призывают поочередно проверять, по отдельности, по сути разделяя этот комплексный организм на отдельно составляющие части. При этом не учитываются особенности того, что данный прибор все-таки - монолитная конструкция, принимающая одинаковое количество шумов и помех в пересчете на несколько сенсоров.

Одним из приоритетных направлений устойчивого развития современного двигателестроения и их безопасной работы является реализация НПТЛ (Национальных проектов технологического лидерства) в области автоматизации. Очевидно, что решение этих жизненно важных вопросов невозможно без соответствующих средств контроля, требующих как разработки новых методов, так и совершенствования имеющегося оборудования. Противоречие между требованиями национальных проектов технологического лидерства (НПТЛ) к снижению импортозависимости от зарубежных кругломеров, автоматизации измерений за счет машинного зрения, скорости калибровки кругломеров, и несовершенством существующих методов и средств контроля за счет полной импортозависимости, является противоречием, которое автор разрешает в процессе работы. В результате данного противоречия формируется научная проблема, связанная с разработкой отечественных приборов для контроля дефектов формы - кругломеров, способствующих повышению безопасной работы энергетических установок за счет оперативного обнаружения дефектов на ранней стадии. Ко всему вышесказанному нужно добавить, что большинство кругломеров - массивные, немобильные установки, которые сложно транспортировать к месту измерений. Т.е. автор в своем исследовании решает проблему мобильности прибора для контроля массивных рабочих органов в энергетике (турбины, поршни компрессорных установок, подшипниковые узлы).

**2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе**

Все положения и выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы, их достоверность подтверждаются полнотой анализа отечественных и зарубежных источников информации, характеризующих современное состояние в исследуемой предметной области; корректным применением математического аппарата и высокой степенью сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также широким спектром публикаций и выступлений как на 14 международных конференциях и форумах, так и на 10 всероссийских, проект был отмечен серебряными медалями на международной выставке «Хайтек-2023» и «Хайтек-2024».

### **3. Научная новизна и значимость результатов исследования, полученных автором**

1. Проведено теоретическое исследование и создана математическая модель нового компараторного элемента для передачи единицы биения кругломера, которая может быть использована в качестве образца сравнения-компараторного элемента к основному эталону с возможностью учета массогабаритных характеристик измеряемых деталей; новизна исследования и модели связана с тем, что они позволяют установить связь между массой пригрузов и компенсирующими математическими коэффициентами кругломеров.

2. Предложен теоретический подход для реализации методики компоновки измерительного оборудования, которое позволит повысить метрологическую надежность системы при контроле параметров деталей из различных материалов и обеспечит сходимость и воспроизводимость результатов измерений; новизна исследования и модели связана с тем, что они позволяют установить связь между массой пригрузов и компенсирующими математическими коэффициентами кругломеров. Новизна исследования и модели связана с тем, что предложен математический аппарат оценки надежности системы для выявления отказов системы, в частности - частоты отказов; подчеркивается важность точности измерения в зависимости от совместимости трех датчиков различного вида в одном корпусе.

3. Разработан метод автоматического управления процессом сканирования для информационно-измерительной системы, который способен обеспечить высокую скорость управления процессом измерения на ПК при снятии сигналов с вихретокового, емкостного и оптического преобразователя. Новизна исследования представленного метода связана с тем, что предложен комплексный алгоритм сбора информации с программных продуктов, включающих преобразование Бесселя и Гаусса в качестве основных характеристик повышения чувствительности и преобразования сигналов.

4. Разработана методика подготовки и проведения мультисенсорного контроля дефектов формы на основе предварительного сканирования деталей системами машинного зрения, которая позволяет использовать взаимодополняющие подходы поиска дефектов и учитывать форму, наименование детали, загрязненность, ее габаритные свойства. Новизна методики связана с тем, что предложена концепция мультисенсорного сканирования деталей в том числе методами машинного зрения, что позволяет на раннем этапе выявить дефекты детали – запыленность, наличие сколов и царапин и на основании этого ввести поправки в программу измерений.

5. Разработан универсальный метод для обеспечения возможности контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием для измерения магнитных, немагнитных и термопластичных материалов. Новизна исследования и модели связана с тем, что выявлены зависимости поправок

сканирования широкого спектра магнитных и немагнитных материалов, что позволяет определять вид материала и дефекты в поверхностном слое.

#### **4. Теоретическая и практическая ценность результатов работы**

Теоретическая значимость обусловлена:

1. Описанием концепции применения оптического, вихретокового и емкостного методов контроля позволяет повысить оперативность проводимого контроля, а разработанные приборы с применением мультисенсорной системы и машинного зрения позволяют создавать кругломеры, профилометры, контурографы с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками;
2. Теоретическим описанием метода контроля и разработка способа передачи единицы биения, характеризует контролируемый процесс измерения дефектов формы и профиля методом прямого расчета, что существенно повышает точность задания поправки на этапе калибровки оборудования, повышает достоверность контроля, а эталонная база может быть существенно расширена;
3. Созданием метрологически надежной схемы размещения датчиков в едином корпусе позволяет выполнить моделирование мобильных приборов контроля разного типа и по их результативности и оценить согласованность датчиков;
4. Описанием научных основ ПО, созданного для процессов снятия данных с мультисенсорного щупа на основе рядов Бесселя, обеспечивает визуализацию и оперативное исследование процесса формирования дефектов на материалах различной формы магнитных и немагнитных материалах, что создает теоретические и практические предпосылки для создания приборов нового поколения, обладающих как свойствами измерительного прибора для профиля, так и дефектоскопа.

#### **Практическая значимость диссертации состоит в следующем:**

- 1) Математическое описание нового метода передачи единицы-применение образца сравнения для отслеживания биения кругломера уменьшает погрешность его косвенного измерения и осевого и радиального биения на 10%.
- 2) Разработанная методика бесконтактного оптического лазерного датчика позволяет ускорить контроль партии деталей на 15%, при этом возможно использование двух систем оптического сканирования: He-Ne на волне 630 нм, а на GaAs на волне 650 нм.
- 3) Разработанный метод измерения обеспечивает точность сканирования в диапазоне  $\pm 0,01$  мм и сканирование поверхностного слоя деталей до 50 мкм, что обеспечивает суммарный эффект от прибора - возможно произвести не только измерение круглости и цилиндричности, но и проанализировать характер дефектов покрытия детали, получить данные по свойствам материала.
- 4) Полученные зависимости погрешности от режимов обработки информации способствуют улучшению обработки сигналов в диапазоне 100-150 МГц, что обеспечивает применение широкой линейки отечественных приборов (осциллографов, частотомеров, LCR-метров) для снятия данных.
- 5) Разработанный метод подготовки и проведения измерения дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным лазерно-емкостно-вихретоковым методом экономит до 25% стоимости от оборудования иностранного производства и обеспечивает суммарный эффект для снятия как размерных дефектов, так и определения дефектов покрытия за счет применения метода машинного зрения, который позволяет анализировать такие параметры детали, как загрязненность, наличие сколов.

б) Разработанная линейка мобильных приборов по представленной в диссертации концепции позволит существенно расширить применение универсальных кругломеров-дефектоскопов, на магнитных и немагнитных материалах, а также на пластиковых деталях, раскрывать микротрещины до от 0,1 до 0,01 мм при оценке качества материала, что превосходит показатели современных приборов.

7) Процесс производства корпусных элементов бесконтактных датчиков в совмещенном корпусе позволит отечественному приборостроению быть конкурентоспособным на мировом рынке оборудования за счет ускорения скорости калибровки на 18%.

Основные результаты диссертационной работы получены в ходе выполнения грантов:

1. «Разработка и тестирование программного обеспечения «ЕСО-365» и «BOTSCAN» для бесконтактных измерений», субсидия конкурса Грантов для молодых кандидатов наук вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2021 г.), руководитель.

2. Госзадание РЗ 800000Ф.99.1.БВ01АА00001, Паспорт № 2776-21 (2021г.-2022г) «Методическое сопровождение внедрения образовательных программ по компетенциям "Ворлдскиллс" в образовательную деятельность организаций высшего образования в компетенции «Цифровая метрология», исполнитель

3. Премия Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся достижения в области высшего образования и среднего профессионального образования 2025 года по методическому обеспечению проекта «Методы комплексной подготовки специалистов для метрологического обеспечения импортозамещающих технологий», 2025 год.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения и использования в следующих предприятиях: ООО «Промразвитие», ООО «Димес», ФГУП «Российский институт стандартизации», ООО «Измерительные решения», АО НИИ «Масштаб», самарский филиал ФГБУН «Физического института им. П.Н. Лебедева РАН», ФГБУ «Российский институт стандартизации», ЗАО НПФ «УРАН», АО «КБХА» ГК Роскосмос, ООО «Навигатор» что подтверждено актами внедрения.

## **5. Публикации по теме диссертационной работы**

Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в Результаты диссертационной работы опубликованы в 98 печатных изданиях, в том числе: 33 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий по специальности 2.2.8, из них 22 – без соавторов; 4 статьи – в изданиях, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 5 свидетельств о регистрации государственной программы для ЭВМ, 3 учебных издания, 2 монографии, 49 публикаций в прочих журналах и сборниках трудов конференций и международных форумов.

## **6. Общая оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка используемой литературы и нескольких приложений. Полный объем диссертации с учетом приложений составляет 360 страницы, включая 202 рисунка и 35 таблиц (без

учета рисунков и таблиц в приложениях). Список использованной литературы содержит 195 наименований. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, экспериментальные исследования проведены при участии и под его непосредственным руководством.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, показана степень проработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и адаптации результатов работы, ее структура и научные положения, выносимые на защиту. Установлена актуальность темы исследований, обозначена научная проблема, связанная с низкими темпами импортозамещения приборов для измерения дефектов формы. Доказана важность в направлении возможного решения научной проблемы

Во втором разделе выполнен анализ современного состояния и практического опыта использования приборов для измерения дефектов геометрии, исследована и разработана математическая модель передачи единицы биения кругломера, которая может быть использована в качестве образца сравнения-компараторного элемента к основному эталону (ОМОК-1) и учитывает массогабаритные характеристики деталей, повышает точность измерения, что позволяет суммарно уменьшить время на калибровку кругломера, учесть новый метод передачи единицы биения при разработке мультисенсорных приборов.

В третьем разделе описан теоретический подход для реализации методики компоновки измерительного оборудования позволяет повысить метрологическую надежность, что в отличие от известных методик, позволяет контролировать параметры деталей из различных материалов, и обеспечивает сходимости и воспроизводимости измерений, которая позволяет ускорить контроль партии деталей и повысить точность измерения. В положении теоретически обоснованы технические и методические решения по созданию оптических цифровых приборов, которые могут быть использованы для измерения дефектов формы и шероховатости при этом не теряя метрологической надежности в различных условиях эксплуатации. В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры СИ претерпевают изменения. Эти изменения приводят к отказам, т.е. к невозможности СИ выполнять свои функции.

В четвертом разделе описан разработанный метод автоматического управления процессом сканирования для информационно-измерительной системы, который способен обеспечить высокую скорость управления процессом измерения на ПК, обеспечить точное, взаимно дополняемое снятие сигналов с вихретокового, емкостного и оптического преобразователя.

В пятом разделе представлена разработанная методика подготовки и проведения мультисенсорного контроля дефектов формы на основе предварительного сканирования деталей системами машинного зрения, которая позволяет использовать взаимодополняющие подходы поиска дефектов, выполняет роль системы помощи принятия решений метрологу, определяет наименование детали, загрязненность, ее габаритные свойства, идентифицирует характерные дефекты деталей подобного вида из серии предыдущих измерений. Каждый из представленных в разделе сенсоров способен детектировать определенную характеристику. Для реализации данного алгоритма был разработан программный продукт, написанный на языке Python. Данный программный продукт был задействован непосредственно на производстве как отдельно от кругломера, так и совместно с ним. Разработанная программа – нейросеть,

представляет из себя приложение для измерения размеров объекта из прямого видеопотока на определенной дистанции.

В шестом разделе представлен универсальный метод для обеспечения возможности контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием обеспечивает измерение магнитных, немагнитных и термопластичных материалов на разной длине волны, который позволяет расширить область номенклатуры контролируемых материалов

Содержание и структура диссертации Епифанцева К.В. логически взаимосвязаны и соответствуют сформулированной цели исследования. Выдвигаемые в диссертационной работе научные положения, а также сформированные выводы и предложения, как результаты исследования, обладают научной новизной. Текст диссертационной работы оформлен аккуратно, в соответствии с требованиями ГОСТ. Список использованных литературных источников оформлен также в соответствии с требованиями ГОСТ.

Изложение материала относительно легко читается, но перегружено сокращениями, что требует определенного привыкания к пониманию текста. Каждое приводимое утверждение логически вытекает из предыдущего, поэтому легко воспринимается, а необходимые уточняющие или подтверждающие материалы вынесены в приложения и не перегружают основной текст.

Результаты работы могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля дефектов формы тел вращения-подшипников, валов, передаточных муфт.

Автореферат диссертации правильно и в полной мере передает основное содержание работы.

## **7. Замечания по диссертационной работе**

Наряду с отмеченными положительными сторонами, диссертационная работа Епифанцева Кирилла Валерьевича не лишена недостатков:

1. Автор на стр. 143 использует параметр  $\lambda$ . Однако, как рассчитывался этот параметр и что он означает в диссертации никак не определено. Кроме того, для расчета его зависимости от температуры используется очень большой интервал по температуре, в результате чего зависимость представлена ломаной линией. Непонятно, что мешало автору взять меньший интервал по температуре, в результате чего ломаная линия превратилась бы в плавную кривую.

2. В тексте самой работы приводятся результаты экспериментального исследования компараторного элемента в дополнение к эталону ОМОК-1 относительно только одного кругломеров Mityojo и Mahr. По моему мнению, следовало бы привести анализ положительного эффекта технической реализации по сравнению с серийными кругломерами других производителей.

3. В Приложениях к диссертации имеется достаточно большое количество графиков по корреляционному анализу, однако нет никаких пояснений, как это способствует

улучшению измерений, повышает точность. В автореферате диссертации приведен текст программы, хотя обычно текст программы дается в Приложении к диссертации. В формуле 3 на стр. 16 автореферата присутствуют при расшифровке составляющих множителей формулы квадратные скобки (единичные орты, входной вектор). Данные скобки несут какую-либо смысловую нагрузку, или это техническая ошибка?

4. Методы и средства диссертации представляются вполне научно обоснованными, однако, некоторое опасение вызывает степень предсказуемости и надёжности действия нейронных сетей при решении метрологических задач. Следует отметить, что диссертация в некоторых частях разделов излишне сжата; в частности, обзор текущего состояния кругломеров очень краток, не везде хватает ссылок на литературные источники, это затрудняет объективную оценку. Также имеют место быть стилистические неточности и необычная терминология, например фотодетектор ПЗС почему то фигурирует как «PZS» (международная англоязычная аббревиатура CCD) и т.п., а предполагаемая к применению при выполнении исследования ПЗС линейка K1200ЦЛ1 – весьма архаичное средство, даже её разработчик (НИИ «Пульсар») предлагает теперь приборы с лучшими характеристиками, в том числе и с точки зрения применений при метрологии.

5. Автором в автореферате представлена следующая фраза: «...уравнения мультисенсорной системы в рамках повышения чувствительности имеют степень  $f$ , которая обозначает многократное увеличения чувствительности построеного резистора, к примеру, который дает увеличение частоты работы лазера, или управляет разверткой осциллографа, расширяет возможность измерения диапазонов в вольтметрах. При этом, важным дополнением формулы мультисенсорных измерительных систем является также вопрос определения классов точности.» Каким же образом определяется класс точности мультисенсорного прибора, отличается ли данная процедура от стандартной методики ГОСТ 8.401-80 ?

## **8. Выводы и заключение**

В целом, подводя итог изложенному, считаю, что диссертация Елифанцева К.В. «Модели и методы контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, обладающее научной новизной и имеет теоретическую и практическую значимость.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки) и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор – Елифанцев Кирилл Валерьевич – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

По совокупности полученных в работе результатов можно сделать вывод о решении важной проблемы, имеющей как научное, так и практическое значение – оптимизации процесса бесконтактного сканирования, в том числе за счет обеспечения применения триплексного синергетического комплексного щупа, самокомпенсированного за счет применения разностных преобразователей оптико-

емкостно-вихретокового типа, путем дораработки и внедрения программных фильтров Гаусса и Бесселя и метода контроля, характеризующегося высокой достоверностью и позволяющего создавать и внедрять системы контроля процессов изготовления изделий вращения с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Все вышеперечисленное даёт основание считать, что представленная диссертационная работа Епифанцева К.В., несмотря на отдельные замечания непринципиального характера и рекомендации, соответствует требованиям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года, №842, соответствует специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды». Автор работы, Епифанцев Кирилл Валерьевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,   
профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы» ТулГУ,  
Ушаков Михаил Витальевич

Подпись М.В.Ушакова заверяю \_\_\_\_\_

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»  
почтовый адрес: 300012, Тульская область, г. Тула, проспект Ленина, д. 92  
телефон: +7 (4872) 35-21-55

