

На правах рукописи



**ЕПИФАНЦЕВ Кирилл Валерьевич**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ФОРМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
ВРАЩЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМ МУЛЬТИСЕНСОРНЫМ  
СКАНИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики  
материалов, изделий, веществ и природной среды (технические  
науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2025

**Работа выполнена** на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

**Научный консультант:** **Фролова Елена Александровна**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Комшин Александр Сергеевич,**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Метрология и взаимозаменяемость» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»;

**Захаров Олег Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий и обработки ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»;

**Минаев Владимир Леонидович,**  
доктор технических наук, начальник научно-исследовательского отделения голографии, оптической томографии, нанотехнологий и наноматериалов ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений».

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», 173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41.

Защита состоится «23» декабря 2025 г., в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета [http://dissov.guap.ru/defense/epifancev\\_kv](http://dissov.guap.ru/defense/epifancev_kv)

Автореферат разослан «10» октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.384.02,  
кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В рамках национальных проектов технологического лидерства «Средства производства и автоматизация» и «Новые атомные и энергетические технологии» необходимо произвести обновление основных фондов оборудования и стандартов, повысить производительность труда, развивать аддитивные технологии и робототехнику. Все эти перечисленные элементы невозможны без создания высокоточного измерительного оборудования. Рядом государственных документов подтверждается важность разработки и внедрения отечественных приборов в промышленность (Стратегия экономической безопасности Российской Федерации до 2030 г., Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», Постановление Правительства РФ от 16 сентября 2016 г. № 925 «О приоритете товаров российского происхождения, работ, услуг, выполняемых, оказываемых российскими лицами, по отношению к товарам, происходящим из иностранного государства», Приказ Минпромторга России от 02.08.2021 N 2918 (ред. от 07.07.2023) "Об утверждении Плана мероприятий по импортозамещению в отрасли радиоэлектронной промышленности Российской Федерации до 2024 года" и др.) и выступлениями Президента России. В настоящее время для производства изделий авиационной и космической отрасли стоит важная задача развития парка отечественного измерительного оборудования для контроля тел вращения, в частности – для контроля подшипниковых узлов, которые составляют значительную часть при производстве турбин, насосного и компрессорного оборудования. Таким образом, актуальность работы заключается в необходимости разработки универсального метода мультисенсорного контроля тел вращения за счет расширения номенклатуры измеряемых материалов, уменьшения длительности контроля, увеличения скорости, точности и автоматизации процессов и создания новой импортозамещенной линейки приборов.

Текущие параметры работы оборудования не могут обеспечить быструю калибровку из-за устаревшей эталонной базы, а сам контактный щуп является очень ненадежным средством снятия размеров, что вступает в противоречие с обозначенной выше стратегией увеличения скорости и роста числа качественных оперативных геометрических измерений на серийном производстве. В соответствии с вышеизложенным возникает важная научная проблема разработки и внедрения мультисенсорного (оптического, емкостного, вихретокового) метода контроля), характеризующегося высокой достоверностью по отношению к существующим методам и позволяющего создавать и внедрять системы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

В ряде перспективных исследований рассматривается вопрос создания нового типа приборов для измерения круглости с учетом современных типов шпинделей, что несомненно влияет на качество измерений и подчеркивает актуальность данных измерительных приборов при измерении качества геометрии. В частности, подчеркивается важность ухода от предварительного центрирования прибора, представлен точный метод измерений на кругломерах без предварительного центрирования профилей поперечных сечений. Важным фактором данного метода является существенная экономия времени на процессы юстировки прибора и подготовки к измерению дефектов формы.

В настоящее время использование цифровых измерительных установок позволяет измерять широкий спектр параметров связанных с измерением дефектов формы, шероховатости поверхности, контура. Важным аспектом является наличие большого количества погрешностей, не учтенных в инструкциях производителей, а также во многом не принимаемых во внимание операторами измерительных установок. Во многом это происходит из-за отсутствия глубоких исследований возможностей оборудования, в частности - принципов и зависимостей калибровки измерительных щупов, принятия коэффициентов компенсации, автоматического введения поправок. В процессе эксплуатации оборудования происходят существенные измерения в настройках системы из-за вибраций, возникающих на проезжей части, меняющейся влажности в лаборатории, перепадов температуры, запыленности, периодической установки деталей разных

марок стали, различных степеней очистки деталей, следов коррозии, а также образования микронаклепа на поверхности измерительных щупов, истирания щупов, химико-механических изменений свойств за счет взаимодействия со сплавами других металлов.

Существующие методы кругломеров действующего типа обусловлены недостатками: порча и царапины на измеряемой поверхности при контактом щупе, длительный процесс юстировки, сколы щупа, ГОСТы по эталонам устарели (ГОСТ 8.481—82 Кругломеры. Методы и средства поверки) Действующим видами эталонов невозможно провести калибровку и поверку мультисенсорных приборов. Для измерения формы и дефектов поверхностного слоя одновременно не существует методов совмещенной работы в одном приборе. В соответствии с вышеизложенным возникает важная **научная проблема** разработки и внедрения компактного мобильного прибора с импортозамещенным, мультисенсорным (оптическим, вихретоковым, емкостным) методом контроля, имеющим сокращённые методики калибровки, характеризующегося универсальностью к измеряемым материалам по отношению к существующим приборам и имеющим систему помощи в принятии решений для метролога - систему искусственного интеллекта. Для решения этой проблемы необходимо разработать модели и методы перехода от моносенсорных приборов к мультисенсорным приборам в условиях жестких ограничений импортозамещения.

В современных типах приборов с щуповым рабочим органом, преобразующим колебания щупа с помощью ряда усилителей в электрические колебания, поступающие в систему управления и отградуированные в микрометры. С помощью ПО FormTracePak круглограмма выводится на экран. Однако, у кругломеров подобного типа есть ряд недостатков, обусловленных контактным взаимодействием – истирание иглы, низкая скорость проведения измерения, порча и царапины на измеряемой поверхности (при серии измерений более 100 опытных точек сбора), при этом контактное усилие на щупе – до 0,001 Н. Однако оптические методы сканирования также имеют ряд проблем, такие как – зависимость от освещения, волновые помехи, запыленность детали и помещения. Возможно наличие оптического искажения при оценке результатов измерения. В частности, к улучшению приводит факт определения координат точки на сканируемом объекте с субпиксельной точностью. Однако, возможность нахождения ошибочных соответствий, радиопомехи, радиальная дисторсия объектива, погрешности калибровки и неточность фокусировки приводят к ухудшению полученного результата.

Таким образом, важность поиска компромиссного решения между оптическим и контактным методом для измерения объемной детали, являющейся телом вращения или несимметричным телом, актуальны. Использование одновременно и оптического, и контактного метода обладает большей точностью и скоростью измерения, но, между тем, нуждается в больших финансовых инвестициях в момент производства прототипа прибора.

Новые технические и технологические возможности современной метрологии базируются на инновационных методах и средствах сбора и компьютерной обработки пространственных данных, выделяя новую область метрологии – координатную метрологию и цифровую метрологию.

**Степень разработанности темы исследований.** Диссертационное исследование выполнено на основе систематизированного обобщения вопроса контроля и диагностики дефектов формы конструкционных сталей и дюралюминиевых сплавов в рамках разработанного универсального оптического метода контроля. При этом отдельным направлениям, относящимся к рассматриваемой научной проблеме, посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых. Приборы для измерения шероховатости и дефектов формы поверхностей – одно из приоритетных направлений в метрологии, особенно в последнее время с учетом новых возможностей развития измерительной и вычислительной техники, координатной метрологии, возрастания количества изделий-тел вращения (валов, кинематических звеньев, подшипниковых и узлов, и зубчатых передач). Методы метрологического обеспечения процесса контроля качества изделий высокоскоростных объектов, основывающихся на передаточном моменте от двигателя к лопастным или турбинным элементам, невозможно обеспечить без

приборов контроля формы и шероховатости. Ведущими специалистами в области измерений неоднократно подчеркивалось преобладание координатных измерений над основными линейными измерениями. Значительный вклад в развитие теории и методов координатных измерений внесли : Телешевский В.И., Лысенко В.Г., Демкина В.Н., Глухов В.И., Сергеев С.А., Никольский А.А., Ю.В.Чугуй, Королев В. В., Заякин О.А., Чирков А.П., Манухин А.В., Ямбаев Х. К., Четвернин М.Ю., В.С.Соболев и Г.А. Кашеева, Р.О.Сироткин, В.Н.Белопухов, С.Ю.Боровик, М.М.Кутейникова, П.Е.Подлипнов, Ю.Н.Секисов, О.П.Скобелев, О.А.Заякин. Однако, не был рассмотрен вопрос применения вихретоково-оптически-емкостных методов кластерного типа, не учтено влияние массово-габаритно-марочных свойств материалов. Развитие обработки результатов измерений методами бесконтактных оптических машин и рассмотрены в научных трудах А.А.Игнатъева, Захарова О.В., Бржозовского Б.М., В.М. Белопухова, В.К. Осташовой, Кожеватова И. Е., Куликова Е. Х., Черагина Н. П., Шемагина В. А., Кретинина О. В., Леуна Е. В., Скобелева О.П. Но не решена проблема возможности использования датчиков метрологически надежного типа.

Развитие обработки результатов измерений методами бесконтактных оптических машин и рассмотрены в научных трудах Захарова О.В., Минаева В.Л., Бржозовского Б.М., В.М. Белопухова, В.К. Осташовой, Кожеватова И. Е., Куликова Е. Х., Черагина Н. П., Шемагина В. А., Кретинина О. В., Леуна Е. В., Пронякина В.И., Скобелева О.П., но была не решена проблема возможности использования датчиков мультисенсорного типа. По диагностике деталей с помощью оптических сканеров работы опубликованы зарубежными авторами Zhang, W., Han, Z., Li, Y., Zheng, H., Cheng, X., Rader C., Spragg R.C. Но использованные методы зарубежных ученых акцентируются на создании только 3D-сканеров и микроскопов, обладающих значительными массово-габаритными характеристиками, также в настоящее время покупка зарубежных типов оборудования осложнена санкционной политикой.

По достоинству оценивая высокую значимость трудов перечисленных ученых и отмечая наличие разработанных методов решения отдельных научных теоретических и прикладных задач можно сделать вывод о том, что существует **противоречие** между **требованиями национальных проектов технологического лидерства (НПТЛ) к снижению импортозависимости от зарубежных кругломеров, автоматизации измерений за счет машинного зрения, скорости калибровки кругломеров, мобильности и универсальности применительно к сканированию различных материалов, и несовершенством существующих методов и средств контроля за счет полной импортозависимости, низкой скорости калибровки кругломеров и как следствие – уменьшения производительности при последующем контроле деталей, массивности конструкций кругломеров, невозможности проведения оценки дефектов поверхностного слоя деталей из различных материалов.**

Разрешение этого противоречия может быть достигнуто путем применения бесконтактных методов мультисенсорного сканирования и создания калибровочных устройств нового типа, позволяющих укоротить процесс калибровки прибора, повысить мобильность прибора, его метрологическую надежность и воспроизводимость измерений на различных материалах.

*Существующие методы для проведения измерения дефектов формы и контура узконаправлены – они не позволяют оценить различные материалы на предмет микродефектов бесконтактным методом и применить предварительную оценку габаритов детали и степени загрязнения методами искусственного интеллекта и машинного зрения.*

Обозначенное противоречие, представляющее собой научно-техническую проблему хозяйственного значения, предопределило выбор темы диссертационной работы, постановку цели и задач исследования. Направления исследований представлены на рисунке 1

### **Цели и задачи работы.**

**Целью** работы является разработка системы технических средств и метрологического обеспечения бесконтактного контроля параметров формы тел вращения широкой номенклатуры осесимметричных изделий, а также - разработка универсального метода мультисенсорного контроля за счет уменьшения длительности сканирования.

**Объект исследования** – процесс контроля дефектов формы и поверхностного слоя деталей при повышении результативности процесса центрирования, калибровки и настройки датчиков бесконтактного сканирования

**Предмет исследования** – бесконтактный метод контроля дефектов и поверхностного слоя деталей мультисенсорным сканирующим измерительным преобразователем в составе приборов для измерения дефектов формы и контура.

*Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:*

1. Проведение теоретического исследования и создание математической модели нового компараторного элемента для передачи единицы биения кругломера, которая может быть использована в качестве образца сравнения-компараторного элемента к основному эталону («ОМОК-1,2, ОМК» - «Образцовые меры отклонения от круглости», «Полусферическая стеклянная образцовая мера круглости») и должна учитывать массогабаритные характеристики измеряемых деталей

2. Разработка теоретического подхода для методики компоновки измерительного оборудования, которое позволит повысить метрологическую надежность системы при контроле параметров деталей из различных материалов;

3. Разработка метода автоматического управления процессом сканирования для информационно-измерительной системы, который обеспечит высокую скорость управления процессом измерения на ПК при снятии сигналов с вихретокового, емкостного и оптического преобразователя;

4. Разработка методики подготовки и проведения мультисенсорного контроля дефектов формы на основе предварительного сканирования деталей системами машинного зрения, позволит реализовать взаимодополняющие подходы поиска дефектов и учитывать форму, наименование детали, загрязненность, ее габаритные свойства.

5. Разработка универсального метода для обеспечения возможности контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием для измерения магнитных, немагнитных и термопластичных материалов

### **Методы исследования**

Методология и методы исследования основаны на системном анализе, моделировании теории математической обработки результатов измерений, статистической обработке полученной информации по Спирмену. Решение поставленных задач базировалось на использовании математического моделирования, программирования, использования корреляционного однофакторного и дисперсионного анализа, системного анализа и синтеза, сравнения, обобщений и оценок с привлечением методов интегрального исчисления, численных методов и теории интерпретации полученных результатов.

Вопрос контроля дефектов формы и шероховатости рассматривался в рамках теории вероятностей и математической статистики. Теоретическое описание процесса анализа отражаемого от детали сигнала, а также алгоритм калибровки приборов опирается на сформулированные в теории математической обработки результатов измерений, статистической обработке полученной информации по Спирмену, их преобразований в рамках теории кватернионных алгоритмов, Бесселя, Гаусса, Гамильтона, Фурье. В силу специфики бесконтактного метода контроля к его теоретическому описанию были применены методы модуляции сигнала и разработанные для корректной работы прибора с программные продукты для обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью преобразования Фурье и

улучшения сигнала с помощью функции Бесселя. Так как на приборы с бесконтактными методами сканирования часто влияют посторонние помехи, вопросы, связанные с возникающими искажениями, рассмотрены решения в рамках методов теории шумоподавления и фильтрации. Для установления зависимости выходной осциллограммы от дефектов формы, характеризующие корректность предварительно проведенной калибровки, от диаметра детали, марки стали, веса и высоты исследуемой детали, применяются прикладные методы фильтр Гаусса, критерия Граббса, возможность датчиков Шака-Гармана. Представление и обработка полученных математических зависимостей и результатов расчета потребовало применение методов компьютерного моделирования с применением систем Statistica, применения языка программирования JavaScript. В ходе экспериментальных исследований использованы статистические методы обработки полученных результатов.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

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;
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;
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;
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.
5. Разработан универсальный метод для обеспечения возможности контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием для измерения магнитных, немагнитных и термопластичных материалов

**Степень обоснованности и достоверности.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов, сформулированных и полученных в диссертационной работе, подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, корректным использованием современных аналитических и расчетных методов, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов, а также практической реализацией на предприятиях машиностроительной и металлургической промышленности.

***Теоретическая значимость работы***

1. Одновременное применение оптического, вихретокового и емкостного методов контроля позволяет повысить оперативность проводимого контроля, а разработанные приборы с применением мультисенсорной системы позволяют создавать кругломеры, профилометры, контурографы с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками
2. Теоретическое описание 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 за счет применения квазиэталонных элементов

3. Создание метрологически надежной схемы размещения датчиков в едином корпусе позволяет выполнить моделирование импортозамещенных приборов контроля разного типа и по их результативности и оценить согласованность датчиков

4. Программное обеспечение, созданное 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 позволяет 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) Универсальный 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;
- 6) Импортозамещенная линейка 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%.

Результаты работы могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля формы в том числе при контроле подшипников.

#### ***Основные положения, выносимые на защиту***

- 1) Математическая модель передачи единицы биения кругломера, в отличие от известных, используется 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;

- 2) Предложенный 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 сходимость и воспроизводимость измерений
- 3) Разработанный метод автоматического управления процессом сканирования для информационно-измерительной системы способен обеспечить высокую скорость управления процессом измерения на ПК, что в отличие от известных АСУ, обеспечивает точное, взаимно дополняемое снятие сигналов с вихретокового, емкостного и оптического преобразователя;
- 4) Разработанная методика подготовки и проведения мультисенсорного контроля дефектов формы на основе предварительного сканирования деталей системами машинного зрения позволяет использовать взаимодополняющие подходы поиска дефектов, что в отличие от известных, выполняет роль системы помощи принятия решений метрологу, определяет наименование детали, загрязненность, ее габаритные свойства, идентифицирует характерные дефекты деталей подобного вида из серии предыдущих измерений.
- 5) Разработанный 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, что в отличие от известных методов, позволяет расширить область номенклатуры контролируемых материалов

**Тематика диссертационной работы.** соответствует паспорту научной специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки):

п.1. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

п.5. Разработка метрологического обеспечения методов и метрологических характеристик приборов контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих увеличению достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий и повышения уровня экологической безопасности окружающей среды.

п.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.

п.7. Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

п.8. Научное обоснование методов повышения надежности приборов, средств контроля и диагностирования в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации на основе интеллектуального анализа данных.

**Личный вклад автора.** Основная идея работы, постановка задач исследований, разработка применяемого теоретического подхода, постановка, планирование и интерпретация результатов экспериментальных исследований выполнены автором лично. Результаты и выводы, содержащиеся в диссертации и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Все экспериментальные исследования проведены при его участии и под непосредственным его руководством. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении НИР под руководством и при участии автора:

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.

Результаты диссертационной работы апробированы и использованы следующими предприятиями: ООО «Промразвитие», ООО «Димес», 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. Результаты исследования также внедрены в научно-исследовательскую деятельность и в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Созданный макет установки получил 2 серебряных медали конкурса "Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года" и Международной выставки "НИ-ТЕСН", Санкт-Петербург, 2023-2024г

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, концептуально-теоретические положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: на V Международном форуме Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (4 марта 2023 г., г. Санкт-Петербург); на Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (9 апреля 2023 г., г. Томск), на Третьей Всероссийской научной конференции «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем». (10-16 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург), IV Международном форуме Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (5 марта 2022 г., г. Санкт-Петербург), Всероссийской педагогической конференции «Среднее профессиональное образование: как учить и учиться в современном мире». (5 апреля 2022 г. г. Санкт-Петербург), II международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. Сборник тезисов докладов II Международного форума» (9-10 ноября 2022 г., г. Санкт-Петербург), XXII Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (29 мая-2июня 2022г, г. Санкт-Петербург) I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «За нами будущее», приуроченная к 180-летию ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург, 2-6 июня 2022г.), II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «За нами будущее» (г. Екатеринбург, 8-10 июня 2023г.), International conference E3S Web of Conferences (12-115 ноября 2019, г.Санкт-Петербург) , International conference IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (12-13 ноября 2019, г.Красноярк), 14-я международная конференция «Обработка материалов и их характеристики» (14th ICMPC, 26-28 марта 2023г, г.Хидерабад, Индия), XXIII Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (29 мая-2 июня 2023г, г. Санкт-Петербург), Научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ 2022 года института технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного

лесотехнического университета (6 - 10 февраля 2023 г), XVIII международная научно-техническая конференция по электромеханике и робототехнике "Завалишинские чтения» (18-19 апреля 2023г, г.Санкт-Петербург), XX Всероссийской конференции «Высокие технологии в машиностроении» (9-10 ноября 2023г, г.Самара), IX Всероссийской НТК «Измерения. Испытания. Контроль» (24-26 октября 2023г, г.Москва), Международная научно-практическая конференция «Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего» (17-23 ноября 2023 года, г.Кемерово), Петербургская Машиностроительная Конференция, (28-30 ноября, г.Санкт-Петербург), XXI Всероссийской конференции «Высокие технологии в машиностроении» (10-11 апреля 2023г, г.Самара), 22 Conference of international exchange of professionals (1-3 ноября, 2024 г. Шанхай, КНР), 17th ICMPC, 26-28 сентября 2024г, г.Хидерабад, Индия), Green AI Nexus (24-25 апреля 2025 г., г.Кохлапур, Индия), секция «Контрольно-измерительные и испытательные приборы и оборудование, электронно-компонентная база» 12-я Международной выставки «MILEX-2025» (24-25 мая 2025 г., г.Минск, Белоруссия)

**Публикации.** Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 81 печатном издании, в том числе: 30 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий по специальности 2.2.8, из них 21 – без соавторов; 4 статьи – в изданиях, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования, 1 патент на полезную модель, 5 свидетельств о регистрации государственной программы для ЭВМ, 3 учебных издания, 2 монографии, 36 публикаций в прочих журналах и сборниках трудов конференций и международных форумов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Основной текст диссертации представлен на 272 страницах, включая 202 рисунка и 35 таблиц. Список используемой литературы содержит 195 наименований. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 360 страниц.

## I. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, показана степень проработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации 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 (Рис.1)

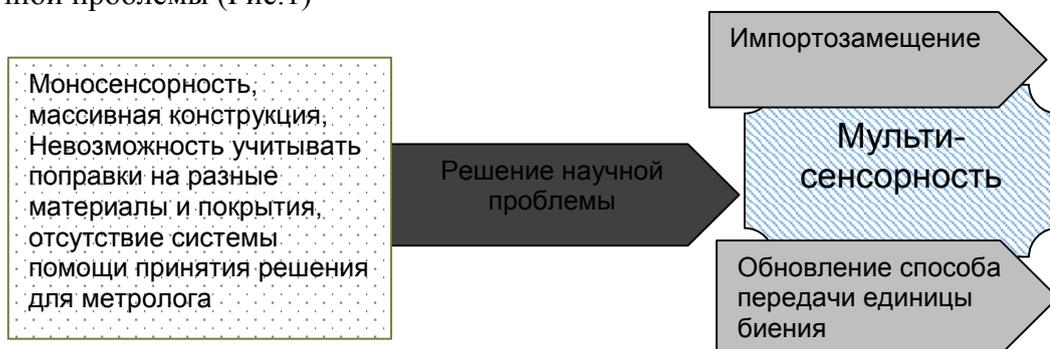


Рисунок 1 - Процесс перехода от моносенсорной системы к мультисенсорной

Также во введении обозначена проблематика существующих исследований. Также представлен обзор существующего оборудования для измерения дефектов формы. Представлены методы совершенствования текущего оборудования (Рис.2).

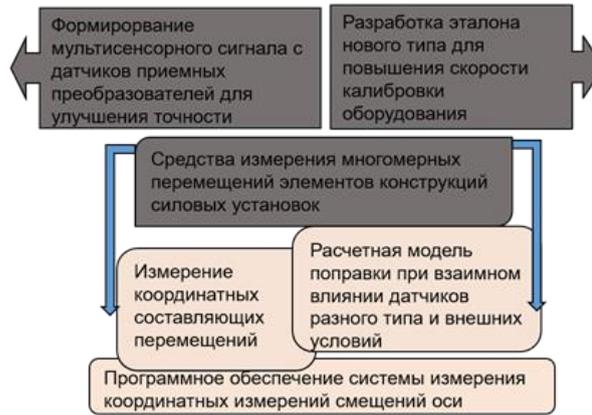


Рисунок 2 – Алгоритм концепции диссертационного исследования

**В первом научном положении** 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.

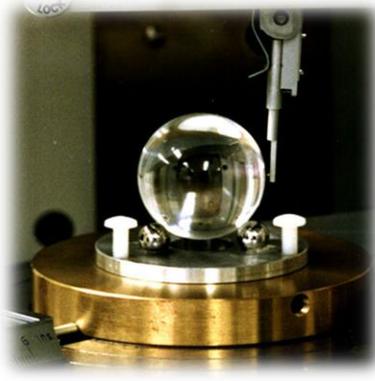
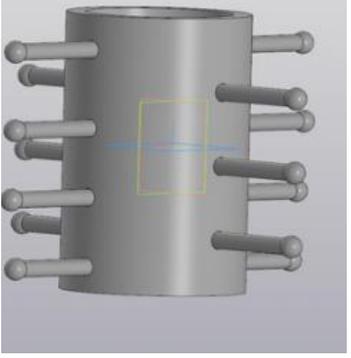
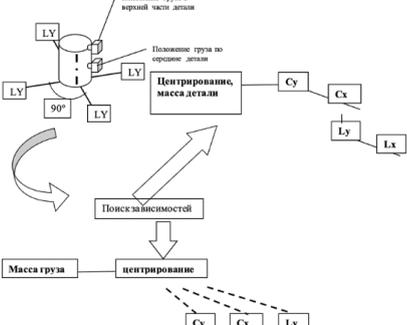
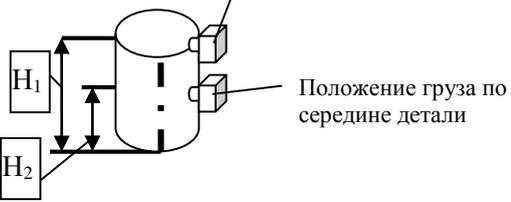
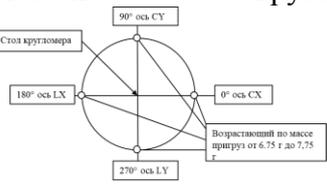
Кругломеры, работающие в комплексе с индикаторами частоты часового типа, не позволяют создать стол (шпиндель) с автоматически выравнивающими осями CX CY LX LY, поскольку имеющиеся в данный момент, согласно ГСИ, эталон круглости не позволяет спрогнозировать корреляционные связи между осями, расположенными на поворотном шпинделе станка на равноудаленных участках в 90 градусов.

В рамках данных стандартов для процесса поверки кругломера основной мерой являются образцовые меры отклонения от круглости типа ОМОК-1, ОМОК-2, ОМК. По полученным результатам отклонения от круглости определяется погрешность прибора, нормируются его метрологические характеристики. Однако, для расширения эталонной базы данного высокоточного прибора необходимо ввести также еще один важный способ. В процессе проведения эксперимента, была реализована методика и прототип способа передачи единицы биения детали. Было принято 12 пригрузов (Таблица 1). Данные учтены в системе математических уравнений.

На рисунке проекта эталона и фиксации грузов в таблице 2 представлено, что высота  $H_1=2H_2$ . Груз крепится строго напротив оси поворотного стола кругломера CX CY LX LY, установленный с помощью мастики груз представлял собой эталонный набор микропластин и гирь различной массы - от 6750 мг до 7750 мг.

Основной принцип исследуемого кругломера, взятого за прототип представлена ниже. Эталон с пригрузами, уставленный на стол кругломера, также представлен на рисунке 5. Идея исследования – обнаружить зависимости между осями кругломера и пригрузами (Рисунок 1). Далее были исследованы зависимости на основе корреляционных связей (Рис. 4).

Таблица 1 - Разработка нового метода для передачи единицы биения кругломера

	$\Delta S(\dot{\Delta}\theta_p) = \frac{\sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} F_{max_i} - \bar{F}_{max}}}{\bar{F}_{max}} \cdot 100$ $\Delta V_p = \Delta V_c \pm 2 \cdot S(\dot{\Delta}V)$ $f_k = \frac{\omega \cdot k \cdot \sum_{i=1}^{12} (\text{пригруз}) m}{60}$ $S(\dot{\Delta}\Sigma) = \frac{\sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (F_{max_i} - \bar{F}_{max})^2}}{\bar{F}_{max}} \cdot 100$	
<p>Эталон ОМОК-1</p>	<p>новый метод передачи единицы-компараторный элемент для передачи единицы биения кругломера</p>	
	<p>Пригруз на мастике</p>  <p>Положение груза в верхней части детали</p> <p>Положение груза по середине детали</p>	<p>Фиксация грузов, результаты испытаний на различных массах</p>  <p>Стол кругломера</p> <p>90° ось Cy</p> <p>180° ось Lx</p> <p>0° ось Cx</p> <p>270° ось Ly</p> <p>Возрастание по массе пригруз от 6,75 г до 7,75 г</p>

Деталь	Общая формула для значения центрирования
Деталь-216,65 г	$y = 0,545575 \int_1^x \frac{1}{t} dt + 13,37595$
Деталь-359 г	$y = 0,005625 \int_1^x \frac{1}{t} dt + 23,85675$
Деталь-732,6 г	$y = -2,37205 \int_1^x \frac{1}{t} dt + 47,3935$
Деталь-1300 г	$y = -0,56125 \int_1^x \frac{1}{t} dt + 208,305$

Рисунок 3 - Расположение детали при проведении эксперимента, положение осей

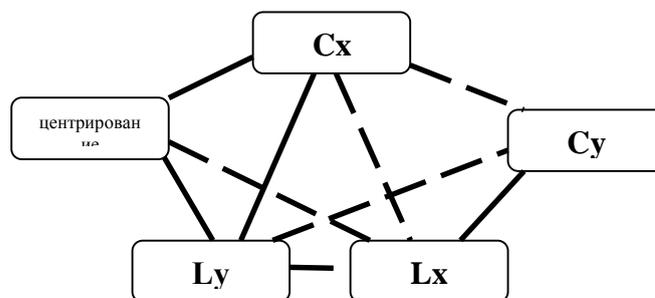


Рисунок 4 - Корреляционный граф, деталь 216,65 гр - 70,40 мм, расположение груза на Cx  
 — — — — — положительные сильные достоверные связи,  
 - - - - - отрицательная сильная достоверная связи.

Анализ проведенных экспериментов, позволил определить положительные умеренные достоверные связи, отрицательные сильные достоверные связи, отрицательные умеренные достоверные связи. При этом важной частью метрологического отказа при проведении измерений может служить некорректная работа системы автоматической фильтрации полученных значений, причиной этого может быть изначальная погрешность при отсутствии процедуры калибровки щупа на измерительное усилие. Также важной процедурой калибровочной схемы, по которой возможно оценить работу компенсационной характеристики на этапе центрирования прибора с установленной деталью, является процедура подвесов, которая значительно упростит настройку прибора, на основе анализа правильности введения компенсационных коэффициентов.

Таким образом, представленные расчеты могут быть также использованы для разработки программного алгоритма отечественного кругломера, поскольку в процессе обнаружения дефектов месторасположения, ориентации и биения самой стратегической задачей является выровнять деталь и создать для нее идеально ровную поверхность и идеально ровную ось, относительно которых контактным щуповым или бесконтактным лазерным методом можно произвести измерение без предварительно загруженной модели трехмерного эталона, а лишь предварительным заданием конструкторских допусков.

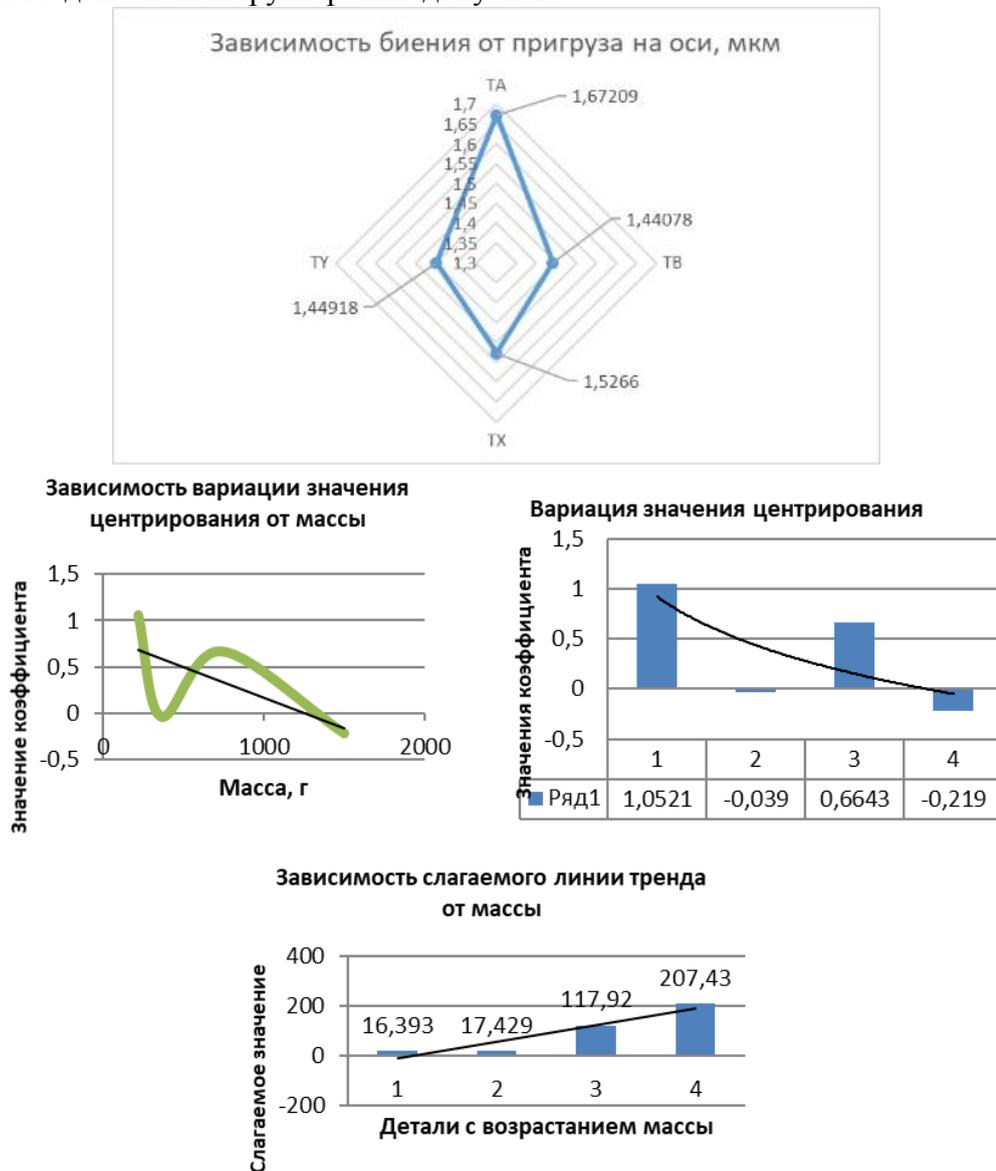


Рисунок 5 - Зависимость биения от пригруза на оси, мкм

Также в процессе проведения измерения были последовательно увеличена масса пригрузов от самого небольшого, до самого большого, усилие, приложенное оператором при приклеивании мастики было одинаковым, подвод оси Z и Y кругломера Mahr был моторизован, что исключало возможность возникновения усилия, которое могло задать дельту относительно первой фиксации детали и последующей, качения, ослабление и люфт относительно первого закрепления в трехлапчатом патроне.

Данные представлены ниже в рисунках 7.

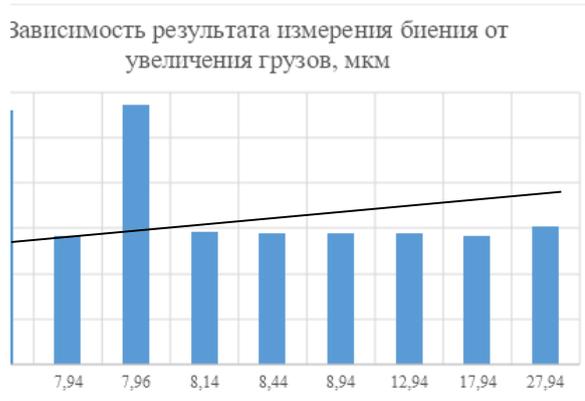


Рисунок 6 - Зависимость результата измерения биения от увеличения грузов, мкм

При этом, однако, было замечено, что после проведения эксперимента биение детали стало меньше.

В процессе измерения были также сравнены показания грузов на осях, равнопротивоположных друг другу – ТА и ТХ. Результаты представлены на графике ниже.

Рассмотрим на сколько градусов у круглограммы появилась деформация относительно расположенного груза на передней оси.

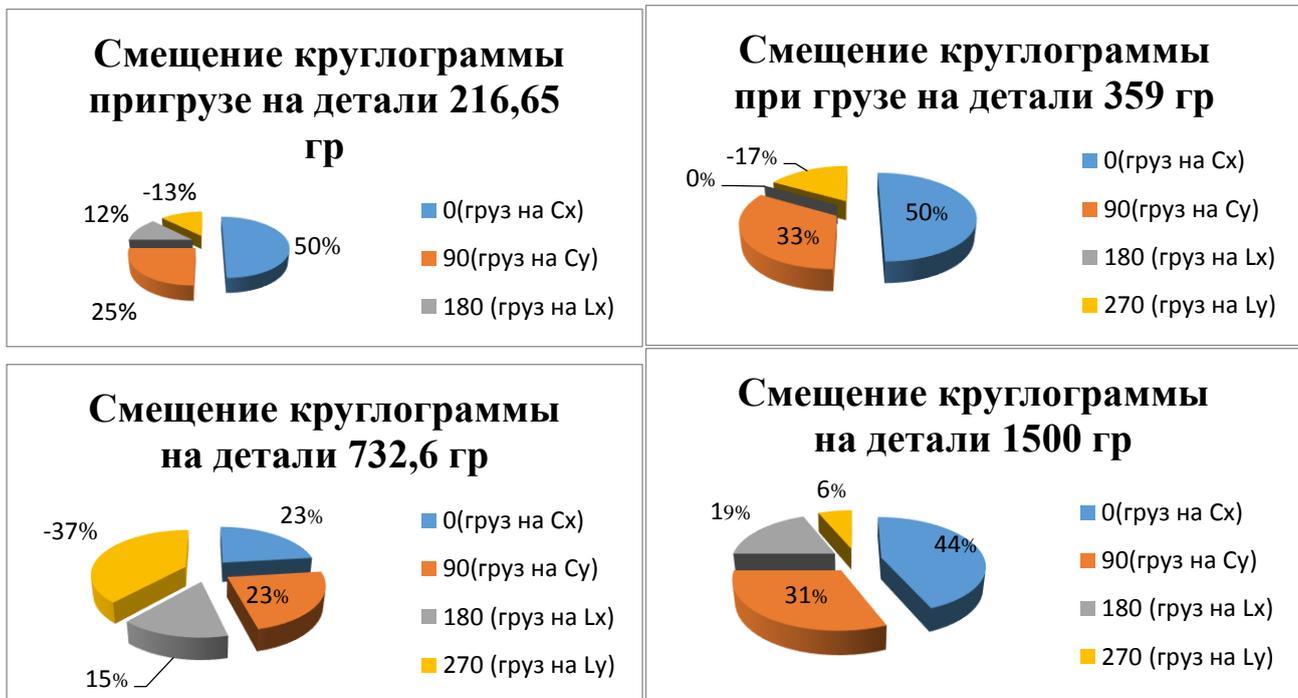


Рисунок 7 - Смещение круглограммы на детали 216,65 гр; 359 гр; 732,6 гр и 1500 гр соответственно

Математическую модель изменения значения погрешности эталона в зависимости от влияния на него различных факторов можно представить как  $Y(t) = XU(k_1, k_2, \dots, k_n; t)$ , где  $k_1 - j$ -й элемент нестабильности щупа при калибровке;  $t$  – время. Итак, движение выходного вектора  $A$  сканирующей системы (кватернион элемента сканирования) можно представить в виде

$$\overline{A} = \sum_{m=1}^N \overline{Q_m} \cdot \overline{A_m} \cdot (Q_m),$$

$$\text{где } Q_m = \cos \frac{\varphi_m}{2} + \cos \Delta(\overline{e_m} \cdot \overline{i_1}) \cdot \sin \frac{\varphi_m}{2} i + \cos \Delta(\overline{e_m} \cdot \overline{i_2}) \cdot \sin \frac{\varphi_m}{2} j + \cos \Delta(\overline{e_m} \cdot \overline{i_1}) \cdot \sin \frac{\varphi_m}{2} k$$

$\overline{Q_m}$  – сопряженный кватернион  $Q_m$

$\overline{A_m}$  – промежуточный входной вектор элемента сканирования

$N$  – количество элементов сканирования в системе

$\overline{e_m}$  – единичные орты

$\frac{\varphi_m}{2}$  – половина угла поворота элемента сканирования

### Зависимость калибровки от угла наклона щупа

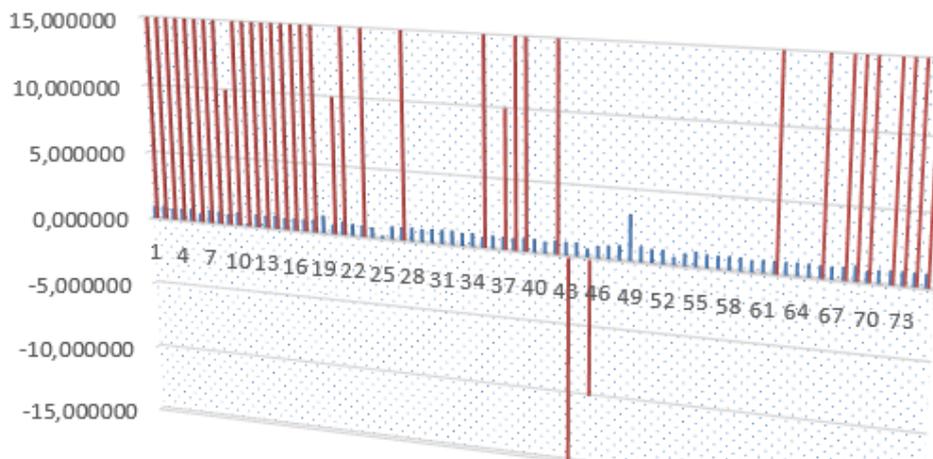


Рисунок 8 – Результат многолетних наблюдений за калибровками контактного щупа

Таким образом, при многолетнем наблюдении за результатом калибровки были выявлены грубые промахи из-за пережата или недожата контактного щупа из-за нестабильности тактильных ощущений оператора, что подтверждает несовершенство контактного метода в существующем алгоритме

#### Выводы по 1 научному положению

Разработана новая математическая модель принципов работы системы центрирования-выравнивания кругломера, которая, в отличие от известных, обладает повышенной скоростью калибровки, повышает точность измерения, что позволяет суммарно значительно уменьшить время на калибровку кругломера. Разработан новый метод передачи единицы биения в качестве образца сравнения-компараторного элемента в дополнение основному эталону ОМОК-1;

Научная новизна проведенных исследований заключается в создании подхода передачи единицы биения кругломера, который используется 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.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура создания способа дополнения эталонной базы нового поколения, на основе введения кватернионных алгоритмов. Достоверность основывается на применении проработанного математического аппарата из ГОСТ по поверке приборов оценки дефектов формы, предварительных испытаний прототипа способа передачи единицы во ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева».

**Научная новизна и практическая значимость разработанной методики подготовки и проведения контроля заключаются в том, что она позволяет проводить контроль дефектов**

**с требуемой достоверностью при применении минимальной предварительной калибровки, получения математической модели нового типа образцовой меры с исключением косвенных расчетных данных.**

**Во втором научном положении** предложен 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 сходимость и воспроизводимость 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. Отказы делятся на не метрологические и метрологические.

Метрологически надежная модель датчика является важной составляющей, которая не позволяет влиять на него посторонним неблагоприятным микроклиматическим воздействиям. Разработка оптических датчиков добились существенных успехов при создании лазерных отечественных кругломеров. На схеме ниже взят за модель прототип видоизмененного лазерного кругломера [6], имеющего следующую компоновочную схему (Рисунок 9), который был взят за прототип и доработан

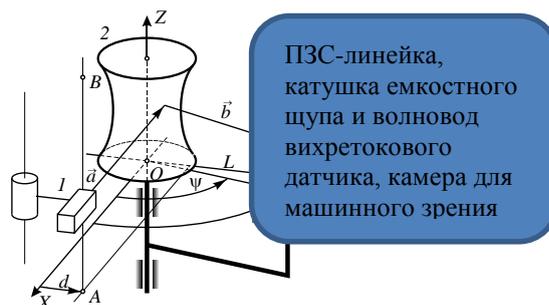


Рисунок 9 - Оптико-механическая схема кругломера:

1 - источник излучения; 2 - контролируемая поверхность; 3 - видеокамера; AB, C направления сканирования;

$\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  - падающий и отраженный лучи света;  $\psi$ ,  $\xi$  - координаты точки падения отраженного луча на фотоприемнике;  $d$  - смещение источника излучения;  $L$  - радиус поворота каретки с видеокамерой

Таким образом, уравнение восстановленной поверхности (отраженной и уловленной фотоприёмниками)  $F(\vec{r}) = 0$  (см. рис. 22):

$$F(\vec{r}) = F_0(\vec{r}_0) + F_1(\overline{\Delta r}), \quad (2)$$

где  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}$  - радиус-векторы точки номинальной и восстановленной поверхностей;  $\overline{\Delta r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ ;  $F_0(\vec{r}_0) = 0$  - уравнение номинальной поверхности.

Функция  $\overline{\Delta r}(\vec{r}_0)$ , которая выводится из  $F_1(\overline{\Delta r}) = 0$ , определяет дефект формы и отклонения от эталона.

Для анализа удобно представить 2-е слагаемое в (2) в виде явной скалярной функции  $h(\vec{r}_0)$ . Эта функция ставит в соответствие каждой точке номинальной поверхности значение высоты отклонения формы, отсчитанной от этой точки [20].

Пусть  $\overline{\Delta r}(\vec{r}_0)$  не перпендикулярен номинальной поверхности. Рассмотрим точки на поверхности, определяемые  $\vec{r}_0$  и  $\vec{r}_{02}$  (рис. 22). Различие высот в этих двух точках не превосходит величины 0,05 рад. Тогда искомая функция

$$h(\vec{r}_0) \cong \frac{(\Delta \vec{r} \cdot \vec{s})}{|\vec{s}|}, \quad (3)$$

где  $\vec{s} = \vec{s}(\vec{r}_0) = \pm \text{grad } F_0$  (имеется ввиду градиент в физических координатах). В системе цилиндрических координат  $\{\rho, \varphi, z\}$ :

$$\text{grad } F_0 = \left( \frac{\partial F_0}{\partial \rho}, \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial F_0}{\partial \varphi}, \frac{\partial F_0}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где  $\rho, \varphi, z$  - соответственно радиусная, азимутальная и осевая координаты. Функция  $\vec{s}(\vec{r}_0)$  определяет перпендикуляр в каждой точке номинальной поверхности [20]. Взаимная статистическая независимость двух процессов (сравнение номинального и реального профиля) преобразовывает одну функцию в произведение пары функций одномерной спектральной плотности:

$$f(\omega_1, \omega_2) = f_1(\omega_1) f_2(\omega_2), \quad (5)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  - пространственные частоты вдоль профилей, совпадающих с координатными линиями криволинейного базиса, соответственно,  $l = R\varphi$  и  $\chi$  (поперек номинальной поверхности — это осевое сечение).

Отсюда, используя упрощение Фурье функции, являющейся квадратным корнем функции (5), получаем координаты дефектов исследуемого на кругломере тела вращения с координатами  $l$  и  $\chi$ . Замкнутость профилей вдоль направляющих линий номинальной поверхности ведет к дискретности спектра частот  $\omega_1$ . Эти частоты должны удовлетворять условию

$$\omega_1 = N/R, \quad (6)$$

где  $N$  - количество волн (отклонений от круглости), приходящееся на оборот поверхности. Автором реализован новый метод измерения, представленный на рисунке ниже

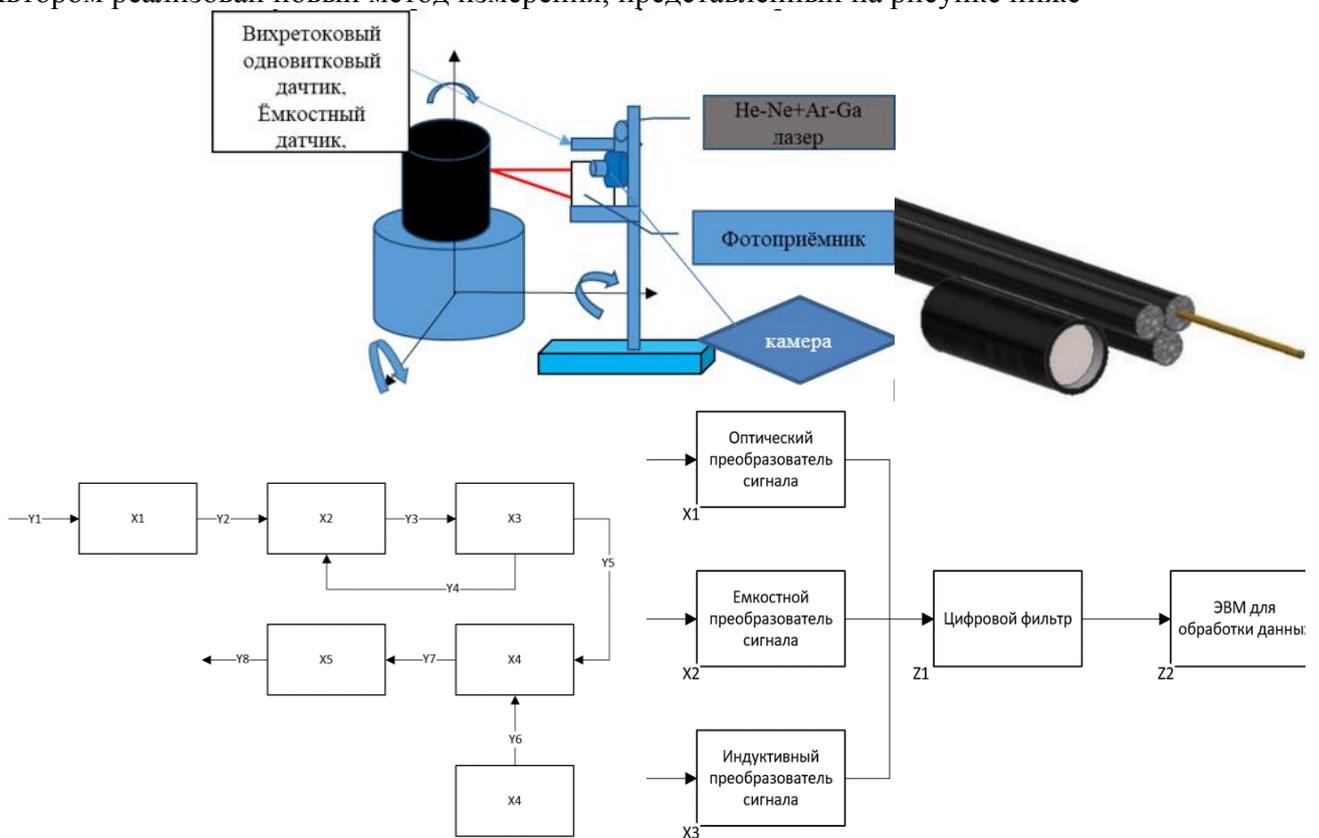


Рисунок 10 - Принцип установки емкостно-лазерно-вихретокового датчика на кругломер и Помехоподавляющая схема основана на применении последовательных фильтров сглаживания и введения модуляции в момент внешних факторов – засвет, приближение оператора

В приведённой оптической схеме производить измерения смещения одного зеркала при неизменном положении второго и постоянстве параметров лазерного излучения. Приведённая схема соответствует случаю приёма излучения на матричный фотоприёмник. Разница во взаимном положении зеркал в плечах интерферометра приводит к изменениям положения максимумов интерференции на фотоприёмнике.

Для снижения шумов измерительного тракта может использоваться балансный фотоприёмник, который позволяет устранить синфазные помехи и убрать постоянную составляющую измерительного сигнала. Метрологически надёжная схема измерительного тракта приведена на рисунке 14. Базовые параметры для расчета – на рис.11

Надёжность была посчитана в программной среде по расчету надёжности

Структура системы	Наименование	Кол	Позиционное обозначение	Децимальный номер	Токр.сп, °С
Аппаратура	Лазерный датчик	1	1		
	Емкостной датчик	1	KO	BP3.604.0054TY	25
	Вихретоковый датчик	1	KO	BP3.604.0054TY	25

Рисунок 11 - Пример задания на расчет в программной среде

После расчета были получены базовые зависимости от наработки и температуры.

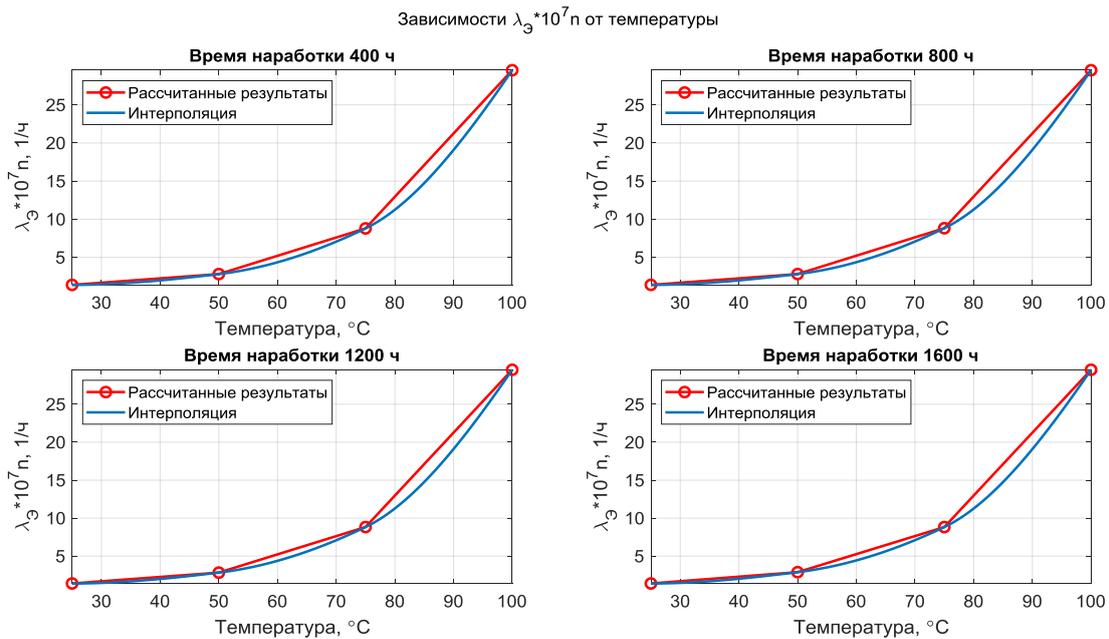
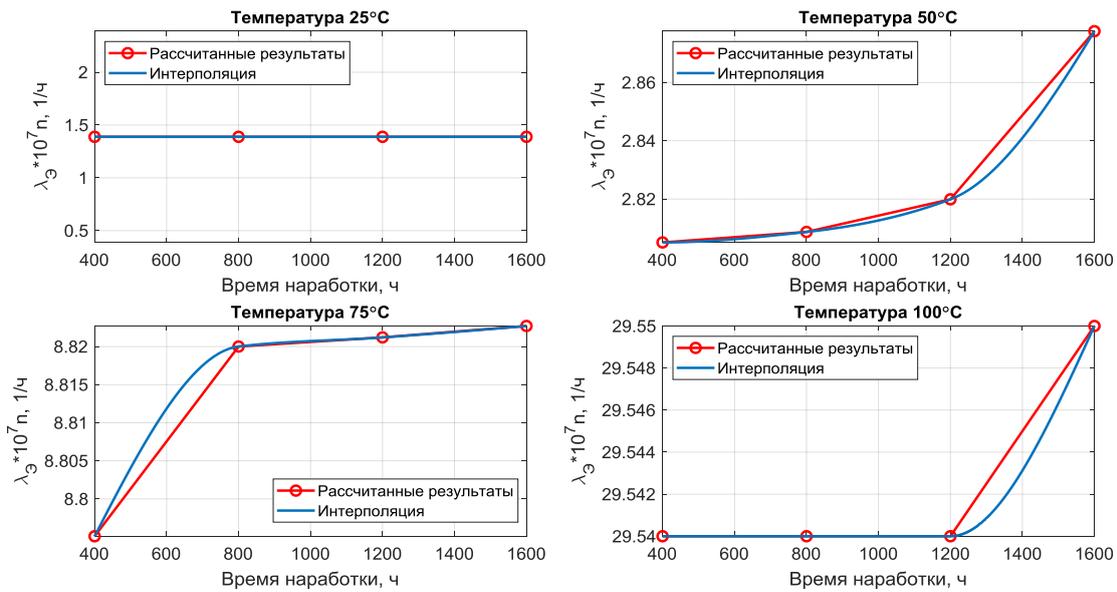


Рисунок 12 – Зависимости  $\lambda_{\text{Э}} * 10^7 n$  от температуры

Зависимости  $\lambda_3 * 10^7 n$  от времени наработкиРисунок 13– Зависимости  $\lambda_3 * 10^7 n$  от времени наработки

По графикам на рис.13 видно, что значение  $\lambda_3 * 10^7 n$  растет с увеличением температуры, что вполне логично; значения и зависимости практически совпадают.

Зависимости  $\lambda_3 * 10^7 n$  от времени наработки отличаются друг от друга. Например, при температуре 25°C, время не оказывает никакого влияния, а при 75°C наблюдается относительно значительный прирост (на 0,02). Далее приведена схема компоновки устройства (Рис.14).

Интенсивность сигнала на фотоприёмнике можно описать по следующей формуле:

$$I(l) = I_{\text{опора}} + I_{\text{сигнал}} + 2 \sqrt{I_{\text{опора}} I_{\text{сигнал}}} \cos(\Delta\varphi), \quad (7)$$

где  $\Delta\varphi = 2kl$  – фазовый сдвиг между опорным каналом с интенсивностью  $I_{\text{опора}}$  и сигнальным каналом интенсивностью  $I_{\text{сигнал}}$ .

Средний уровень интенсивности излучения, попадающего на приёмник, составит:

$$I = I_{\text{опора}} + I_{\text{сигнал}}, \quad (8)$$

Это излучение приводит к появлению постоянного сигнала на выходе фотоприёмного элемента. В разработанной в рамках исследования схеме используется балансный фотоприёмник, который не пропускает на выход постоянный сигнал. Более того, блок электроники фотоприёмника отсекает постоянную составляющую сигнала. Это приводит к тому, что постоянная засветка отсекается не только оптически за счёт построения балансной схемы, но также и электрически, поскольку используются дифференциальные каналы усиления сигнала. По перечисленным выше причинам, сигнал на выходе фотоприёмника описывается исключительно переменной составляющей:

$$E(l) = E_{\text{max}} \cos(\Delta\varphi), \quad (9)$$

где  $E(l)$  – электрический сигнал, регистрируемый на выходе фотоприёмника при условии. Разность фаз между опорным и сигнальным каналом составляет  $\Delta\varphi$ , а длины плеч интерферометра отличаются на  $l$ . Амплитуда сигнала на выходе приёмника,  $E_{\text{max}}$ , определяется уровнем в опорном плече интерферометра, а также – отражательной способностью объекта, установленного в плече измерений. Суммарно, эта схема является метрологически надёжной за счет противоборства с микроклиматическими негативными факторами в условиях цеха. В схеме использован оптический циркулятор Thorlabs F810APC-1550 и волоконно-оптические компоненты LightComm. В качестве фотоприёмника использован балансный детектор Thorlabs PDB 425C-AC.

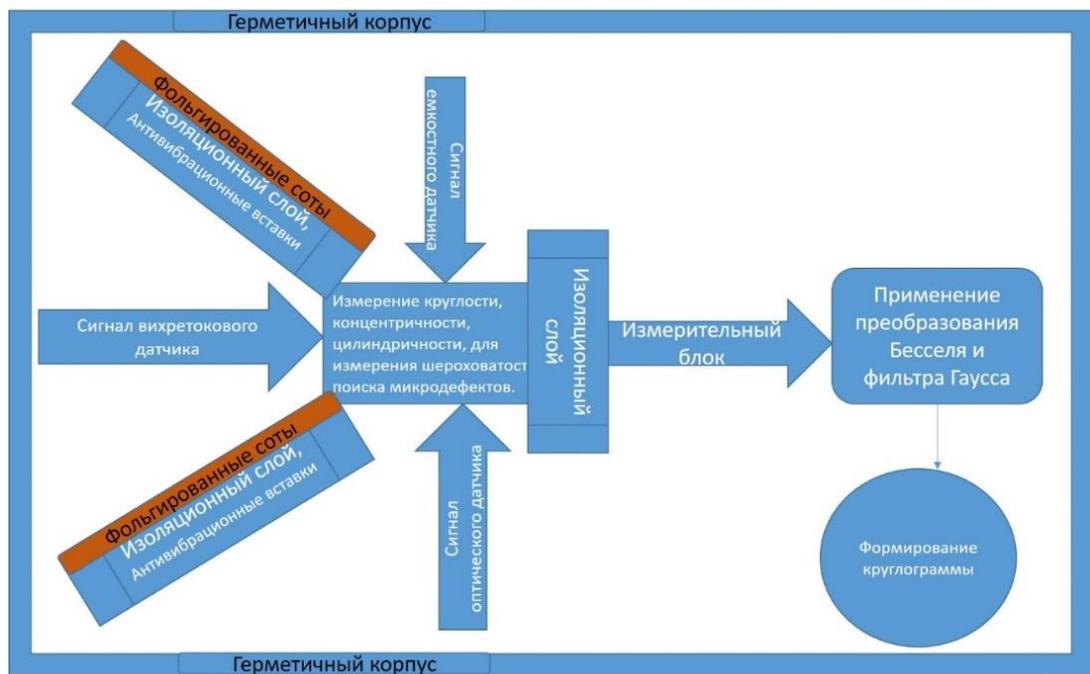


Рисунок 14 – Метрологически надежная схема мультисенсорного датчика

Используемый метод измерений позволяет получать только переменную составляющую сигнала интерференции. Поэтому необходимым условием осуществления измерений является непрерывное вращение измеряемой поверхности. Для увеличения отношения сигнал/шум используется статистическое накопление сигнала. Синхронизация сигнала обеспечивается привязкой к началу нового оборота вращающегося столика.

Для измерений смещения поверхности при вращении необходимо отслеживать число колебаний полезного сигнала. Это можно описать уравнением вида:

$$\sqrt{I_{\text{опора}} I_{\text{сигнал}}} \cos(\Delta\varphi) = 0. \quad (10)$$

Решение этого уравнения приводит к выражению для фазового сдвига:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} + m\pi, \quad (11)$$

где  $m$  – целое число.

Смещение поверхности можно выразить через разность фаз следующим выражением:

$$\Delta L = p \frac{\lambda}{4}, \quad (12)$$

где  $p$  – зарегистрированное число пересечений сигналом нулевого уровня,  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

### **Выводы по 2 научному положению**

Научная новизна проведенных исследований заключается в разработанной концепции метрологически надежного датчика для импортозамещения имеющегося контактного щупа, что позволяет повысить сходимость и воспроизводимость результатов измерений при разных условиях наработки и внешних температурных воздействий.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура создания компоновки, обеспечивающей устойчивую сходимость и воспроизводимость. Разработанная методика бесконтактных датчиков позволяет ускорить контроль партии деталей и повысить точность измерения, в условиях внешних шумовых воздействий.

Научная новизна разработанной методики заключается в том, что она позволяет уменьшить погрешность измерения при преобразовании сигнала. Достоверность исследований заключается в проведенных исследованиях в аттестованной лаборатории ООО «Бортовые аэронавигационные системы» и Физический институт Академии Наук им. акад. П.Н.Лебедева.

**В третьем научном положении** 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.

Результирующая интенсивность сигнала на фотоприемнике интерферометра описывается следующим выражением:

$$I(L) = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (13)$$

где:

$$\Delta\varphi = 2kL, \quad (14)$$

– сдвиг фазы между опорным пучком света с интенсивностью  $I_1$  и сигнальным пучком света с интенсивностью  $I_2$ .

Чтобы определить смещение объекта, необходимо считать периоды функции, например, путем нахождения точек пересечения сигнала фотоприемника с уровнем его среднего значения, которые можно получить при длительном усреднении сигнала:

$$I(L) = \langle I(L) \rangle = I_1 + I_2, \quad (15)$$

Для точек пересечения интерферометрического сигнала с его средним имеем следующее уравнение:

$$2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) = 0, \text{ или } \Delta\varphi = \frac{\pi}{2} + m\pi, \quad (16)$$

где  $m$  – целое число.

Это означает, что если в разные моменты времени мы обнаружили два последовательных

пересечения, когда  $I(L_1) = I(L_2) = I_1 + I_2$ , то разность фаз сигналов в эти два соседних момента времени пропорциональна смещению объекта  $\Delta L$ :

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 2k\Delta L, \quad (17)$$

Более того, в связи с периодичностью (16) можно сказать, что

$$\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \pm\pi, \quad (18)$$

Используя (17) и (18), нетрудно получить следующее выражение:

$$\Delta L = \pm \frac{\lambda}{4}, \quad (19)$$

где знак определяет направление смещения.

Если при наблюдении интерференции используется только пересечение функции с ее средним значением, то при перемещении объекта на расстояние, значительно превышающее период интерферометрической функции  $\lambda/2$ , и при фиксированном направлении смещения модуль смещения между двумя положениями  $L_1$  и  $L_2$  поверхности объекта может быть вычислен следующим образом:

$$|L_2 - L_1| = \Delta L = p \frac{\lambda}{4}, \quad (20)$$

где  $p$  – число зафиксированных пересечений функции с ее средним значением.

В данном случае можно предложить два варианта оценки дальности. Первый - применение гильбертова преобразования сигнала в целях получения его квадратурной компоненты и вычисление мгновенной частоты через известное соотношение

$$\omega = \frac{V'U - U'V}{V^2 + U^2}, \quad (21)$$

где  $U$ ,  $U'$  и  $V$ ,  $V'$  - действительная и мнимая компоненты аналитического сигнала и их производные по времени соответственно.

Переменная часть фазы, обусловленная перемещением, как следует из (17), определяется следующим выражением (Алгоритм на рис.15):

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi\Delta S(t)}{\lambda} + \frac{4\pi\alpha t\Delta S(t)}{c} - \frac{8\pi\alpha S_0\Delta S(t)}{c^2} - \frac{4\pi\alpha\Delta S^2(t)}{c^2}, \quad (22)$$

где

$$\Delta S(t) = \int_0^t V(t)dt, \quad (23)$$

Задача в процессе разработки программного продукта ставилась в области построения на координатной плоскости зависимость  $\ln(R/S)$  - сигнала от  $\ln(\tau)$  смещения пятна, разложения апертуры и учета поправки влияния материала на данное пятно контакта. Решение было принято методом наименьших квадратов определить угол наклона аппроксимирующей прямой к положительному направлению оси абсцисс. Данный угол будет равен значению показателя Н. Хёрста. Пример расчета показателя Херста методом R/S анализ. Также учитывались в программном обеспечении преобразованные функции Бесселя.

Рассмотрим процесс математического описания улучшенной формы принятого сигнала. Используем за основу Функция Бесселя

$$\exp\left[(t - \alpha^2 t^{-1})\frac{z}{2}\right] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^n J_n(\alpha z) = J_0(\alpha z) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\alpha z) \left[\left(\frac{t}{\alpha}\right)^n + \left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{-n}\right]. \quad (24)$$

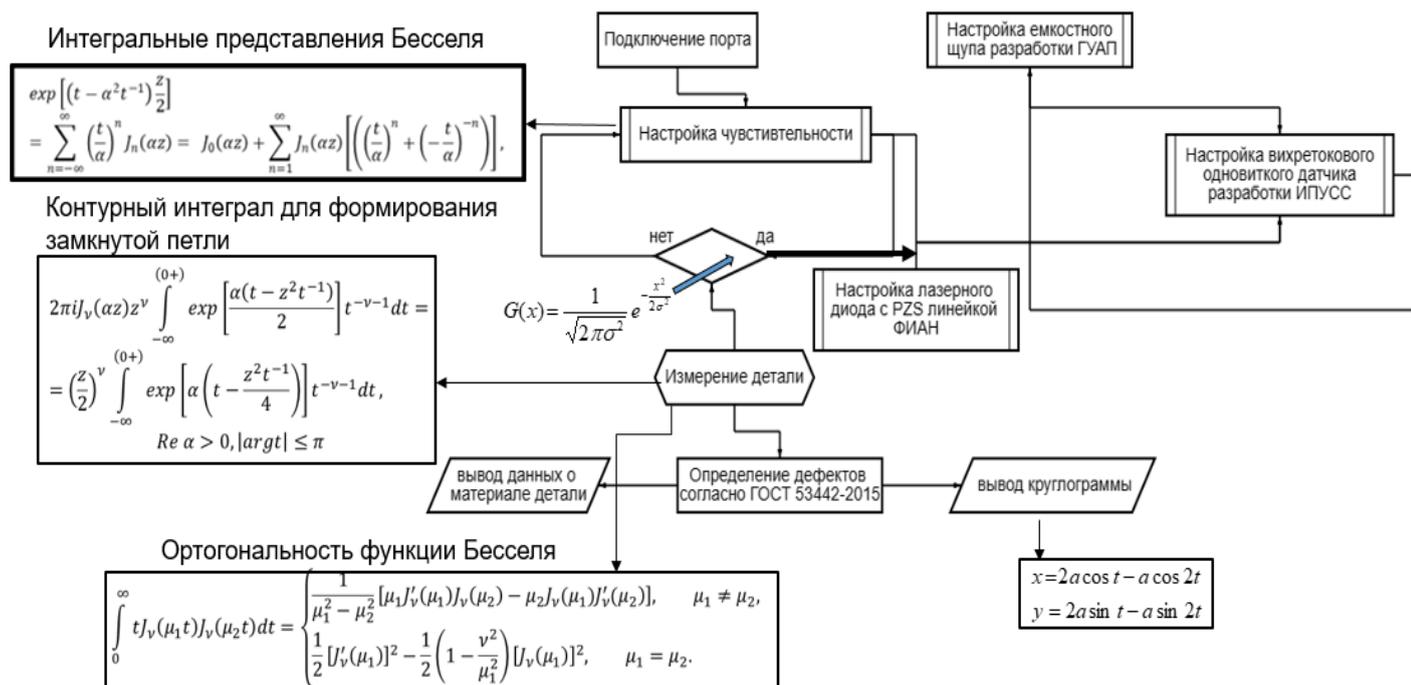


Рисунок 15 - Алгоритм работы программного обеспечения

Применяя теорему о вычетах к формуле (1), получаем:

$$2\pi i J_n(\alpha z) = \alpha^n \int_C t^{-n-1} \exp\left[\left(t - \frac{\alpha^2}{t}\right) \frac{z}{2}\right] dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

Здесь  $C$  является любым простым замкнутым контуром в плоскости  $t$ , охватывающим начало координат. Если положить в равенстве (2)  $\alpha = 1$  и выбрать в качестве  $C$  единичную окружность с центром в начале координат,  $t = e^{i\varphi}$ , получаем:

$$2\pi J_n(z) = \int_0^{2\pi} e^{i(z \sin \varphi - n\varphi)} d\varphi = 2 \int_0^\pi \cos(z \sin \varphi - n\varphi) d\varphi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (26)$$

Данное представление было получено Бесселем.

Для любого  $\nu$  имеем интегральное представление типа Пуассона (относительно обобщения этой формулы).

$$\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right) J_\nu(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(z \sin \varphi) (\cos \varphi)^{2\nu} d\varphi, \quad \text{Re } \nu > -\frac{1}{2}, \quad (27)$$

Этот результат может быть доказан путем разложения  $\cos(z \sin \varphi)$  в ряд по степеням  $z$  и почленного интегрирования. При этом возникают интегралы

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin \varphi)^{2m} (\cos \varphi)^{2\nu} d\varphi,$$

Которые равны:

$$\frac{\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right)\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{2\Gamma(m + \nu + 1)}.$$

Таким образом,

$$\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right)J_\nu(z) = \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^\nu}{\sqrt{\pi}} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m z^{2m} \frac{\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right)\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{(2m)!\Gamma(\nu + m + 1)}.$$

Применяя формулу удвоения для гамма-функции при  $(2m)! = \Gamma(2m + 1)$  и используя также (7), мы получаем равенство (4).

$$r = \alpha(1 - \varepsilon \cos E) = \frac{adM}{dE}, \quad (28)$$

$$\Gamma\left(\nu + \frac{1}{2}\right)J_\nu(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(z \sin \varphi) (\cos \varphi)^{2\nu} d\varphi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{iz \sin \varphi} (\cos \varphi)^{2\nu} d\varphi \quad (29)$$

Интеграл Пуассона в виде (8) может быть использован для вывода некоторых неравенств, касающихся функций Бесселя  $J_\nu(z)$ . Пусть  $\nu$  вещественно,  $\nu > -\frac{1}{2}$  и  $z = x + iy$  ( $x, y$  – вещественны), тогда

$$\Gamma(\nu + 1)|J_\nu(z)| \leq \frac{\left(\frac{|z|}{2}\right)^\nu}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{|y|} (\cos \varphi)^{2\nu} d\varphi$$

И, в силу (5),

$$|J_\nu(z)| \leq \left|\frac{z}{2}\right|^\nu \frac{e^{|y|}}{\Gamma(\nu + 1)}, \quad (30)$$

Заменим функции Бесселя для любых значений порядка  $\nu$  могут быть представлены с помощью контурных интегралов для лучшей фильтрации круглограммы прибора. Погрешность измерения при этом определяется

$$n = \sqrt{2\pi x} \exp\left(\frac{x^2}{2}\right); d\delta = \frac{2,6 - x}{2,6} \quad (31)$$

где

$x$  – случайная величина,

$d\delta$  – относительная погрешность измерений плоскостности, круглости, цилиндричности

Таким образом модель сканирования задана в виде алгоритма (Рис.16)



Рисунок 16 – Модель сканирования

### **Выводы по 3 научному положению**

Научная новизна проведенных исследований заключается в технической реализации программных продуктов для визуализации данных с систем преобразования сигналов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками и создания автоматической программной модели управления ими.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура разработки и внедрения программных модулей для работы с приборами данного типа и формирования корректных метрологических отчетов в рамках контроля партии деталей.

Теоретическая значимость разработанной методики подготовки и проведения контроля заключаются в том, что она позволяет использовать алгоритм разработки программ для исследования возможности управления информационными ресурсами по формированию статистических отчетов. Разработанная методика метрологически надежных бесконтактных датчиков позволяет ускорить контроль партии деталей и повысить точность измерения, что в отличие от известных конструкций, обеспечивает сходимость и воспроизводимость измерений в условиях внешних шумовых воздействий

**В четвертом научном положении** 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 на схеме ниже сенсоров способен детектировать определенную характеристику. При приближении посторонних контролируемых элементов к рабочему электроду изменяется пространственная картина распределения электромагнитного поля, что ведет к изменению емкости рабочего электрода. Однако, при изменении влажности, также может произойти изменение емкости, что может привести к погрешностям (Рис.17).

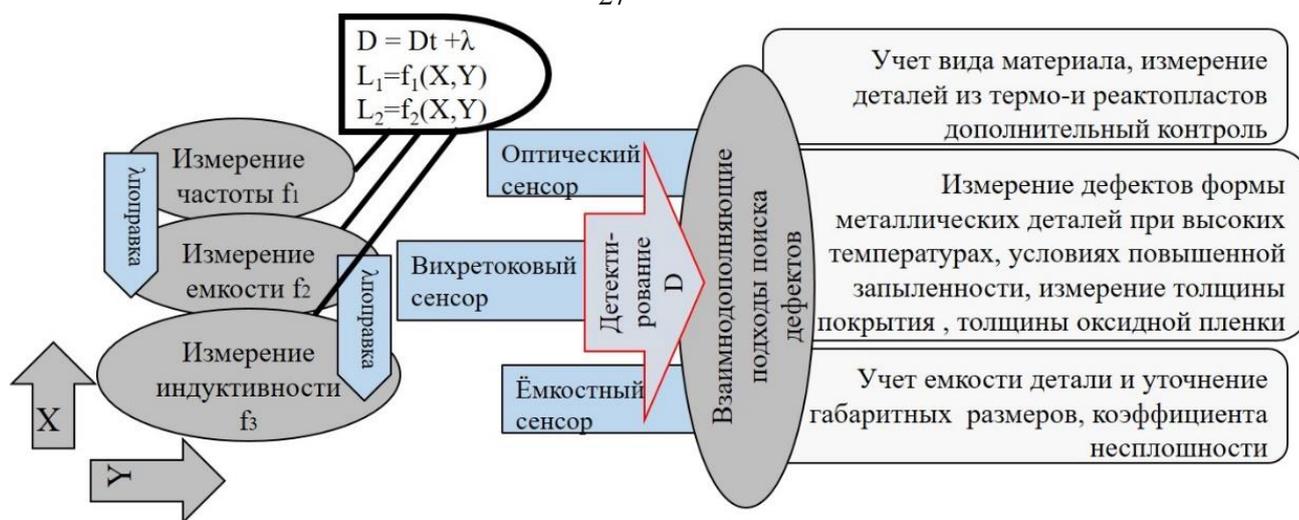


Рисунок 17 – Модель детектирования

Суммарно принцип работы каждого из датчиков представлен в таблице 2

Таблица 2 – Модели и СИ датчиков

Вид датчика	Ёмкостной	Оптический		Ёмкостной
Модель работы	$\Delta L = \pm \frac{\lambda}{4}$ $\lambda$ - расстояние до объекта	$\theta_{EC} = \frac{\sum_i \sum_j \theta_i \times I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j}}$	$\psi_{EC} = \frac{\sum_i \sum_j \psi_j \times I_{i,j}}{\sum_i \sum_j I_{i,j}}$	$D = Dt + \lambda$ $L_1 = f_1(X, Y)$ $L_2 = f_2(X, Y)$ $L_x$ – индуктивность $f$ – флюющий фактор XY перемещения $\lambda$ поправка от показания соседнего датчика
		необходимые для расчета угловых координат $\psi_{EC}, \theta_{EC}$ энергетического центра отраженного пучка света: $I_{i,j}$ данные с ячейки (элемента строки) кадра видеокамеры; $\psi_j, \theta_i$ - угловые координаты этой ячейки. Здесь $i$ - ее порядковый номер, $j$ - порядковый номер шага каретки видеокамеры. По окончании цикла 1 - 5 проводится вычисление искомых координат по формулам:		
Основная физическая величина СИ, ГОСТ 8.417-2024, используемые приборы	мкГн  L, C, R метр E7-12	мкВ  Оциллограф АКПП-32		КГц, А  Частотомер Voltcraft FG-250D

При использовании цепи ёмкостной коррекции изменение ёмкости рабочего электрода также вызывает изменение напряжения на выходе устройства выборки хранения. Медленное изменение ёмкости рабочего электрода обычно происходит при изменении погодных условий. В этом случае напряжение на выходе устройства выборки-хранения изменяется постепенно и поступает на электрически изменяемую ёмкость через интегратор, который обеспечивает необходимую задержку корректировки ёмкости. Использование интегратора необходимо для обеспечения включения сигнализации при резких изменениях ёмкости рабочего электрода. Каждый датчик уточняет работу соседнего датчика, помогает более качественно произвести детекцию определенного параметра системы, который суммарно может быть учтен следующим образом. Таким образом, серия датчиков и их математическая модель могут быть представлены как разработанная комплексная матрица учета угла поворота и сглаживания входных помех с поправкой на отражающие свойства материала.

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

где  $n$  - число измеренных точек профиля изделия;

$x$

$r_i$  - радиусы измеренных точек профиля изделия.

$y_i$  - декартовы координаты измеренных точек профиля изделия;

$$Z_c \begin{bmatrix} v \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_v & 0 & v_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

где  $R$  - матрица параметров вихретокового датчика,

$M_1$  - матрица параметров емкостного датчика,

$M_2$  - матрица параметров емкостного датчика,

$f_v$  и  $f_v$  - эквивалентные фокусные расстояния в направлениях  $x$  и  $y$ , ( $v_0$  и  $v_0$ )

Пространственная точка  $p$  в системе координат камеры задается как  $p(X_c, Y_c, Z_c)$ .

Предположим, что нормализованные проекционные координаты точки  $p$  равны  $p(x_n, y_n)$ ,

а проекционные координаты точки  $p$  после добавления погрешности равны  $p(x_d, y_d)$ ;

Ниже представлена схема работы алгоритма машинного зрения (Рис.18).

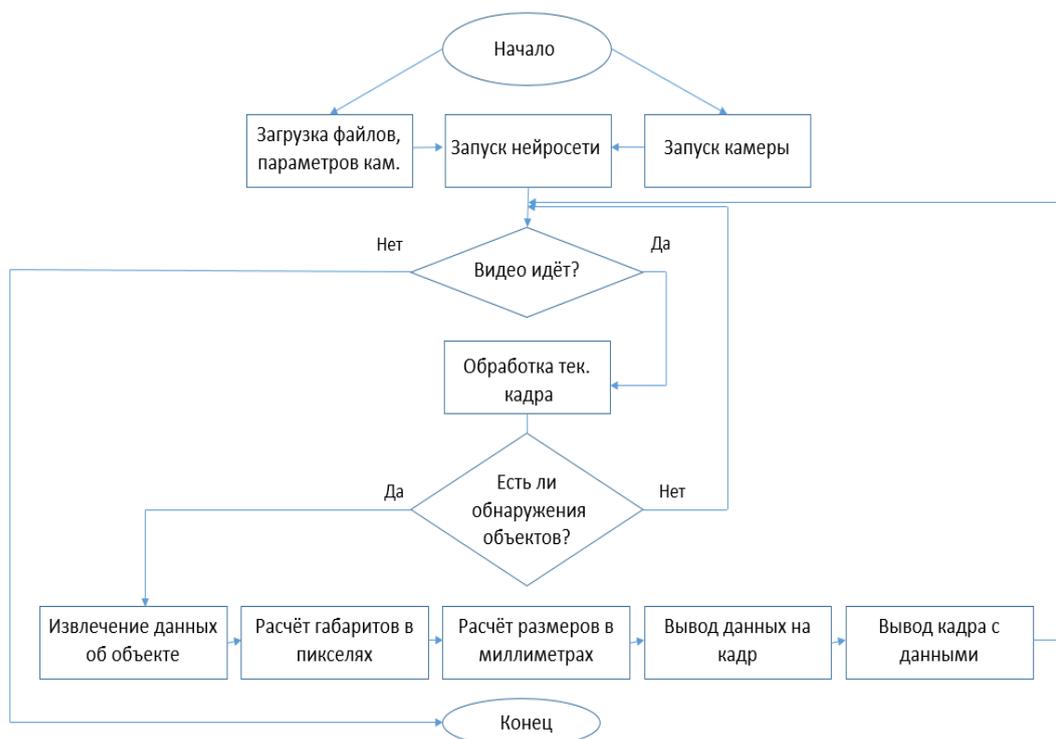


Рисунок 18 – Модель работы системы машинного зрения

Для реализации данного алгоритма был разработан программный продукт, написанный на языке Python. Данный программный продукт также может быть задействован непосредственно на производстве как отдельно от кругломера, так и совместно с ним. Разработанная программа – нейросеть (Рисунок 19) - представляет из себя приложение для измерения размеров объекта из прямого видеопотока на определенной дистанции. Нейронная сеть имеет возможность дополнительного самообучения.



Рисунок 19 – Пример работы программы при идентификации размеров изделия из полиэтиленфтолата и определению наименования объекта

Чтобы программа корректно работала, необходимо перед началом работы произвести настройки

- фокусного расстояния используемой камеры (определить на основании геометрических измерений)
- высоты (вертикального размера) матрицы используемой камеры
- дистанцию до объектов, которых нужно измерить
- минимальный порог обнаружения. Если уверенности обнаружения объекта недостаточно высока, то этот объект выводится не будет.

При обнаружении на видео объектов программа рисует вокруг них рамку, а также название класса этого объекта, по мнению нейросети, размеры в миллиметрах.

После открытия окна программы, запускается основная функция программы. В нейронную сеть загружается предобученная модель (из каталога с программой), начинает работу камера. Далее из видео извлекается каждый кадр и обрабатывается. Кадр преобразовывается в blob-объект, который пропускается через нейросеть. Если на изображении обнаружены объекты, и они проходят заданный минимальный порог, то извлекаются их координаты, название. Так мы находим размеры предметов в пикселях. Затем, используя физические формулы из оптики, известные данные и параметры камеры, мы можем найти настоящие размеры вещи. Остается пометить её рамкой, подписать класс, процент узнаваемости, габариты (ширину на высоту в миллиметрах). Алгоритм работы программы представлен на рисунке 4. В таблице 3 представлены основные результаты испытаний по политэтиленфтолату и стеклу различной степени загрязнения

Таблица 3 – Результаты испытания программы

модель	Вид тестируемого элемента			
	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4
Фото из программы				
Реальный размер, мм	ширина - 94мм, высота - 340мм	ширина - 94мм, высота - 340мм	ширина 87мм, высота 145мм	ширина - 64мм, высота - 96мм
Размер в программе, мм	ширина - 97мм, высота - 337мм	ширина - 96мм, высота - 344мм	ширина - 96мм, высота - 144мм	ширина - 63мм, высота - 97мм
$\sigma$ размера	3,2%; 0,9%	2,1%; 0,9%	2,4%; 0,7%	1,6%; 1%

(Ш и Д), %				
Примечания	Погрешность обусловлена плохим качеством съемки. Так, размеры нарушились из-за наклона камеры, вспышка была принята сетью как часть детали	Фон снизил неточность, но сеть неправильно определила высоту детали	Погрешность в ширине из-за освещения, тень принимается как объект. Погрешность в высоте из-за разрешения камеры.	Погрешность в ширине из-за сложной формы, габариты измерялись по диагонали. Погрешность в высоте из-за размытия верха на фоне.

В данной программе были найдены недостатки. Они приводят к потере точности и погрешностям. Можно выделить 3 основные проблемы:

- Насыщенность обученной модели. Модель, используемая в программе, общедоступная. Она слабо обучена. Это приводит к тому, что количество видов определяемых объектов сильно ограничено, сеть не распознаёт многие предметы. Эта проблема решается обучением модели большим количеством разных объектов из разных классов.

- Качество обученной модели. Вытекает из первой проблемы. Качество базы данных, на основе которой происходило обучение, крайне низкое. Это значит, что многие объекты не так определяются на кадре, как они расположены фактически. Например, вещи могут быть обрезаны или дополнены пустотой. Это приводит к потере размеров и, следовательно, к неточностям в определении размеров. Эта проблема решается обучением модели большим количеством одинаковых объектов из одного класса. Условия съемки, качество камеры-при плохом освещении или маленьком разрешении камеры сеть просто не сможет опознать объекты. Она может принять их неправильно, например, добавить к нему предметы на заднем плане. Рассмотрим программный код программы «BOTSCAN» (реализованный в рамках субсидии Санкт-Петербурга для молодых ученых), написанный на Python:

```
import numpy
import sys
import imutils
import cv2
from time import sleep
from imutils.video import VideoStream
from os import getcwd
from datetime import datetime
from PyQt5 import uic
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow
```

Основное тело  
программы

```
"""Класс, осуществляющий вывод окна с системной информацией"""
def __init__(self):
    """Загрузка данных"""
    super().__init__()
    uic.loadUi('style.ui', self)
    self.label_8.setText(str(proto)) # название prototxt файла (в папке)
```

```

self.label_9.setText(str(model)) # название модели (в папке)
self.label_10.setText(str(conf * 100) + "%") # порог срабатывания
self.label_11.setText(str(height_of_matrix) + " mm") # высота матрицы
self.label_12.setText(str(focus) + " mm") # фокус камеры
self.label_13.setText(str(distance) + " mm") # дистанция до объекта
self.pushButton.clicked.connect(main) # кнопка начала работы осн. функции (main())
if __name__ == '__main__':
    app = QApplication(sys.argv)
    ex = MyWidget()
    ex.show()
    sys.exit(app.exec_())

```

конец  
программы

#### **Выводы на 4 научному положению**

Научная новизна проведенных исследований в создании методики подготовки и проведения расширенного пространственного мультисенсорного контроля дефектов формы, описания принципа работы и функционирования взаимно дополняющие подходов поиска дефектов с использованием принципов искусственного интеллекта.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура организации комплектования прибора новой зависимой схемой взаимно выгодной детектированием сигналов, которые, последовательно уточняя состояние среды, объем детали и покрытия на детали, способны многократно увеличивать объем измерений, более детально использовать определенный метод сканирования с учетом поправок дефектов формы при снижении времени на калибровку. Научная новизна и практическая значимость разработанной методики подготовки и проведения контроля заключаются в том, что она позволяет проводить контроль дефектов с требуемой достоверностью при применении бесконтактного оперативного метода контроля (Рис. 20).



Рисунок 20 – Алгоритм методов фильтрации

**В пятом 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

Таблица 4- Виды смоделированных стендов

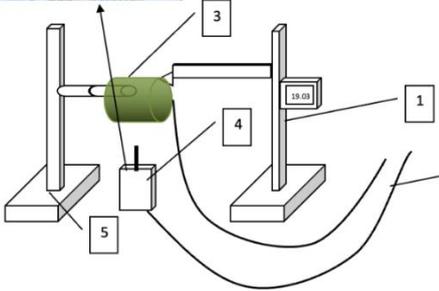
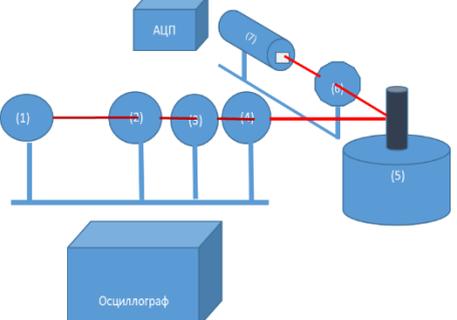
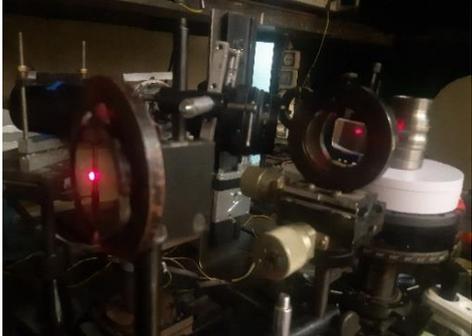
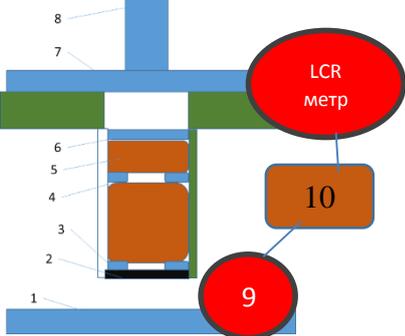
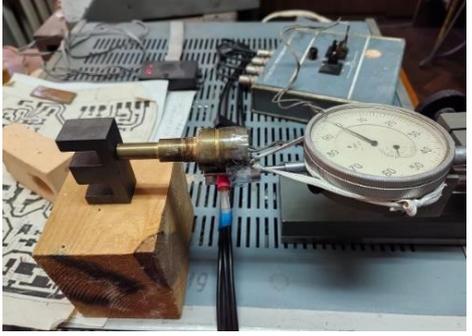
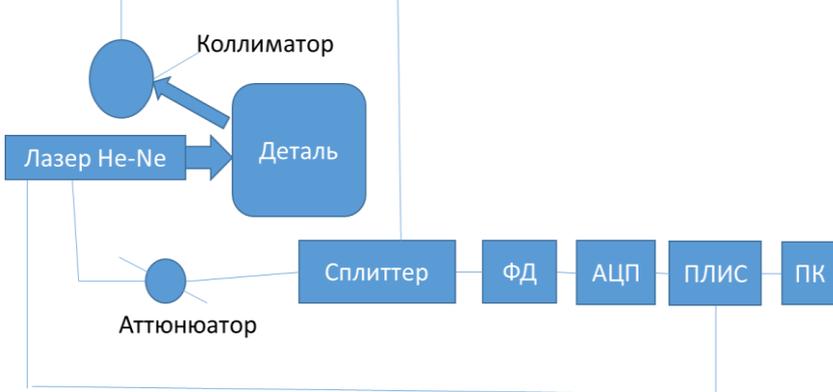
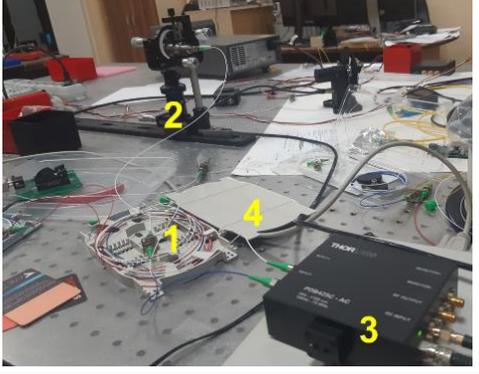
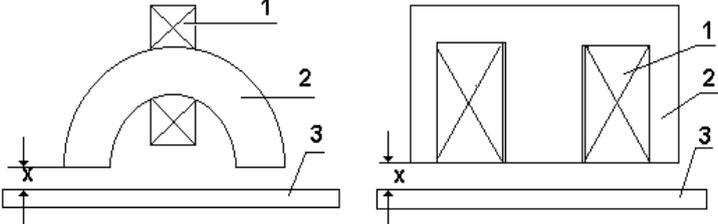
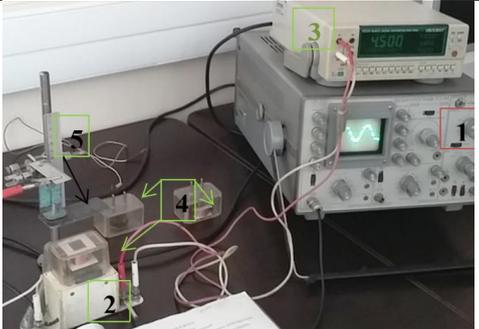
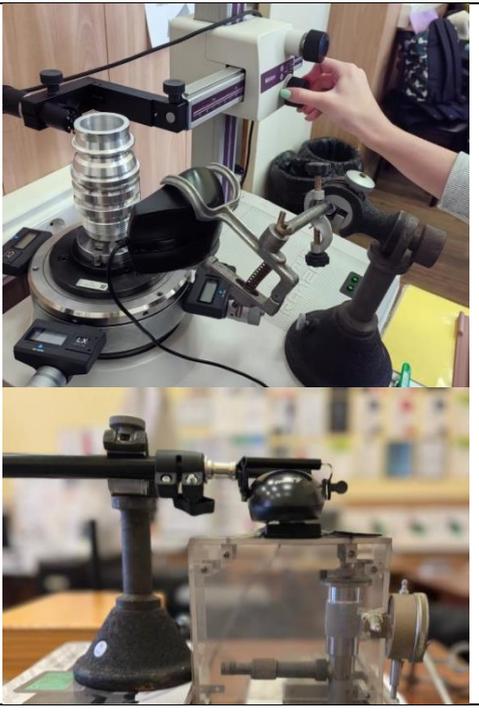
Разработанная схема	Состав датчика	Фото стенда
	<p>1 – Штангенрейсмас, 2 – провода к осциллографу или частотомеру, 3 – контролируемая деталь на консоли, 4 – емкостный датчик с латунным щупом, 5 – Стойка с контролируемой высотой консоли.</p>	
	<p>1- лазер ДМ-8-650, 2-поляризатор, 3-затемнитель 4-Цилиндрическая линза, 5- деталь, 6- объектив Гелиос, 7- Прибор с зарядовой связью К1200ЦЛ-1</p>	
	<p>1 – объект; 2 – керамический корпус; 3 – измерительная катушка; 4 – компенсационная катушка; 5 – керамический каркас; 6 – экранирующая пластина; 7 – металлическая катушка; 8 – кабельная перемычка 9 – микрометрический винт 10-АЦП</p>	

Таблица 4- Виды смоделированных стендов (окончание)

Разработанная схема	Состав датчика	Фото стенда
 <p>Схема установки. (а) 1, 4 – волоконно-оптический тракт, 2 – микрометрический винт с установленным коллиматором, 3 – фотоприёмник. (б) 1 стойка с отражателем, 2 – микрометрический винт, 3 – коллиматор. (в) – показания осциллографа Rohde and Schwarz при смещении микрометрического винта на 0,05 мкм</p>		
 <p>1 – Осциллограф C1-55, 2 – Измерительный штатив с подвижным элементом магнитопровода, 3 - мультиметр Voltcraft MXD 4660, 4 – Набор катушек индуктивности в пластиковом корпусе с вилкой 5- перемещаемый объект (металлическая пластина)</p>		
<p>Стенд для испытаний контроля шероховатости поверхности с помощью манипулятора мыши с высоким разрешением</p>		

Зависимость индуктивности вихретокового датчика от зазора между ним и дюралевой деталью исследовалась на индикатор частоты (на рис.21-результат исследований) с часовым индикатором с ценой деления 0,01 мм.



Рисунок 21 – Результат измерения на вихретоковом датчике дюралюминия от 0,01мм до 2 мм

Далее была проведена еще серия экспериментов, уже на большее удаление от детали. Здесь шаг был уже по 0,02 мм, поэтому на графике появились характерные «ступеньки» (Рис.22).

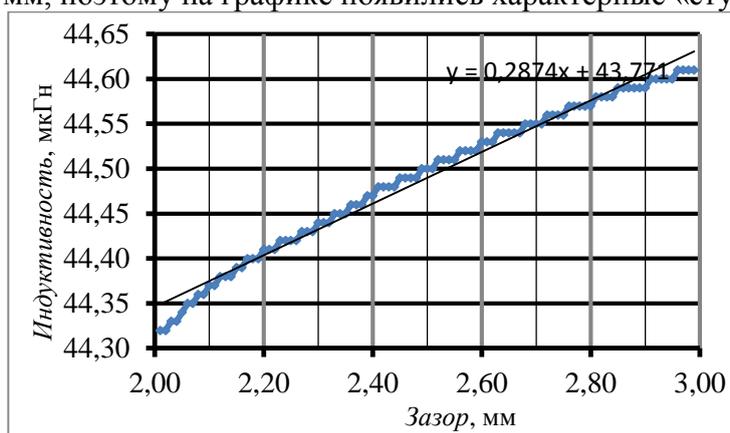


Рисунок 22. Результаты экспериментов на дюралюминии с пролонгированным детектированием

Важно сказать, что на вихретоковые преобразователи также влияет множество погрешностей, которые могут значительно ухудшать качество сигнала. Так, рассматривается теорию фракталов в качестве основной для выявления истинного сигнала. Индекс фрактальности реализован в виде формулы Хёрста (32), (33) .

$$D = E - H, \quad (32)$$

где D – фрактальная размерность временного ряда, E – евклидова размерность задачи, H- показатель Херста.

$$D = Dt + \lambda \quad (33)$$

Где D – топологическая размерность,  $\lambda$ – индекс фрактальности.

Для того, чтобы рассчитать показатель Херста временного ряда  $\xi(t)$  необходимо. Вычислить среднее значение массива  $\xi(t)$  за время:

$$\xi(t)_{cp} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (34)$$

Г.Э. Хёрстом было установлено следующее соотношение:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \approx \tau^H \quad (35)$$

Таким образом, при обучающем эксперименте можно рассчитать фрактальную размерность и доверительный интервал для классификации дефектов, при длительности импульса питания 0,58 мкс на выходе ИЦ формируются напряжения с равной амплитудой при взаимодействии ЧЭ как с немагнитной (+0,000214 В), так и с магнитной (-0,000214 В с учетом инверсии) частицами металла. (Рис.23).

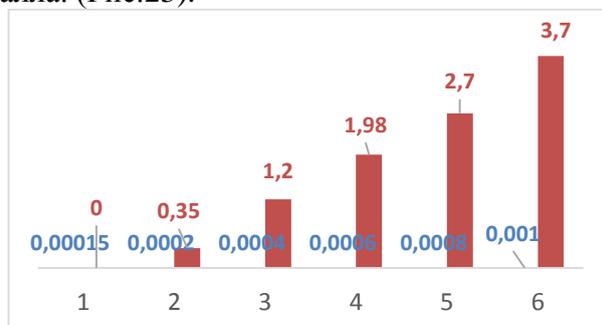


Рисунок 23 -Пульсации напряжения на выходе ИЦ при взаимодействии ЧЭ с немагнитными материалами (а) диаметром 0,5 мм (малые столбцы – напряжение, В, малые столбцы – время реакции мкс)

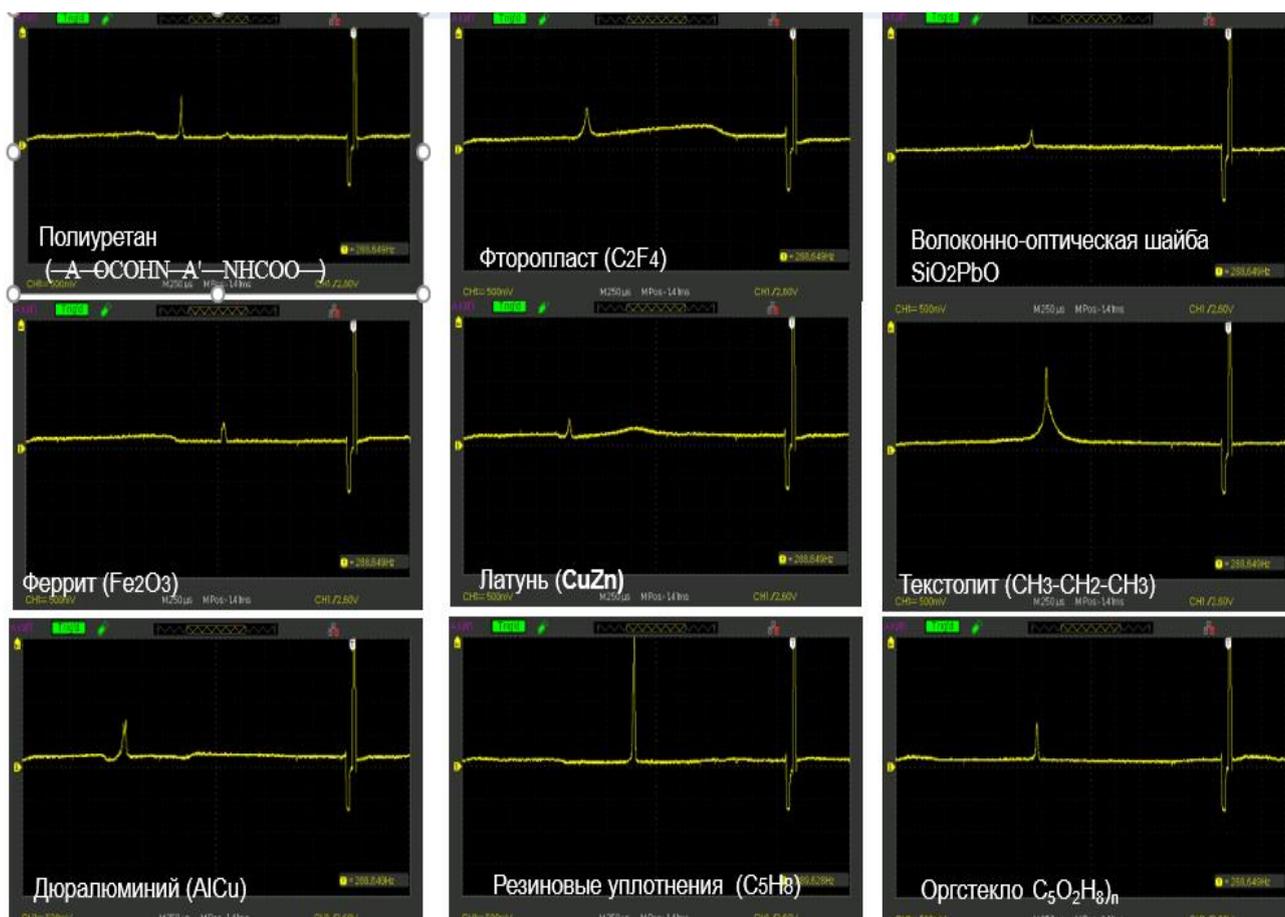


Рисунок 24 – Реакция на оптическом датчике (ФИАИ)

В результате проведенных экспериментов и реализованных стендов удалось получить зависимость каждого датчика на определенный тип материала. Далее представлены результаты

измерения на вихретоковом датчике магнитных материалов (Рис.25).

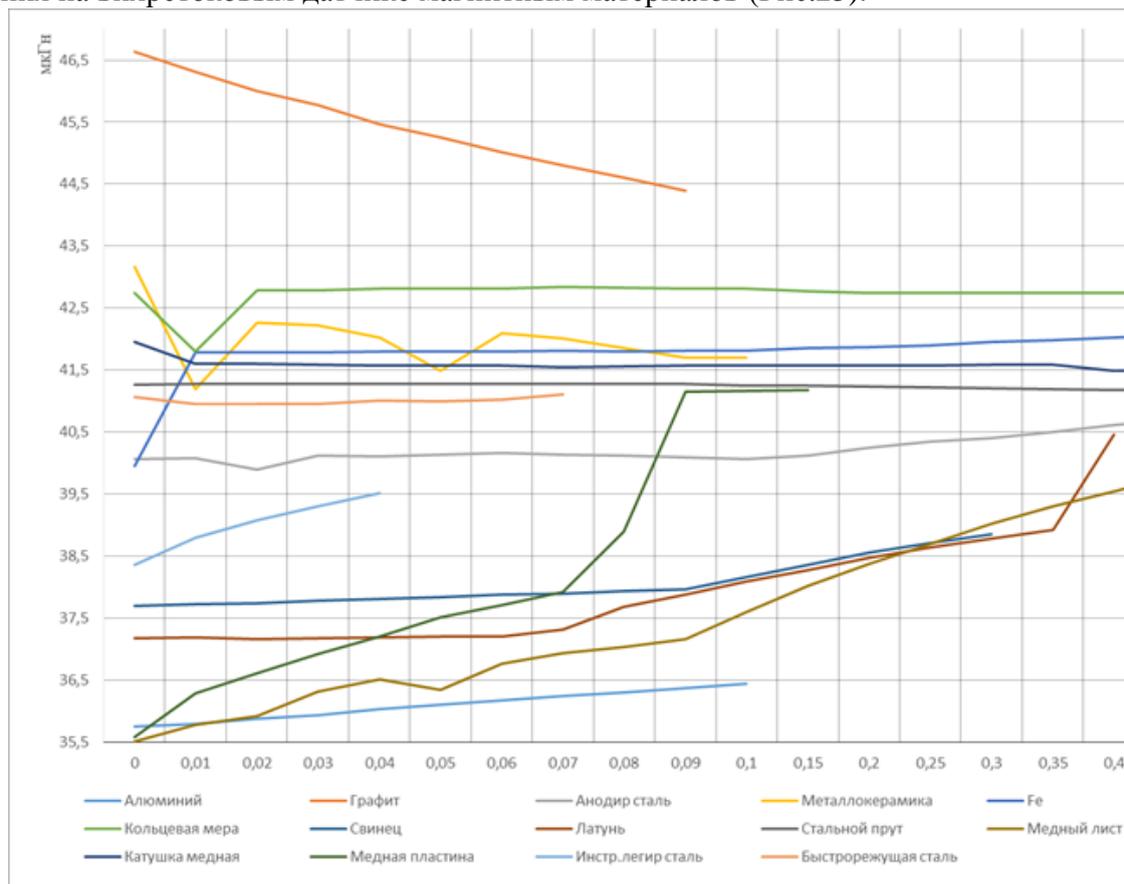


Рисунок 25 – Реакция на различные материалы вихретокового датчика (ИПУСС РАН)

По вихретоковому датчику все данные были сведены в таблицу.

Таблица 5 – Матмодели на материалы по вихретоковому датчику

Вид материала	Матмодель
Металлокерамика	$y = 0,0195x + 41,083$
Дюралюминий	$y = 35,674e^{0,002x}$
Хромистая сталь (КМД)	$y = 0,0118x + 42,611$
Медная проволока	$y = -0,0099x + 41,683$
Ферритовый сплав	$y = -0,2457x + 46,775$
Свинец	$y = 0,0778x + 37,44$ $R^2 = 0,8358$
Конструкционная сталь	$y = 0,0195x + 41,083$

Ниже представлены результаты измерения на емкостном датчике.



Рисунок 26 - Зависимость воздушного зазора от частоты при приближении датчика емкостного

Ниже представлены результаты измерения микросмещения на оптическом датчике.

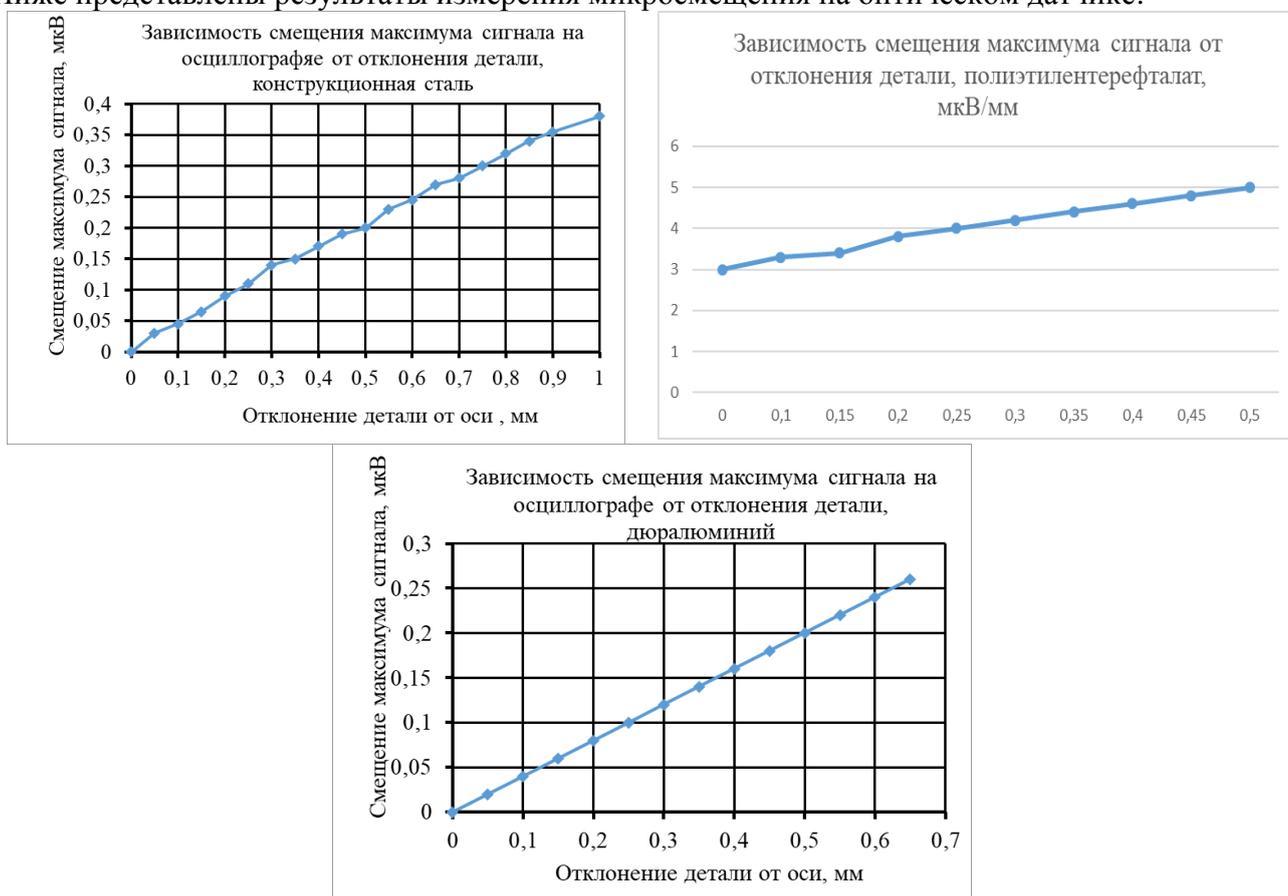


Рисунок 27- Зависимость оптического лазерного сканера на различных материалах.

Расчетная функция преобразования была выявлена следующей зависимостью:

$$h = \frac{(a-f)}{f \sin j} \times R$$

$h$  – высота освещенной точки поверхности относительно нулевого уровня (т. е. среднего положения освещенной точки по радиальному профилю);

$R$  – смещение максимума сигнала на ПЗС-линейке;

$f$  – фокусное расстояние объектива;

$a$  – расстояние от объектива до освещенной точки поверхности детали;  
 $j$  – угол триангуляции.

Научная новизна проведенных исследований в реализации универсального метода подготовки и проведения контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием при аппроксимации измерения магнитных, немагнитных и термопластичных материалов, что в отличие от известных методов, позволяет расширить область априорной информации об объекте измерения и подбора более оптимальных режимов измерения

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура создания приборов для оснащения пунктов ОТК, работающих с большим спектром материалов.

### Заключение

В результате проведенного диссертационного исследования удалось определить ключевые закономерности, учитывающие работы прибора для проведения измерения на цилиндрических деталях при их вращении. Была подчеркнута важности использования теории кватернионов, которые в настоящее время имеют огромное значение для определения местоположения вращающихся тел, что по, является неразрывно связанными с алгоритмом работы прибора для измерения отклонения от заданной геометрии – кругломера. Сумма скаляра (который учитывает в детали, установленной на кругломер, массу и диаметр детали) и вектора (который, по сути, учитывает ускорение детали при повороте, а значит дефекты формы, которые оператор не может обнаружить, не вращая деталь – отклонение от цилиндричности, крулости, осевое биение). Повороты объекта определяются как изменение положения осей системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , связанной с отражателем, относительно осей неподвижной приборной системы координат  $XYZ$ .

В процессе выполнения работы реализовано новое комплексное направление, связанное с разработкой метода проектирования высокоточных приборов для измерения дефектов формы на основе мультисенсорных датчиков, применения современных методов цифровой метрологии в области создания информационных программных методов визуализации информации.

1. Выполнен анализ методов и средств автоматизации метрологического обеспечения при настройке и проверке прибора на осевое биение путем принудительных пригрузов, что позволяет обнаружить алгоритм введения компенсационных поправок со стороны кругломера, что существенно облегчает процесс создания аналогичных шпиндельных головок кругломеров при производстве их на территории РФ, создает новый метод передачи единицы сравнения.

2. Разработаны теоретическое обоснование, методика и возможности замены контактного щупа на бесконтактные типы щупов лазерного вида, вихретокового и емкостного типа, стоимость которых намного ниже современной стоимости оригинальных щупов, используемых в настоящее время для кругломеров производства Японии и Германии, что позволило исключить недостатки контактных щупов (высокая истираемость, ломкость) при определении геометрических параметров отклонения от формы деталей.

3. Разработаны принципиальная схема и устройство системы учета результатов измерения с помощью гамильтоновых скалярных и векторных вычисления, а также улитка Паскаля, которая используется при получении круглограммы в программной среде, что позволило применить для создания максимально точного метода измерения следующие критерии и фундаментальные законы: Бесселя, Гаусса, Гамильтона, Фурье, Линейный фильтр Гаусса, Критерий Граббса, Билатеральный фильтр, сглаживающий сплайн, Вейвлет преобразование, Датчики Шака-Гармана.

4. Обосновано применение интерферометра Майкельсона и ряда сглаживающих фильтров при формировании пучка лазера и его улавливания калиматорной установки в зависимости от различных скоростей вращения поворотного стола, освещенности и применения различных типов осциллографирования для анализа происходящих эффектов.

5. Реализована математическая модель передачи единицы биения кругломера 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;

6. Реализована методика подготовки и проведения расширенного пространственного мультисенсорного контроля дефектов формы, который позволяет использовать взаимно дополняющие подходы поиска дефектов.

7. Реализован универсальный метод подготовки и проведения контроля дефектов формы твердых тел вращения бесконтактным мультисенсорным сканированием обеспечивает возможность аппроксимации измерения магнитных, немагнитных и термопластичных материалов, который позволяет расширить область априорной информации об объекте измерения и подбора более оптимальных режимов измерения

8. Реализован расширенный пространственный метод автоматического управления процессом сканирования для информационно-измерительной системы, который обеспечивает точность сканирования в заявленном диапазоне, высокую скорость диспетчерского управления процессом на ПК, имеет возможность интегрироваться с интерфейсом как вихретокового, так и емкостного и оптического преобразователя;

Результаты исследований внедрены в технологические процессы при оценке качества изделий, полученных резанием на токарных станках, на станках ЧПУ, полученных с помощью технологий аддитивного производства. Применение всех вышеуказанных методов позволило уменьшить расходы на разработку приборов данного класса за счет известного типа ранее подобранных комплектующих к макетной установке и уменьшить объем калибровочных процедур при настройке поворотного стола (шпинделя) кругломера, а знание программных кодировочных компонентов позволило разработать аналог существующей программы для оценки геометрии деталей.

Таким образом, поставленные цели и задачи решены. В результате исследований получены новые технологические и технические решения по разработке импортозамещенных приборов для измерения дефектов геометрии и автоматизации метрологического обеспечения процесса юстировки прибора, получены новые научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых внесло значительный вклад в развитие страны.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при проектировании приборов для измерения геометрии для контроля качества тел вращения на предприятиях авиастроительной и энергетической отрасли.

В диссертационной работе получены следующие **результаты**, имеющие **научную новизну** и **практическое значение**:

1. Предложено новое математическое описание прибора как информационной измерительной системы и разработаны математические модели многощупового кругломера, позволяющие определить связь вход-выход от дефекта вогнутости, конусности, седлообразности и сигналом осциллографа.

Показано, что емкостная, вихретоковая и оптическая выходная функция прибора, являющаяся его исчерпывающей характеристикой, может быть представлена совокупностью аппаратных функций отдельных функциональных узлов прибора. В отличие от традиционного описания приборов для измерения дефектов формы, это позволило выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого оптического, емкостного, вихретокового сигнала через все функциональные узлы прибора и учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат измерения.

2. Разработан универсальный метод контроля дефектов формы и контура, основанный на регистрации, анализе и сопоставлении множества параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов емкостной, оптической и вихретоковой сканирующей системы, отличающийся тем, что описывает процедуру контроля,

технические средства и параметры калибровки в рамках единого математического аппарата, и позволяет не только повысить достоверность проводимого контроля по сравнению с существующими методами контроля

Впервые введены измерительно-информационные характеристики прибора контроля, которые могут служить критериями при сравнении кругломеров и контурографов разного типа по их результативности, позволяют выбрать соответствующий прибор при заданных допустимых вероятностях ошибок контроля и оценить согласованность отдельных приборов при совместном их применении для решения конкретной прикладной задачи контроля процесса горения.

Установлено, что для обеспечения достоверности контроля, выполняемого щупом тройного действия, оптимальным правилом принятия решения будет являться то, которое позволит минимизировать вероятность ошибки 1-го рода при ограничении сверху ошибки 2-го рода при учете неопределенности измерений.

3. Предложена техническая реализация приборов контроля на базе разработанных оптических, емкостных и вихретоковых датчиков с применением анализируемых сигналов, отличающихся новизной и улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными прототипами за счет ряда фильтров в используемых программах для вывода результата на ПК.

В многоканальном кругломере, благодаря особенностям его принципа действия, для передачи сигналов можно использовать не один датчик, а синергию сигналов, что повышает чувствительность прибора более чем на 9% относительно кругломеров других типов, а также обеспечивает повышение его разрешающей способности, универсальности относительно исследуемых изделий. Набор фильтров, количество которых определяется необходимым числом контролируемых параметров, позволяет сосредоточить измерительные элементы на определенном участке детали, уточнить апертуру сигнала что дает возможность анализировать конкретный участок, а не весь диапазон поверхности.

Исследованы искажения и погрешности анализируемых сигналов, возникающих при алиасинге, передаче их к осциллографу. Показано, что, применение гелий-неонового лазера, датчика угол-кода и светоприемной матрицы приводит к улучшению разрешающей способности прибора более чем на 10%, применение калиматорной линзы – более чем на 20%. Разработана методика коррекции потерь и искажений, возникающих при передаче сигналов. Учет и корректировка этих потерь и искажений при проектировании кругломеров и контурографов позволяют улучшить технические эксплуатационные характеристики разрабатываемых приборов контроля в отличие от аналогов.

4. Разработана методика подготовки и проведения контроля дефектов формы и контура, позволяющая проводить контроль процессов производства тел вращения с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

5. Была выполнена проверка разработанного оптико-емкостно-вихретокового метода контроля деталей и экспериментальная отработка методики подготовки и проведения контроля на примере дюралюминия и конструкционной стали. Определена достоверность проводимого контроля. Было установлено, что наибольшие вероятности ошибок возникали при контроле методом только лазерного измерения, а наименьшие – при одновременном применении оптического и вихретокового и компенсирующего емкостного метода. Показано, что одновременное применение двух методов контроля для контроля одного и того же процесса, в частности процесса дефекта формы, позволяет не только повысить достоверность проводимого контроля путем его проведения на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние поверхности, – оптической характеристики детали, но и дает возможность спрогнозировать направление развития дефекта, развития торцевого биения, что повышает оперативность проводимого контроля.

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 триплетного синергетического комплексного щупа, самокомпенсированного за счет применения разностных преобразователей оптико-емкостно-вихретокового типа, путем доработки 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.

Результаты работы могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля формы, контура и шероховатости тел вращения, исследования вопросов микроперемещений, нанопревращения структуры материалов.

### III СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

#### *Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.8*

1. Епифанцев К.В. Исследование влияния угла наклона привода контурографа на результат конечных измерений: вектор совершенствования методики поверки / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. №4. С. 80-83.
2. Епифанцев К.В. Перспективы виртуализации и мультисенсоризации отечественных приборов для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. №4. С. 76-78.
3. Епифанцев К.В. Исследование оптических и вихретоковых датчиков для разработки отечественных мультисенсорных приборов / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. №5. С. 1-4.
4. Епифанцев К.В. Разработка приборов для контроля профиля поверхности подшипниковых узлов в Российской Федерации - стимул развития высокоскоростных установок / К.В. Епифанцев / Альманах современной метрологии. 2025. №2. С. 1-16.
5. Епифанцев К.В. Перспективы развития нормативной базы и эталонов для поверки мультисенсорных систем / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2025. №2. С. 138-140.
6. Епифанцев К.В. Статистический анализ влияния временных интервалов на результат измерения усилия на щупе кругломера RoundTest RA-120P / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. №2. С. 120-125.
7. Епифанцев К.В. Возможность применения бесконтактных датчиков для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. №2. С. 126-135.
8. Епифанцев К.В. Исследование процесса центрирования – выравнивания кругломеров MAHRFORM MMQ200 и ROUNDTEST RA 120P для потенциального импортозамещения / К.В. Епифанцев // Альманах современной метрологии. 2024. №1(37). С. 91-101.
9. Епифанцев К.В. Автоматизация и калибровка мультиплексной системы датчиков измерения дефектов и формы. / К.В. Епифанцев, О.В Куркова. // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. №10. С. 174-179.
10. Епифанцев К.В. Обзор отечественных инновационных методов производства приборов для контроля дефектов формы и профиля / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. №10. С. 168-174.
11. Епифанцев К.В. Исследование влияния угла наклона щупа и расположения точек касания на точность измерения кругломером ROUNDTEST RA- 120P. / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 6. С. 124-130.

12. Епифанцев К.В. Алгоритм введения компенсационных коэффициентов в кругломере. / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 2. С. 144-150.
13. Епифанцев К.В. Исследование алгоритма функционирования системы центрирования кругломера / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 2. С. 150-156.
14. Епифанцев К.В. Измерения дефектов формы с помощью кватернионных алгоритмов геометрического преобразования / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 4. С. 130-137.
15. Епифанцев К.В. Обоснование применения помехоподавляющей схемы бесконтактного датчика для измерения дефектов геометрии / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 4. С. 138-148.
16. Епифанцев К.В. Сравнительный анализ погрешностей, возникающих при измерении объектов на кругломере “ROUNDTEST” и видеоизмерительной машине “QUICK IMAGE” / К.В. Епифанцев // Альманах современной метрологии. 2023. №2. С. 111-120.
17. Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю. Исследование влияния базовой длины и отсечки шага на точность измерения шероховатости профилометром. / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Датчики и системы. 2023. №4-2. С.3-6
18. Епифанцев К. В. Исследование процесса апробации оптического датчика для замещения контактного щупа кругломера / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров, Г.А. Петров, А.С. Коновалов, С.А. Наумов // Датчики и системы. 2023. №4-2. С.59-61.
19. Епифанцев К.В. Результаты самокомпенсации кругломера Mahrform MMQ / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. №9. С. 140-142.
20. Епифанцев К.В. Формирование пакета данных координатных измерений на приборах контроля формы, контура, месторасположения. / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. №10. С. 128-133.
21. Епифанцев К.В. Анализ результатов измерения контура и формы от множества эталонов при калибровке / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. №10. С. 132-136.
22. Епифанцев К.В. Развитие машиностроительных стандартов нового поколения для реализации перспектив высокотехнологичной отрасли – «Индустрии 4.0» / К.В. Епифанцев // Альманах современной метрологии. 2022. № 2 (30). С. 102-116.
23. Епифанцев К.В. Методы калибровки контурографа и особенности проведения измерений на демозамене по компетенции «Цифровая метрология» / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Альманах современной метрологии. 2022. № 2 (30). С. 117-126.
24. Епифанцев К.В. Исследование процесса калибровка и настройки датчиков кругломера RoundTest RA-120P / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Датчики и системы. 2022. № 5 (264). С. 57-61.
25. Епифанцев К.В. Система геометрических допусков на изделия машиностроения и приборостроения. Проблемы развития инновационной группы зазоров и натягов / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 10 (221). С. 44-47.
26. Епифанцев К.В. Измерение дефектов геометрии. Алгоритм формирования круглограммы RoundTest RA-120P / К.В. Епифанцев // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2022. № 10 (221). С. 48-51.
27. Епифанцев К.В. Современные стандарты по ЕСКД и ЕСПД как вектор основных тенденций развития машиночитаемых документов / К.В. Епифанцев, Е.А. Фролова // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2022. Т. 22. № 4. С. 77-84.
28. Епифанцев К.В. Дистанционный контроль качества сварных соединений плёнок методом измерений дефектов системой искусственного интеллекта / А.С. Степашкина, К.В. Епифанцев, В.О. Смирнова, О.В. Чупринова, К.В. Золотухин // Альманах современной метрологии. 2022. №

4(32). С. 75-88.

29. Епифанцев К.В. Анализ программных пакетов, применяемых для автоматизации измерений / К.В. Епифанцев // Альманах современной метрологии. 2021. № 3 (27). С. 167-181.

30. Епифанцев К.В. Исследование чувствительности катушек индуктивности от выходного напряжения при измерении зависимости воздушного зазора / К.В. Епифанцев // Альманах современной метрологии. 2021. № 1 (25). С. 152-162.

***Статьи в изданиях, индексируемых Международных реферативных базах Web of Science и Scopus***

31. Epifantsev K. Improving MapReduce heterogeneous performance using KNN fair share scheduling / K. Kalia, S. Dixit, K. Kumar, V. John, N. Taskaeva, K. Epifantsev // Robotics and Autonomous System. 2022. Volume 157. 104228. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104228>.

32. Epifantsev K. Machine Learning for Prediction of Heat Pipe Effectiveness / A. Nair, P. Ramkumar, S. Mahadevan, C. Prakash, S. Dixit, G. Murali, N. Vatin, K. Epifantsev, K. Kumar // Energies. 2022. 15(9). 3276. <https://doi.org/10.3390/en15093276>.

33. Epifantsev K. Research of the methodology of the development of the demo exam in Russia and its aspects in the competence Digital metrology / K. Epifantsev, A. Suslin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1889(2). 022122. DOI 10.1088/1742-6596/1889/2/022122.

34. Epifantsev K. Possibilities of measuring roughness with the probe contact method and promising methods for improving the process / K.V. Epifantsev, T.P. Mishura // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2373. 072011. DOI 10.1088/1742-6596/2373/7/072011

***Патенты и свидетельства о государственной регистрации***

35. Свидетельство регистрации государственной программы для ЭВМ: «Программа для визуализации и подсчета результатов измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей оптическими методами» / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка № 2023612860 от 08.02.2023.

36. Свидетельство регистрации государственной программы для ЭВМ: «Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью преобразования Фурье для измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей» / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка № 2023616324 от 24.03.2023.

37. Свидетельство регистрации государственной программы для ЭВМ: «Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью функции Бесселя для измерения дефектов формы, месторасположения и биения» / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка №2023664436 от 05.07.2023.

38. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ: «Программа для адаптации измерений дефектов формы при преобразовании частотных и емкостных параметров электрической цепи» / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка №2024611413 от 22.01.2024.

39. Патент на полезную модель RU 232288 U1 от 05.03.2025: «Емкостной датчик для измерения линейных перемещений контролируемого объекта» / К.В. Епифанцев, А. Э. Егоров // Заявка № 2024134667 от 18.11.2024.

40. Свидетельство регистрации государственной программы для ЭВМ: «Программа для обмена сообщениями между пользователями в среде отходаоборота Wastemes» / К.В. Епифанцев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Заявка № 2019612213 от 05.02.2019.

*Статьи и материалы конференций*

41. Епифанцев К.В. Экспериментальное определение зависимости компенсационных коэффициентов кругломера от принудительных коэффициентов кругломера от принудительных пригрузов детали / К.В. Епифанцев // Экономика строительства. 2023. № 1. С. 100-105.
42. Епифанцев К.В. Исследование возможностей стабилизации напряжения на основе применения блока питания с микросхемой LM317T / К.В. Епифанцев // Экономика строительства. 2023. № 1. С. 112-117
43. Епифанцев К.В. Возможности профилометра TR 220 при оценке влияния царапин на органическом стекле на шероховатость его поверхности / К.В. Епифанцев // Инновации и инвестиции. 2021. № 11. С. 108-112.
44. Епифанцев К.В. Исследование аспектов гармонизации стандартов ISO для ЕСКД / К.В. Епифанцев // Инновации и инвестиции. 2021. № 12. С. 142-145.
45. Епифанцев К.В. Исследование зависимости шероховатости поверхности органического стекла от воздействия абразивных зерен различного размера на профилометре TR-220 / К.В. Епифанцев // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С. 205-209.
46. Епифанцев К.В. Возможности видеоизмерительных систем в аспекте меняющихся заданий региональных чемпионатов по стандартам WORLDSKILLS / К.В. Епифанцев // Среднее профессиональное образование: как учить и учиться в современном мире. Сборник докладов Всероссийской педагогической конференции, Санкт-Петербург, 13 апреля 2022 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С. 36-40.
47. Епифанцев К.В. Создание устойчивого развития импортозамещающих технологий на базе применения размерных элементов адаптированного вида / К.В. Епифанцев // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург, 09 ноября 2022 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С. 372-373.
48. Епифанцев К.В. Аспекты функций самокалибровки измерительных приборов / К.В. Епифанцев, П.А. Сергеева П.А. / Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10-11 ноября 2021 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. С. 185-187.
49. Епифанцев К.В. Расширение эталонной базы для поверки кругломеров на основе введения эталона осевого биения / К.В. Епифанцев // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С.18-20.
50. Епифанцев К.В. Анализ прототипов бесконтактных емкостных датчиков для измерения дефектов геометрии / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров// Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 52-54.
51. Епифанцев К.В., Проблемы калибровки кругломера ROUNDTEST RA-120P при подготовке к работе / К.В. Епифанцев, Е.А. Фролова, Н.Ю. Ефремов // За нами будущее: Сборник статей Первой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, приуроченной к 180-летию ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 8-10 июня 2022 года. Санкт-Петербург: ВНИИМ, 2022. С. 219-221.
52. Епифанцев К.В. Проблемы развития приборов для измерения шероховатости в России / К.В. Епифанцев // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем:

Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С. 249-251.

53. Епифанцев К.В. Особенности применения международных типов посадок для высокотехнологичных производств / К.В. Епифанцев // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 г. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С. 252-254.

54. Епифанцев К.В., Исследование влияния скорости трассировки на точность измерения шероховатости профилометром SurfTest SJ-410 / К.В., Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2. №3. С. 5-11.

55. Епифанцев К.В. Анализ прототипов бесконтактных емкостных датчиков для измерения дефектов геометрии. / К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 52-53.

56. Епифанцев К.В. Исследование процесса стабилизации входного напряжения блока питания кругломера путем совершенствования радиокомпонентной базы / К.В. Епифанцев, Г.К. Орлов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 54-55.

57. Епифанцев К.В. Разработка новых типов эталонов для калибровки кругломеров/ К.В. Епифанцев, А.В. Теппов, А.А. Микулина, И.А. Сотина // Научно-техническая конференция института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года: Сборник статей по материалам научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 06–10 февраля 2023 года. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. С. 173-178.

58. Епифанцев К.В. Проблемы создания и проблемы создания импортозамещенных приборов для измерения шероховатости, контроля формы и контура на примере бесконтактных датчиков / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, А.Э. Егоров // За нами будущее: Сборник статей Второй Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 14–16 июня 2023 года. Санкт-Петербург: ВНИИМ, 2023. С. 210-212.

59. Епифанцев К.В., Исследование оптического датчика кругломера / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVI Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 июня 2023 года. В 3-х частях. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. Часть 3. С. 137-141.

60. Епифанцев К.В. Разработка бесконтактного датчика для измерения дефектов геометрии на кругломерах / К.В. Епифанцев // Завалишинские чтения: Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 299-301.

61. Епифанцев К.В. Перспективы развития приборов и стандартов для измерения шероховатости / К.В. Епифанцев, Т.П. Мишура// Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVI Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 июня 2023 года. В 3-х частях. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. Часть 3. С. 174-178.

62. Епифанцев К.В. Исследование бесконтактного метода измерения дефектов формы и тел вращения / К.В. Епифанцев // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVI Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 июня 2023 года. В 3-х частях. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. Часть 3. С. 132-136.

63. Епифанцев К.В. Интерпретации системы координирующих размеров и размерных элементов КД /К.В. Епифанцев // Известия Самарского научного центра Российской академии

наук. 2021. Т. 23. № 6 (104). С. 52-55.

64. Епифанцев К.В. Проблемы настройки датчиков кругломера RoundTest RA-120P по углу наклона и высотным параметрам / К.В. Епифанцев // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2. № 5. С. 5-9.

65. Епифанцев К.В. Проблемы калибровки КИМ при анализе разбросов значений калибровочного щупа / К.В. Епифанцев // Инновации и инвестиции. 2023. № 11. С. 188-190.

66. Епифанцев К.В. Проектирование и эксплуатация оптического датчика для оснащения кругломеров при осуществлении контроля тел вращения / К.В. Епифанцев // Высокие технологии в машиностроении: Сборник трудов XX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 9–10 ноября 2023 г. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. – С. 126-130.

67. Епифанцев К.В. Анализ процессов скоростных режимов работы современных типов щупов для контурографов / К.В. Епифанцев // Экономика строительства. 2023. №11. С.73-75.

68. Епифанцев К.В. Стандартизация реверсивного инжиниринга как фактор устойчивого развития приборостроительной отрасли / К.В. Епифанцев, В.В.Окрепилов, Е.А. Фролова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 93-95.

69. Епифанцев К.В. Исследование алгоритма самокомпенсации кругломера «Mahrform MMQ 200» на детали с дисбалансом / К.В. Епифанцев // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 96-98.

70. Епифанцев К.В. Математический анализ кватернионных алгоритмов на кругломерах / К.В. Епифанцев // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 99-101.

71. Епифанцев К.В. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, В.Н. Белопухов, О.А. Заякин // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 1. С. 63–76.

72. Епифанцев К.В. Исследование алгоритма калибровки контурографа в процессе изменения базовых параметров / К.В. Епифанцев // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 176-179.

73. Епифанцев К.В. Автоматизация лазерной системы приборов измерения дефектов формы с помощью осциллографа и PZS-линейки / К.В. Епифанцев // Опыт и перспективы совершенствования систем связи и автоматизации: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–19 октября 2024 года. Санкт-Петербург: ОАО «НИИ «Масштаб», НИИ автоматической аппаратуры им. акад. В.С. Семенихина, ООО «Супервэйв Групп», 2024. С. 210-216.

74. Епифанцев К.В. Импортозамещенные приборы мультисенсорного вида как конкурентное направление в российской федерации / К.В. Епифанцев // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей VII Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 313-314.

75. Епифанцев К.В. Перспективы развития мультисенсорных систем и эталонов/ К.В. Епифанцев, Саурав Диксит, К. Р. Захарьян // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей VII Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 12-13.

76. Епифанцев К.В. Аспекты импортозамещения высокотехнологичной продукции в сфере метрологии / К.В. Епифанцев, Р.Н. Целмс, Н.Ю. Ефремов // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 133-134.

#### *Монографии*

77. Социально-экономическое развитие регионов. Под ред. академика РАН В.В.Окрепилова; Ин-т проблем региональной экономики РАН. М.Наука:2024. 492 с. Глава 8.5. //В.В. Окрепилов, Ю.А. Антохина, Е.А. Фролова, К.В. Епифанцев. Стандартизация в эпоху реверсивного инжиниринга: концепция уменьшения экономических затрат в приборостроении. С. 456-470.

78. Епифанцев К.В. Современные методы разработки приборов для бесконтактного измерения дефектов формы и контура: монография / К.В. Епифанцев. – СПб.: ГУАП, 2024. – 167 с.

#### *Учебные издания*

79. Епифанцев К.В. Цифровая метрология: учебное пособие // К.В. Епифанцев., Н.Ю. Ефремов, Е.А. Гущина. СПб.: ГУАП, 2022. 98 с.

80. Епифанцев К.В. Метрологическое обеспечение измерений при контроле шероховатости: учебно-методическое пособие / К.В. Епифанцев, Т.П. Мишура // Санкт-Петербург: ГУАП, 2022 – 42 с.

81. Епифанцев К.В. Методы комплексной подготовки специалистов для метрологического обеспечения импортозамещающих технологий: учебно-методическое пособие / К.В. Епифанцев, Р.Н. Целмс, Н.Ю. Ефремов // СПб.: ГУАП, 2024. – 92 с.