

ОТЗЫВ

оппонента на диссертацию Голыгина Николая Христофоровича «Оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений (МКСИ)», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.4 – приборы и методы измерения (по видам измерений)

Актуальность темы исследования.

Актуальность темы исследования, как отмечается в диссертации, автореферате и объективном положении дел в области координатной метрологии мобильных координатных средств измерений (МКСИ) заключается в том, что в условиях импортозамещения при использовании в критических технологиях отечественной промышленности, (при контроле пространственных координат на сложных объектах в соответствии с их математическими моделями *существуют проблемы и потребности исследований погрешности измерений (ПИ) ими* -(МКСИ) пространственных координат - декартовых (X, Y, Z) и сферических (L, β, γ) [длины L , горизонтальных β и вертикальных γ углов], *как в нормальных, так и в производственных условиях, в любой точке требуемого пространства измерений (!)*, где эксплуатационные свойства конечных изделий критически зависят от точности измерений координат *в любой точке* обрабатываемых поверхностей изделий. Отсюда, для повышения точности и достоверности измерений, соответствующей уровню современных высокотехнологичный производств возникает необходимость создания научно-технической основы для генерации эталонной системы пространственных координат для метрологического обслуживания и для исследований МКСИ в режиме прецизионного измерения пространственных координат, как важнейших показателей качества высокотехнологичных производств, где точность измерений координат является критическим определяющим фактором высоких эксплуатационных свойств крупно-габаритных изделий.

Степень разработанности темы.

Как отмечается в диссертации и автореферате, разработке методов и устройств для исследований оптико-электронных средств измерений посвящено значительное количество публикаций отечественных и зарубежных авторов (США, Великобритании, Германии, Японии, Южной Кореи, Испании). Диссертант приводит фамилии авторов публикаций и, по тексту диссертации- ссылки на их работы. Существуют международные нормативные документы по исследованию координатных средств измерений (ASME B89.4.19 (США), ISO 10360-10 и др.), в которых описаны методы исследований координатных средств измерений на заданном ограниченном пространстве, длин аттестованных артефактов, КИМ и др. Однако, как отмечает автор, в результате анализа этих документов, в них практически не затрагиваются вопросы, связанные с выявлением действительных значений погрешности измерений координат с помощью МКСИ *в любой точке заявленного пространства измерений, как в нормальных, так и в производственных условиях.*

Выполненные ранее, как отечественные, так и зарубежные, исследования нацелены на выявление погрешности измерений МКСИ *по двухточечной схеме* измерений (например, с помощью набора аттестованных по длине рабочих эталонов) в ограниченном количестве контролируемых точек, недостаточном при обеспечении точности измерений в критических прецизионных технологиях отечественного производства (для которых необходимо знание точности измерений координат *в любой точке 3D пространства*).

На основе анализа диссертации, автореферата и публикаций диссертанта, **научная новизна диссертации заключается** в создании, основанного на разработанных математических и физических моделях измерений:- теоретической ,научной базы метрологического обеспечения МКСИ и научно обоснованного программно-методического 3D-оптико-электронного комплекса, воспроизводящего эталонные сферические

координаты для исследований и передачи единицы длины и угла от первичных эталонов к МКСИ, обеспечивающего новые знания в части достижения современного уровня точности измерений в нормальных и производственных условиях, а также новой возможности использования его для исследований (как частного случая, вытекающего из метрологии 3D измерений) 1D МКСИ (одномерных, например, используемых в геодезии).

Теоретически обоснованный и механически реализованный оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений основан на новых научных разработках, обеспечивающих единство пространственных 1D÷3D измерений оптико-электронными координатными средствами измерений координат в любой точке пространства:

- методе с использованием двух линейных эталонных мер, расположенных параллельно, и на известном расстоянии от измерительного канала, исследуемого МКСИ, позволяющем максимально исключить влияние несоблюдения принципа Аббе первого рода при исследованиях с целью повышения точности измерений;
- методе умножения длины в измерительном канале МКСИ, позволяющем при коротких направляющих прямолинейного перемещения измерять длины вдвое больше перемещений линейного эталона и исключить влияние градиента температуры на точность измерений;
- методе исследований линейных измерительных систем МКСИ в диапазоне, до 48 метров, с одновременным использованием эталонных – инварного геодезического жезла и лазерного интерферометра (ЛИ), позволяющем уменьшить (компенсировать) влияние рефракции на интерференционные измерения (за счёт разных, отличающихся физических явлений, формирующих систематические погрешности при измерениях - интерференционных и с помощью материального рабочего эталона на базе инварного геодезического жезла);
- методах исследования циклической погрешности измерений, в любой точке заявленного пространства измерений;

- методах прецизионных измерений вертикальных размеров, в реальном масштабе времени и с привязкой к условиям реального производства;
- методе привязки угловых размеров к рабочему эталону - 24-хгранной призме и лазерному интерферометру (ЛИ), обеспечивающим воспроизведение эталонной горизонтальной угловой координаты 3D компаратора;
- методе исследований 2D МКСИ с использованием одного ЛИ;
- методе исследований вертикальных угловых измерительных систем с использованием линейной меры и координатно-чувствительного фотоприёмника;
- методе повышения точности исследований за счет обеспечения единой метрологической базы;
- методе привязки штрих-кодовых шкал к основанию рейки, обеспечивающем повышение точности измерений в геодезии;
- методе привязки горизонтальной и вертикальной проекции замкнутых полигонов к длине эталонного жезла, неподвижным маркам и углам эталонной призмы-многогранника;
- методе при исследованиях измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН) и штрих-кодовой рейкой, позволяющем контролировать и учитывать в производственных условиях поправки по результатам калибровки длины реек;
- трилатерационном методе исследований горизонтальных углов с композитным жезлом, в котором компенсируется влияние рефракции на длину эталона;
- методах исследований, исключающих влияние эксцентриситетов эталонной призмы и исследуемого МКСИ,
- методе повышения точности измерений на основе искусственной нейронной сети.

На основе новых математических моделей, усовершенствованных методов и средств их технической реализации разработана научно-техническая база методов и средств метрологического обеспечения для

исследований современных 1D÷3D мобильных координатных средств измерений, повышающая точность и расширение диапазонов прецизионных координатных измерений.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке математических моделей, алгоритмов и технологических принципов, позволяющих выполнять исследования МКСИ и применять их в дальнейшем внедрении для развития координатной метрологии и метрологического обеспечения.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, которые содержатся в диссертации, подтверждается внутренней непротиворечивостью результатов и логической целостностью работы, использованием значительного объема эмпирического материала, широкого представительства анализируемых научных публикаций и не вызывающих сомнения результатов исследований отечественных и зарубежных авторов, законодательных актов и нормативных документов. А также апробацией научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации на 26 всероссийских и международных конференциях. Всего по теме диссертации было проанализировано 178 источников, на основе анализа которых были сформулированы цели и задачи диссертации и новые решения, дающие новые научные знания в области координатной метрологии и метрологического обеспечения в данной области.

Теоретические исследования новых научных положений базируются на использовании современных методов теории математической статистики, теории измерений, обработки результатов измерений с помощью регрессионного анализа, аффинных преобразований, дискретного преобразования Фурье, разработанных алгоритмов искусственных нейронных

сетей и аналитической геометрии в пространстве, а также законодательной и прикладной метрологии. Исследования ПИ проводились методами математического моделирования, использовались программы для ЭВМ, заложенные производителями в МКСИ, а также разработанные в процессе выполнения данной работы. При создании образца оптико-электронного комплекса основное внимание уделено выявлению ПИ длин, горизонтальных и вертикальных углов, а также влиянию внешних условий на ПИ и взаимному расположению ортогональных координат.

Достоверность полученных результатов исследований новых теоретических положений подтверждены многократными практическими исследованиями

и обработкой их результатов разными методами, как при испытаниях и аттестации разработанного оптико-электронного комплекса аккредитованными

метрологическими службами Росстандарта, так и экспериментальных исследованиях МКСИ в нормальных и производственных условиях.

Результаты исследований опубликованы в доступных для широкой научной общественности научных изданиях, оригинальных 56 научных работах, в том

числе, в 22-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 16-ти изобретениях (в т.ч. три программы для ЭВМ), а также статьях в рецензируемых научно

технических сборниках и трудах всероссийских и международных конференций. Методологической основой решения задач диссертационной работы,

характеризующей степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации являются

результаты анализа опубликованных в оригинальных 56 научных работах данных: -теоретическое обобщение современных достижений в области

координатных измерений; -разработанные математические модели измерений и погрешностей измерений, алгоритмы, а также 13 патентов РФ и 3-х программ

для ЭВМ, созданных автором лично или в соавторстве.

Таким образом, можно сделать вывод, что научные положения, выводы и рекомендации, которые содержатся в диссертации Голыгина Н.Х. являются в достаточной степени обоснованными и достоверными.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения четырех глав, заключения, списка литературы из 178 наименований и Приложения, основная часть изложена на 205 стр., содержит 97 рисунков.

Содержание работы.

Во Введении диссертации обоснована актуальность генерации (воспроизведения) эталонных сферических координат, показывающая на реальных примерах необходимость выявления (определения и исследования) ПИ пространственных координат в неограниченном количестве исследуемых точек; сформулированы цель работы и задачи исследований; доказана необходимость создания эталонной системы координат для метрологического обеспечения мобильных координатных средств измерений, для использования их в критических технологиях отечественного производства, где точность

измерения координат крупногабаритных деталей машин и приборов существенно влияет на эксплуатационные характеристики их обработанных поверхностей.

В главе 1 дан анализ состояния вопроса обеспечения единства координатных измерений в широком диапазоне прямоугольных и сферических координат, выявлены и рассмотрены основные известные методы и средства исследований и метрологического обеспечения МКСИ, в т.ч. 3D координатных: лазерных трекеров, электронных тахеометров и др. Приведена структура влияющих факторов на погрешность измерений МКСИ. На основе анализа сформулированы требования к точности и диапазону воспроизведения и передачи единицы длины от исходных по точности эталонов области 3D координатных измерений рабочим эталонам и СИ в этом виде измерений.

В процессе анализа состояния вопроса обеспечения единства координатных измерений выявлен бюджет погрешности измерений с применением 1D÷3D МКСИ, зависящий от ПИ используемых рабочих эталонов, инструментальной ПИ МКСИ и отклонений внешних условий. Проведенные обзор и анализ состояния мобильных координатных средств измерений (МКСИ) в широком диапазоне длин и углов, а также их метрологического обеспечения, показали, что в настоящее время отсутствует единая универсальная и научно обоснованная база в составе оптико-электронного комплекса и его научно-методического обеспечения для метрологического обслуживания широкодиапазонных прецизионных координатных средств измерений.

Учитывая проведённый анализ состояния мобильных координатных средств измерений (МКСИ) в широком диапазоне длин и углов, диссертационная работа направлена на разработку методов и средств исследований, путем создания эталонной системы пространственных сферических координат оптико-электронного комплекса, создающего

единую пространственную систему эталонных координат и его научно-методического обеспечения.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому обоснованию создания эталонной системы пространственных координат, повышающей точность измерений при исследованиях и использовании в производстве 1D÷3D МКСИ. Для разработки методов исследования МКСИ в цеховых условиях, дан сравнительный анализ математических моделей и погрешности измерений лазерным интерферометром из-за рефракции в измерительном канале лазерного интерферометра на основе формул Эдлена, Сиддора-Хилла и по ГОСТ 8.353-96, а также на основе разработанной модели измерительной системы «перемещающийся инварный жезл + микроскопы».

Для создания научно-технических основ оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания МКСИ в теоретической части разработаны математические модели измерений длин, горизонтальных и вертикальных углов в сферической системе координат, а также дана оценка их погрешностей измерений и выявлены источники инструментальных и методических составляющих ПИ. Показано, что для обеспечения требуемой точности исследований МКСИ в заданных диапазонах измерений эталонная система должна обеспечить измерения угловых и линейных координат с одной установки МКСИ. Разработанные математические модели и реализованные на их основе схемы измерений позволяют выявить составляющие (систематические и случайные) суммарной ПИ дальномера, как в светодальномерном, так и интерференционном режимах измерений

В главе 3 на основе математической модели 3D измерений показано, что разработанный 3D пространственный компаратор может быть использован для метрологического обслуживания 1D МКСИ, измерительных систем с цифровыми нивелирами, где важно знать линейный размер от основания рейки до заданного отсчета по нивелиру.

В главе 4 приводится новая разработка оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания МКСИ, который механически реализует теоретически обоснованные в Главе 2 математические модели эталонных сферических координат (длины L , горизонтальных β и вертикальных γ углов с одной установки МКСИ в любой точке заявленного производителем пространства измерений и контроль ортогональности декартовых координат по маркам.

В главе 5 проведены экспериментальные исследования по установлению адекватности разработанных основных теоретических положений и математических моделей компараторов в составе оптико-электронного комплекса для его технической реализации, что подтверждает достоверность основных научных положений, полученных в диссертации.

В Заключение диссертации отмечено, что в диссертации решена важная научно-техническая проблема, заключающаяся в создании научно-технической базы для исследований (испытаний, калибровки, поверки, передачи единицы длины МКСИ) и компенсации (уменьшения в $2\div 3$ раза) систематической объемной погрешности МКСИ в сферической системе координат в любой точке пространства измерений, как в нормальных (лабораторных), так и рабочих (цеховых) условиях с целью метрологического обеспечения высокотехнологичных производств крупногабаритных изделий прецизионного машиностроения, где от точности изготовления изделий критически зависят их эксплуатационные свойства.

Рекомендации по использованию диссертационной работы.

Результаты диссертационных исследований могут быть рекомендованы для использования в региональных центрах стандартизации и метрологии при проведении испытаний с целью утверждения типа новых средств измерений, при поверке и калибровке современных мобильных координатных средств измерений, при производстве крупногабаритных изделий и деталей сложной формы согласно их математическим моделям, при освоении новых высокотехнологичных прецизионных производств, а также в учебном

процессе при подготовке специалистов в области метрологии и конструирования оптико-электронных средств измерений.

Замечания по диссертационной работе:

1. Диссертантом недостаточно полно проанализирован международный опыт метрологического обеспечения мобильных координатных средств измерений.
2. В работе и автореферате не в полной мере раскрыт бюджет суммарной погрешности измерений пространственных координат на разработанном оптико-электронном комплексе для исследований мобильных координатных средств измерений.
3. В диссертации указано, что в разработанном методе компенсации систематической погрешности из-за эксцентриситетов она устранялась путем исключения первой гармоники в спектре полученной погрешности исследований с использованием дискретного преобразования Фурье, однако, в данном методе компенсации необходимо учитывать также и постоянную составляющую $a_0/2$.
4. В работе не показано, каким образом использование гиперболического тангенса позволяет исключить грубые ошибки при обработке результатов исследований погрешности измеренных углов.

Заключение.

Диссертационная работа Голыгина Николая Христофоровича на тему: «Оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения по разработке оптико-электронного комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений и рекомендации по его использованию, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие теории и практики координатных

измерений сложнопрофильных объектов в критических отраслях промышленности. Диссертация соответствует всем требованиям (п.9,10,13,14), предъявляемым к докторским диссертациям, согласно «Положению о присуждении учёных степеней», утверждённому Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Голыгин Николай Христофорович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.4 приборы и методы измерения (по видам измерений).

Официальный оппонент:
Заведующий кафедрой
«Метрология и взаимозаменяемость»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Д.т.н., доцент



Комшин А.С.

16.01.2026

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005, г. Москва,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1
e-mail: komshin@bmstu.ru
Тел.: +7(499)263-66-33, доб. 4075

Подпись д.т.н., доцента, заведующего
кафедрой Комшина Александра Сергеевича
заверяю:



СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ОТДЕЛА КАДРОВОГО
АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
ХОДЫКИНА Л.Д.