

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУ ВО

«МИРЭА – Российский

технологический университет»

Д.Х.Н., проф. Прокопов Н.И.



Прокопов
12 января 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» на диссертацию соискателя **Голыгина Николая Христофоровича «Опτικο-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений)

Актуальность темы диссертации

В современных критических технологиях отечественной промышленности значительно увеличилось количество крупногабаритных изделий и объектов, имеющих сложную форму и сложную конструкцию. При этом с целью обеспечения их эксплуатационных показателей необходимо обеспечить точность измерений в широких диапазонах пространственных координат в производственных условиях, в любой точке заявленного пространства измерений. Требуемую точность измерений пространственных координат могут обеспечить лазерные трекеры и электронные тахеометры (в основном иностранного производства, имеющие свою фирменную систему метрологического обслуживания сервисных служб-ноу хау), далее

объединяемые общим названием-мобильные координатные средства измерений (МКСИ). Погрешность измерений указанными средствами измерений зависит от погрешности используемых в них угловых и линейных измерительных систем, основанных на разных физических принципах (интерференционных, растровых и др.), а также от изменения внешних (цеховых) условий в процессе измерений (температуры, давления, влажности). При этом производители МКСИ декларируют их метрологические характеристики для лабораторных (не цеховых) условий в конечном ограниченном количестве измеряемых длин, а не в любой точке рабочего объёма и как в нормальных (лабораторных) условиях, так и в цеховых условиях, что требуется при производстве сложнопрофильных крупногабаритных поверхностей на станках с ЧПУ.

Таким образом, актуальность темы исследования, как отмечается в диссертации, автореферате и объективном положении дел в области координатной метрологии мобильных координатных средств измерений (МКСИ) с точки зрения прикладных позиций 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 развития координатной метрологии как в части создания научно-технической основы для

генерации эталонной системы пространственных координат(являющейся мерилем при сравнении с измеренными МКСИ координатами) для метрологического обслуживания и для исследований МКСИ в режиме прецизионного измерения пространственных координат, так и прикладных вопросов метрологического обеспечения измерений координат в любой точке сложно-профильных поверхностей в нормальных и производственных условиях, как важнейших показателей качества высокотехнологичных производств, где точность измерений координат является критическим определяющим фактором высоких эксплуатационных свойств крупно-габаритных изделий.

Во исполнение решения задачи актуальности, в диссертации разработан оптико-электронный комплекс для исследований координатных средств измерений с помощью эталонной системы, генерирующей сферические координаты (длину радиуса-вектора, горизонтальные и вертикальные углы), позволяющий выявить погрешность измерений длин и углов в широких диапазонах в любой точке заявленного пространства измерений, как в нормальных, так и в цеховых условиях, научно-технические аспекты которого и является предметом рассмотрения данной диссертации

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения, списка литературы, включающего 178 наименований, изложена на 201 странице основного текста, содержит 97 рисунков.

Во введении автором обоснованы актуальность темы и необходимость выявления погрешности измерения мобильными координатными средствами измерений (МКСИ) пространственных координат в неограниченном количестве исследуемых точек, доказана необходимость создания оптико-электронного комплекса для исследований МКСИ, для их испытаний, поверки и калибровки, а также для использования результатов исследований в критических технологиях отечественного производства.

В первой главе проведен анализ методов и средств исследований координатных средств измерений и дана оценка возможности применения таких методов и средств для выявления точности измерений пространственных координат изделий сложной формы в машиностроении, атомной, авиационной и других отраслях отечественной промышленности. Показано, что в настоящее время в отечественной практике отсутствует научно-обоснованная методология метрологического обеспечения дорогостоящих мобильных координатных средств измерений (лазерных трекеров, электронных тахеометров, измерительных систем с цифровыми нивелирами и других), как в нормальных (лабораторных) условиях, так и в условиях реального производства. Доказана необходимость создания оптико-электронного комплекса, что особенно важно в современных условиях для импортозамещения (поскольку для зарубежных производителей вопрос метрологического обеспечения указанных мобильных координатных средств измерений-МКСИ, является предметом ноу хау сервисных служб фирм).

Во второй главе Во исполнение научных исследований погрешностей МКСИ в условиях реального производства, выявлено влияние градиента температуры при разных его отклонениях и влиянии на интерференционные и материальные эталоны длины, разработана методология исследований сферических координат для 3D мобильных координатных средств измерений (МКСИ), описаны разработанные применительно к условиям отечественного производства линейные и угловые компараторы, объединенные общей функциональной зависимостью в оптико-электронный комплекс (ОЭК) для контроля линейности шкал МКСИ и ортогональности его прямоугольных координат в соответствии с отечественными и международными нормативными документами, а также разработаны методы обработки результатов измерений на основе аффинных преобразований, дискретного преобразования Фурье и построения искусственной нейронной сети, позволяющие в результате калибровки устранять методические погрешности из результатов исследований.

В третьей главе на основе созданного оптико-электронного комплекса разработаны методы и средства исследований 1D (как частный случай общей методологии 3D измерительных систем) измерительных геодезических систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН), позволяющие с привязкой к основанию рейки выполнять калибровку ИСЦН, проводить исследования приближенно к производственным условиям с контролем и введением поправок за калибровку.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические исследования в соответствии с разработанными во второй и третьей главах математическими моделями измерений (исследование погрешности измерений до 48-ми метров на 24-х метровом линейном компараторе, горизонтальных углов в диапазоне $0\div 360^\circ$, вертикальных углов в диапазоне $\pm 50^\circ$, выполнена аттестация модернизированного линейного компаратора с помощью исходного по точности пространственного эталона – лазерного трессера фирмы «Etalon» (Германия) и угловых компараторов с помощью лазерного интерферометра и электронного тахеометра 1-го разряда.

В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК. Текст диссертации в достаточной мере сопровождается поясняющими иллюстрациями. Автореферат и публикации в полной мере отражают основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы. Диссертационная работа имеет достаточную степень апробации.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Диссертация и научные результаты, выносимые на защиту, соответствуют теме исследования и заявленной научной специальности 2.2.4 – «Приборы и методы измерения (по видам измерений)» по следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1 Создание новых научных, технических и нормативно-технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанных с измерениями механических величин, времени и частоты, тепловых величин, электрических и магнитных величин, аналитических и структурно аналитических величин (состава, свойств и структуры веществ и материалов),

п. 5 Разработка или совершенствование существующих методов и способов обеспечения единства измерений в области измерений, относящихся к п. 1.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат содержит общую характеристику работы, основное ее содержание, заключение и список работ, опубликованных по теме диссертации, раскрывает основные положения работы, выводы и рекомендации и в целом соответствует диссертации и основным научным публикациям диссертанта.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

На основе изучения диссертации, автореферата и основных публикаций диссертанта установлено, что лично автором разработаны научно-технические и технологические решения, включающие научно-обоснованные методы, устройства, алгоритмы и программы для ЭВМ, в соответствии с которыми реализован пространственный оптико-электронный комплекс для исследований МКСИ:

- предложен и практически реализован метод с использованием двух эталонных мер, расположенных параллельно и на известном расстоянии от измерительного канала исследуемого МКСИ, позволяющий исключить влияние на точность измерений погрешности Аббе 1-го рода;

- предложен метод умножения перемещений в измерительном канале МКСИ, позволяющий выполнять исследования больших линейных размеров, при этом диапазон исследований длины МКСИ в два раза больше перемещения линейного эталона, и повышающий точность исследований за счет уменьшения длины направляющих прямолинейного перемещения каретки с эталоном и учета внешних условий;

– предложен метод исследований МКСИ с одновременным использованием эталонного инварного жезла и лазерного интерферометра, позволяющий исключить влияние на погрешность исследований кратковременных отклонений температуры в зоне измерений;

– предложен трилатерационный метод исследований вертикальных углов, линейных размеров и перемещений, позволяющий по предварительно откалиброванной по длине линейной измерительной системе повысить точность исследований;

– в соавторстве предложен метод исследований измерительных систем «цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка с двумя пятками», позволяющий учитывать результаты исследований в полевых условиях;

– в соавторстве разработан нейросетевой алгоритм на основе гиперболического тангенса, позволяющий сократить количество итераций при обработке результатов исследований и аппроксимировать полученную функцию систематической погрешности исследуемых МКСИ;

– разработана и реализована оригинальная методика определения поправок, использующаяся в производстве для учета поправок при нивелировании измерительными системами с цифровым нивелиром;

– в соавторстве разработаны компараторы для исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных преобразователей перемещений, используемых в МКСИ, а также измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН).

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов обосновывается применением математических и программных методов решения прикладных задач, разработанных и запатентованных программ для ЭВМ, подтверждением результатов экспериментальными измерениями разными методами, а также применением аттестованного измерительного оборудования и методик измерения при проведении экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов для развития координатной теоретической и прикладной метрологии и метрологического обеспечения координатных измерений МКСИ в сферической системе координат.

Теоретическая значимость заключается в разработке математических моделей, алгоритмов и технологических принципов, позволяющих выполнять квалификационные исследования МКСИ в сферической системе координат и применять их для развития координатной метрологии, как прикладной науки в целом. Практическая значимость полученных автором диссертации результатов работы для науки и технологий состоит в том, что выполненные исследования и разработки позволяют повысить точность измерений пространственных координат точек сложных изделий путем выявления и компенсации систематических и минимизации случайных составляющих погрешностей МКСИ. В целом, теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов является научно-технической основой как для теоретического метрологического обеспечения измерений пространственных координат и метрологического обслуживания исследований МКСИ в режиме прецизионного измерения пространственных координат, так и прикладных вопросов метрологического обеспечения измерений координат в любой точке сложнопрофильных поверхностей в нормальных и производственных условиях, как важнейших показателей качества высокотехнологичных производств, где точность измерений координат является критическим определяющим фактором высоких эксплуатационных свойств крупногабаритных изделий.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Под руководством автора данной диссертации в рамках хоздоговора была разработана Программа по измерению координат точек откалиброванным на оптико-электронном комплексе лазерным трекером (более 200 точек) самолета с целью определения положений основных его

осей, определяющих тангаж, крен и рыскание, позволившая выполнить измерения с коэффициентом запаса, равным двум относительно допуска 0,5 мм в реальных условиях производства. В части конкретных рекомендаций по использованию результатов и выводов диссертации, может быть предложено внедрение и развитие указанной Программы по измерению координат точек откалиброванным на оптико-электронном комплексе лазерным трекером (более 200 точек) самолета с целью определения положений основных его осей, определяющих тангаж, крен и рыскание, позволившая выполнить измерения с коэффициентом запаса, равным двум относительно допуска 0,5 мм в реальных условиях производства.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при контроле параметров турбинных лопаток, ступеней для производства деталей сложной формы в судостроении, взаимного расположения отдельных элементов крупногабаритных изделий, например, осей самолетов. 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.

Новизна полученных результатов

Научная новизна диссертации заключается в создании обобщенной методологии координатных измерений, основанной на математических и физических моделях измерений и погрешностей измерений 3D-оптико-электронного комплекса, генерирующего эталонные сферические координаты для исследований и передачи единицы длины и угла от первичных эталонов к

МКСИ, обеспечивающего современный уровень точности измерений в нормальных и производственных условиях.

Замечания по диссертационной работе

По диссертации и автореферату можно сделать следующие замечания.

1. В тексте диссертации отсутствует полный бюджет погрешности измерений координат на разработанном оптико-электронном комплексе, при этом приводятся ссылки на иностранные источники информации об их большом количестве (порядка 100).

2. Отсутствуют результаты аттестации вертикального компаратора, при этом приводятся возможные методы аттестации с помощью лазерного интерферометра, трессера и трилатерационным методом.

3. В диссертации приведены результаты исследований влияния температуры на точность измерений только в пределах $15\div 27^\circ$, что недостаточно при исследованиях с целью утверждения типа указанных средств измерений.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение по диссертации

В соответствии с п. 10 Положения о порядке присуждения ученых степеней диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты. В диссертации имеются сведения о практическом применении полученных автором диссертации научных результатов.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 22-х рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, что соответствует п.11 и п.13 Положения о присуждении ученых степеней, а также защищены 13-ю патентами на изобретения и 3-я программами для ЭВМ.

Диссертация Голыгина Николая Христофоровича на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные методы и технические решения, позволяющие повысить эффективность и расширить область применения современных мобильных 1D÷3D координатных средств измерений при измерении объектов сложной формы и конструкции в машиностроении и приборостроении и в других отраслях производства, на основе установления совокупности факторов, действующих в процессе измерения и влияющих на погрешность измерения, установления и исследования причин и механизма их влияния и разработки методик выполнения измерений, обеспечивающих уменьшение погрешности измерения, что соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) и рекомендуется к защите.

Отзыв на диссертационную работу Голыгина Николая Христофоровича рассмотрен и одобрен на заседании кафедры метрологии и стандартизации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 19 января 2025 года (протокол № 6).

И.о. зав. кафедрой метрологии
и стандартизации, к.т.н.

К.Н. Фазилова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, г. Москва, проспект Вернадского, д.78
Телефон +7 (499) 600-80-80 доб. 25092, e-mail: fazilova@mirea.ru

