

В диссертационный совет Д 32.1.009.01 при Федеральном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии Ростест (ФБУ НИЦ ПМ Ростест)».

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., с.н.с. Серкова Николая Алексеевича на диссертационную работу Голыгина Николая Христофоровича на тему «Оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.4 – приборы и методы измерения (по видам измерений).

Актуальность работы

Диссертационная работа Голыгина Н.Х. посвящена созданию оптико-электронного комплекса для исследований точности мобильных координатных средств измерений (МКСИ).

В отечественной промышленности широко востребованы высокоточные многокоординатные средства измерений нового поколения для контроля координат точек поверхностей изделий в соответствии с их математическими моделями (крупногабаритных турбинных лопаток, фюзеляжей самолетов, ступеней и корпусов судов, корпусов ракетно-космической техники и др.).

Создание оптико-электронного комплекса для исследований точности мобильных координатных средств измерений, включающих испытания, калибровку, поверку, передачу единицы длины и компенсацию выявляемых систематических объемных погрешностей в любой точке пространства измерений, необходимо для развития метрологического обеспечения высокотехнологичных производств крупногабаритных изделий современного машиностроения.

Поэтому **актуальность** направлений исследований диссертационной работы Голыгина Николая Христофоровича «Оптико-электронный комплекс

для исследований мобильных координатных средств измерений» **не вызывает сомнений.**

Характеристика работы

Во введении диссертант сформулировал цель работы и задачи исследований, показал необходимость создания оптико-электронного комплекса для исследований точности мобильных координатных средств измерений и отработки методик метрологического обеспечения производств, использующих мобильные координатные средства измерений.

В главе 1 диссертант провел анализ состояния вопроса обеспечения единства координатных измерений в декартовой системе и в системе сферических координат. Рассмотрел основные методы и средства исследований и метрологического обеспечения МКСИ, в т.ч. 3D координатных: лазерных треков, электронных тахеометров и др., а также измерительных систем для определения вертикальных размеров, в т.ч. 2D измерительных систем типа «цифровой нивелир + штрих кодовые рейки», привел структуру влияющих факторов на погрешность измерений МКСИ. На основе анализа сформулировал 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 диссертант исследовал бюджет погрешности измерений с применением $1D \div 3D$ МКСИ, зависящий от погрешностей измерения (ПИ) используемых рабочих эталонов, инструментальной ПИ МКСИ (используемых угловых и линейных измерительных преобразователей перемещений) и отклонений параметров внешней среды.

На основе анализа бюджета погрешностей измерений МКСИ диссертантом показано, что существенными источниками ПИ является:

- ПИ, связанные со старением элементной базы МКСИ,
- изменяющиеся со временем внутришаговые детерминированные высокочастотные ПИ, связанные с интерполяцией, квантованием по уровню и дискретизацией по диапазону измерений измерительных сигналов.

В главе 2 на основе разработанных математических моделей измерений

длин, горизонтальных и вертикальных углов, а также оценки их погрешностей измерений диссертант обосновал создание измерительной системы в виде оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания мобильных координатных средств измерений, состоящий из четырех компараторов:

- линейного оптико-механического компаратора с инварным 3-х метровым эталонным жезлом и лазерным интерферометром (измеряющих линейную координату L сферической 3D системы координат $[L, \beta, \gamma]$),

- компараторов для исследований горизонтальных β и вертикальных γ углов и превышений,

- компаратора на основе композитного жезла и лазерного интерферометра для выявления короткопериодических ПИ горизонтальных и вертикальных углов,

- 28 марок, расположенных на изолированных фундаментах, для оценки ортогональности декартовых координат, контроля результатов исследований и привязки к первичным эталонам длины и угла.

Согласно разработанной диссертантом конструкции, вертикальная ось исследуемого МКСИ располагается соосно с осью эталонной призмы, расположенной на горизонтальном угловом компараторе, визирная ось совпадает с осью эталонного жезла. Схема расположения отдельных компараторов оптико-электронного комплекса разработана и реализована диссертантом.

Для линейного компаратора с целью исключения систематической ПИ, связанной с устранением влияния погрешности Аббе второго рода, диссертантом разработана математическая модель, описывающая связь между линейными перемещениями отражателя МКСИ и двумя рабочими эталонами (жезлами или интерферометрами), оси которых расположены параллельно измерительной оси МКСИ и на известных расстояниях от неё.

При модернизации линейного оптико-механического компаратора МИ-ИГАиК этот метод был доработан диссертантом для исследований МКСИ на 24-х метровом оптико-механическом компараторе в диапазоне измерения длин до 48-ми метров при этом отражатель МКСИ располагался неподвижно рядом с МКСИ, а на каретке устанавливался уголкового отражатель, поворачивающий луч в измерительном канале на 180° .

В главе 3 диссертант, на основе математической модели 3D измерений показал, что разработанный 3D пространственный компаратор (в частном случае, в геодезии) 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.

Разработанные методы позволяют уменьшить погрешность измерений за счет введения поправок в результаты производственных измерений до значений $\Delta(H) \leq 20$ мкм.

В главе 4 диссертант подробно описывает модернизированный по результатам теоретических исследований, представленных в главе 2, оптико-электронный комплекс (ОМК) для метрологического обслуживания МКСИ.

Модернизация линейного оптико-механического компаратора ОМК МИ-ИГАиК состояла в увеличении диапазона измерений с 24-х метров до 48-ми метров.

Угловая сферическая координата β реализована на горизонтальном угловом компараторе при одновременном использовании трех автоколлиматоров (два отслеживают горизонтальный угол, один следит за отклонением вертикального угла), направленных на грани призмы-многогранника. Это позволяет исключить систематические погрешности в эталонной системе сферических координат.

Угловая координата γ осуществлена на автоматизированном линейном вертикальном компараторе с «эталонным» лазерным интерферометром. Измерение угловой координаты γ проводится трилатерационным методом при известных поправках на калибровку линейной измерительной системы МКСИ.

Разработанная диссертантом методика исследований 3D средств измерений на МКСИ состоит из следующих этапов:

- на линейном горизонтальном 24-х метровом компараторе выполняется исследование (калибровка) дальномеров МКСИ в интерференционном и светодально-мерном режимах измерений по инварному жезлу и лазерному интерферометру с выявлением короткопериодической ПИ в диапазоне измерений до 24-х и до 48-ми метров;
- на горизонтальном угловом компараторе по эталонной 24-х гранной

призме через 15° выполняется исследование (калибровка) горизонтального угла $\Delta(\beta)$ МКСИ;

- в зависимости от цели исследований, полученной $\Delta(\beta)$ и заданной точности измерений выбирается метод обработки результатов измерений;

- по откалиброванному по призме измерительному преобразователю угла, расположенному соосно с призмой, или методом трилатерации по откалиброванному по длине исследуемому МКСИ и эталонному лазерному интерферометру, установленному на компараторе с композитным жезлом, с использованием теоремы косинусов, выявляется короткопериодическая детерминированная погрешность измерений (ПИ) $\Delta(\beta)$ горизонтального угла β ;

- по вертикальному компаратору с лазерным интерферометром и откалиброванному по длине МКСИ, аналогично методом трилатерации выявляются короткопериодическая погрешность измерений (ПИ) $\Delta(\gamma)$ вертикального угла γ ;

- измеряются координаты марок и проверяются их допустимые значения.

Представленные в данной главе результаты аттестации показали адекватность разработанных основных теоретических положений и математических моделей компараторов в составе оптико-электронного комплекса.

Были проведены:

- Аттестация линейного компаратора МКСИ. Аттестация выполнялась с помощью специального первичного эталона длины – лазерного трессера фирмы «Etalon» (Германия). ПИ лазерного трессера заявлены производителем и подтверждены ВНИИМом

$$\pm (0,2 \text{ мкм} + 0,3 \text{ мкм/м})$$

Результаты аттестации показали, что ПИ в четыре раза меньше заявленного допуска на линейный компаратор, при этом случайная ПИ в диапазоне измерений до 21 метра не превысила ± 4 мкм.

- Исследование погрешности измерения длины при совмещении осей исследуемого МКСИ и эталонного лазерного интерферометра. ПИ исследуемого МКСИ при исключении влияния рефракции не превышает 0,2 мкм.

- Исследование ПИ длины в диапазоне до 48-ми метров. Мультипликативная ПИ в схеме с удвоенным перемещением в измерительном канале исследуемого МКСИ по сравнению с эталонным жезлом отсутствует, что подтверждает адекватность разработанной математической модели с удвоением диапазона перемещения отражателя МКСИ по сравнению с длиной перемещения эталона, при этом обеспечивается коэффициент охвата более 2-х.

Научная новизна диссертации заключается в создании теоретических и экспериментальных основ построения 3D-оптико-электронного комплекса с использованием первичных эталонов, работающего в сферической системе координат, и предназначенного для проведения исследований точности измерений МКСИ с целью создания СИ для поверки и калибровки современных координатно-измерительных приборов, в частности, лазерных трекеров.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке математических моделей, алгоритмов и технологии измерений точностных параметров оборудования, рабочие органы которого совершают сложные пространственные движения, в частности, в сферической системе координат.

Практическая значимость работы состоит в повышении точности измерений пространственных координат точек поверхностей сложных изделий. Алгоритмы расчета ПИ использованы в поверочной установке МИИГАиК УМК-М, прошедшей испытания в целях утверждения типа (№24762 в Госреестре средств измерений), на основе которой метрологическая служба МИИГАиК была аккредитована на право поверки и калибровки 1D÷3D МКСИ (лазерных трекеров, наземных сканеров, электронных тахеометров, измерительных систем с цифровыми нивелирами и др. 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.

Методы исследований.

Диссертант широко использует разработанные математические модели измерений отклонений линейных и угловых размеров, алгоритмы, а также 13

патентов РФ и 3-х программ для ЭВМ.

Теоретические исследования диссертанта 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, и главное - **основ законодательной и прикладной метрологии.**

Достоверность полученных результатов диссертации обеспечивается:

- многократными экспериментальными исследованиями и обработкой результатов разными методами, как при испытаниях и аттестации разработанного оптико-электронного комплекса аккредитованными метрологическими службами Росстандарта, так и при экспериментальных исследованиях МКСИ;
- применением фундаментальных положений механики и метрологии;
- измерениями на современном измерительном оборудовании;

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 28 международных, всероссийских и отраслевых научных и научно-технических конференциях.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 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 научно-технических сборниках и трудах всероссийских и международных конференций.

Замечания по диссертационной работе

К работе имеются замечания.

1. В автореферате не отмечены имеющиеся в настоящее время отечественные методы и средства исследования мобильных координатных средств измерения.

2. Непонятно, по какому принципу расположены контрольные марки для проверки ортогональности декартовых координат

3. Не ясно, что практически дает разработанная для угловых исследований нейронная сеть?

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку научного уровня и практической ценности диссертационной работы.

Заключение. Диссертационная работа Голыгина Николая Христофоровича на тему: «Оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения по разработке оптико-электронного комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений и рекомендации по его использованию. 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,
ведущий научный сотрудник
лаборатории вибротехнических систем
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук
д.т.н., с.н.с.



Сериков Николай Алексеевич

19.01.2026

Подпись заверяю

Контакты: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН)

101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., дом 4, тел. +7(495) 628-87-30, e-mail: info@imash.ru