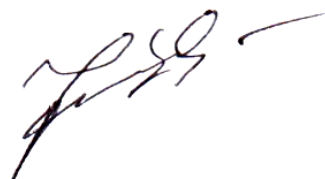


На правах рукописи



ГОЛЫГИН НИКОЛАЙ ХРИСТОФОРОВИЧ

**Оптико-электронный комплекс для исследований мобильных
координатных средств измерений**

Специальность 2.2.4 – приборы и методы измерения (по видам измерений)

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

Москва

2025 год

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» и ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС)»

Научный консультант: **Лысенко Валерий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФБУ «НИЦ ПМ - Ростест»

Официальные оппоненты: **Серков Николай Алексеевич**
докт. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник отдела «Механики машин и управления машинами» ФГБУ науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова»

Комшин Александр Сергеевич
докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой МТ-4 «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Мастеренко Дмитрий Александрович
докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Измерительных информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ СТАНКИН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Защита диссертации состоится «04» февраля 2026 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 32.1.009.01 при Федеральном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии - Ростест (ФБУ НИЦ ПМ - Ростест)» по адресу: 119361, г. Москва, ул. Озёрная д.46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФБУ «НИЦ ПМ-Ростест»

Автореферат разослан «____» _____ 202 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лысенко В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях импортозамещения при использовании в критических технологиях отечественной промышленности, а также при создании новых высокотехнологичных производств прецизионного машиностроения, авиакосмической, судостроительной, атомной, энергетической промышленности, оборонно-промышленного комплекса страны (при контроле пространственных координат на сложных объектах в соответствии с их математическими моделями, например, параметров крупногабаритных турбинных лопаток, зубчатых колес, отклонений формы и расположения отдельных элементов, при определении взаимного расположения основных осей самолета, прецизионных габаритов судов, элементы атомных реакторов и т.д.) и в геодезии лазерных мобильных 1D÷3D координатных оптико-электронных средств измерений (МКСИ) актуальными являются вопросы исследований погрешности измерений (ПИ) ими 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 (показатели) конечных изделий существенно (критически) зависят от точности измерений координат обрабатываемых поверхностей изделий.

Отсюда, для повышения точности измерений, соответствующей уровню современных высокотехнологичных производств (с их критической зависимостью эксплуатационных показателей продукции от высокой точности измерений) 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. Разработке методов и устройств для исследова-

ний оптико-электронных средств измерений посвящено значительное количество публикаций зарубежных авторов (США, Южной Кореи, Германии, Испании). Среди отечественных авторов нужно отметить работы, выполненные учеными и исследователями в МИИГАиК под руководством профессоров Плотникова В.С., Якушенкова Ю.Г. и Парвулюсова Ю.Б., в ЦНИИГАиК Спи-ридоновым А.И. Исследованию МКСИ также посвящены труды проф. Солома-тина В.А. и к.т.н. Шилина В.А. (МИИГАиК), к.т.н. Митрофанова С.С. (ЛИТМО), д.т.н. Преснухина Л.Н. и Мироненко А.В. (МВТУ им. Н.Э. Баумана), д.т.н. Турухано Б.Г. (ЛИЯФ), д.т.н. Лысенко В.Г. (ВНИИМС), д.т.н. Телешевского В.И. и к.т.н. Серебрякова В.П. (СТАНКИН) и др.

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, 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).

Цели и задачи исследований.

Целью данной диссертации является создание научно-технической основы для механической реализации генерации (воспроизведения) эталонной системы пространственных координат для метрологического обслуживания и исследований прецизионных 1D÷3D мобильных координатных средств

измерений: испытаний, калибровки, поверки, передачи единицы длины к МКСИ и компенсации (уменьшения в $2\div 3$ раза) систематической и минимизации случайной погрешностей МКСИ в сферической системе координат в любой точке заявленного пространства измерений, как в нормальных (лабораторных), так и в производственных (цеховых) условиях высокотехнологичных производств крупногабаритных сложно-профильных изделий прецизионного машиностроения, в космической, автомобильной, атомной, авиационной, оборонной, приборостроительной промышленности, геодезии и других отраслях реального сектора экономики, где от точности измерений координат обработанных поверхностей при изготовлении изделий критически зависят их эксплуатационные свойства.

Для достижения сформулированной выше цели в диссертации были поставлены следующие **основные задачи**:

1. На основе разработанных в диссертации математических моделей измерений современными $1D\div 3D$ координатными средствами измерений теоретически обосновать требования к эталонной системе координат для их исследований и на ее основе сформулировать требования к оптико-электронному комплексу (его метрологическим характеристикам – погрешностям измерения длин и углов) для исследований МУСИ.
2. На основе анализа сформулированного бюджета погрешностей, выявить влияние инструментальных, методических составляющих погрешностей и погрешностей внешних условий на результаты измерений при метрологическом обслуживании оптико-электронных МКСИ.
3. Разработать методы и устройства (средства) в составе оптико-электронного комплекса для исследований $3D$ координатных МКСИ, позволяющие выявлять (определять (и исследовать)) их метрологические характеристики (погрешности измерений длин и углов), как в лабораторных, так и в производственных (цеховых) условиях, в любой точке (рабочего) пространства измерений.
4. Разработать методы и устройства (средства) в составе оптико-электронного комплекса для исследований $1D$ координатных МКСИ (как следствие

распространения теории 3D координатных измерений на специфику геодезических измерений), позволяющие выявлять их метрологические характеристики, как в лабораторных, так и в производственных условиях в любой точке пространства измерений.

5. Разработать методы, средства и алгоритмы минимизации случайных и компенсации систематических аппаратных и методических составляющих погрешностей измерений (ПИ) при создании (специальных) рабочих эталонов линейных и угловых величин, обеспечивающих требуемый уровень точности их воспроизведения.

6. Выполнить экспериментальные исследования по подтверждению адекватности разработанных математических моделей их физическому аналогу- созданному оптико-электронному комплексу для исследований 1D÷3D координатных средств измерений (МКСИ).

Научная новизна диссертации заключается в создании, основанного на разработанных математических и физических моделях измерений, (научно обоснованного) программно-методического 3D-оптико-электронного комплекса, генерирующего (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 1D МКСИ.

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 с помощью привязки результатов линейных и угловых измерений к соответствующим эталонам, регламентированной соответствующими поверочными схемами

(к интерферометру перемещений в составе ГЭТ 192, эталонному геодезическому жезлу 1-го разряда, эталонной 24-гранной призме 1-го разряда):

- 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 (особенно при коротких направляющих не всегда возможно совместить на одной линии оси исследуемого МКСИ и эталона) с целью повышения точности измерений [1, 20, 21];
- методе умножения длины в измерительном канале МКСИ, позволяющем при коротких направляющих прямолинейного перемещения измерять длины (линейные координаты сферической системы координат) вдвое больше перемещений линейного эталона и исключить влияние градиента температуры на точность измерений [21];
- 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) [18, 21, 22];
- методах исследования циклической погрешности измерений, позволяющих получить информацию о погрешности измерений в любой точке заявленного пространства измерений [6];
- методах прецизионных измерений вертикальных размеров, позволяющих выполнять объективный контроль размеров в реальном масштабе времени и с привязкой к условиям реального производства [30, 36];
- методе привязки угловых размеров к рабочему эталону - 24-хгранной призме 1-го разряда и эталонному лазерному интерферометру (ЛИ), обеспечивающим генерацию (воспроизведение) эталонной горизонтальной угловой координаты 3D компаратора [7, 18, 21, 27];
- методе исследований 2D МКСИ с использованием одного ЛИ [27];

- методе исследований вертикальных угловых измерительных систем с использованием линейной меры и координатно-чувствительного приемника излучения [2, 3, 9];
- методе повышения точности исследований за счет обеспечения единой метрологической базы (одной установки МКСИ при исследованиях его линейных, вертикальных и горизонтальных угловых параметров в сферической системе координат) [1, 8, 18, 21, 33];
- методе привязки штрих-кодовых шкал к опорной пятке (основанию) рейки, обеспечивающем повышение точности за счет контроля результатов полевых измерений в геодезии [5, 10, 17, 26, 28, 30];
- методе привязки горизонтальной и вертикальной проекции замкнутых полигонов к длине эталонного жезла, неподвижным маркам и углам эталонной призмы-многогранника [27];
- методе при исследованиях измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН) и штрих-кодовой рейкой с двумя пятками, позволяющем контролировать и учитывать в производственных условиях поправки по результатам калибровки длины реек (как распространении разработанной общей методологии 3D измерений на 1D измерения в геодезии) [30],
- трилатерационном методе исследований горизонтальных углов с композитным жезлом, в котором компенсируется (минимизируется) влияние рефракции на длину эталона [23, 24],
- методы исследований, исключаящие влияние эксцентриситетов эталонной призмы и исследуемого МКСИ [31, 34, 35],
- методе повышения точности измерений на основе искусственной нейронной сети [4, 8, 18].

Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность ухода от двухточечной схемы измерения (поверки, калибровки) для трехкоординатных средств измерений с помощью набора концевых мер, отличающаяся от измерения длины линий в пространстве тем, что определяются сферические и декартовы координаты в любой точке заявленного пространства измерений.

На основе разработанных математических моделей и 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 квалификационные исследования МКСИ и применять их для развития координатной метрологии.

Практическая значимость работы 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 настоящее время разработанные угловые и линейные компараторы и алгоритмы расчета ПИ использованы, в том числе, 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.). Для предприятий отечественной промышленности на требуемом современном уровне точности измерений, было исследовано, поверено и откалибровано более 100 лазерных трекеров и измерительных систем с цифровыми нивелирами. 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.

Методология и методы исследований. Методологической основой реше-

ния задач диссертационной работы являются:

-результаты анализа опубликованных 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. Теоретические исследования 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.

Теоретически установлены на математических моделях и экспериментально доказаны **новые научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Изобретённый метод генерации эталонной линейной шкалы измерения пространственных координат на горизонтальном линейном компараторе с двумя эталонными мерами (жезлами или лазерными интерферометрами), оси которых расположены на известных расстояниях от измерительной оси исследуемого МКСИ, **позволяет уменьшить** наиболее значимые погрешности исследований (измерений) за счет устранения влияний отклонений от прямолинейности перемещения отражателя МКСИ и соблюдения принципа Аббе с 4 мкм до 0,2 мкм [[1,20,39,40];

2. Изобретённый метод генерации (воспроизведения) эталонной линейной шкалы измерения пространственных координат на горизонтальном линейном

компараторе, разработанный на основе метода по п.1, с поворотом направления оси измерительного канала МКСИ на 180 градусов, **позволяет исключить (компенсировать, минимизировать)** влияние внешних условий и увеличить диапазон измерений (исследований) в 2 раза по сравнению с длиной линейного компаратора [1,19,22,23];

3. Изобретённый метод исследований МКСИ с помощью эталонного инварного жезла 1-го разряда и прецизионного лазерного интерферометра, оси которых совмещены с осью исследуемого МКСИ, **позволяет** (за счет использования материального эталона – инварного жезла 1-го разряда при градиенте температуры ΔT более $0,2^{\circ}\text{C}$) **компенсировать (минимизировать)** влияние рефракции на погрешность, обеспечив погрешность измерений не более:

$(0,33+0,66L)$ мкм/м [18,21];

4. Изобретённый метод генерации эталонного горизонтального угла β , разработанный на основе 24-х гранной призмы 1-го разряда, позволяет исследовать погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ, обеспечивает измерение горизонтальных углов в пределах $0\div 360^{\circ}$ с погрешностью измерений не более $0,5''$ секунды, что в три раза меньше заявленной ПИ угловых измерительных систем известных мобильных 3D МКСИ, работающих в сферической системе координат, и является достаточным для точности измерений в реальных условиях отечественных технологий [4,7,15,18,19,30,31,34,35,36],;

5. На разработанном горизонтальном линейном компараторе изобретённый трилатерационный метод генерации горизонтальных эталонных углов **позволяет** исследовать горизонтальные угловые измерительные системы МКСИ [измеряющие горизонтальную сферическую координату β] с помощью композитного жезла или лазерного интерферометра по предварительно откалиброванному по длине МКСИ. **выявить** короткопериодическую ПИ измерений с ПИ не более $0,5''$ [19,23,24];

6. На разработанном вертикальном линейном компараторе трилатерационный метод генерации вертикальных углов **позволяет** исследовать вертикальные угловые измерительные системы МКСИ, измеряющие вертикальную

сферическую угловую координату γ по предварительно откалиброванному по длине МКСИ, **выявить** (в том числе и короткопериодическую – циклическую) составляющую ПИ вертикальных углов γ в заявленных производителем пределах измерений $+77^\circ/-52^\circ$ с ПИ не более $0,5''$ (с перестановкой калибруемого МКСИ в пределах измерений $\gamma = 15^\circ - \Delta(\gamma) < 0,5''$, в пределах измерений $\gamma = \pm 4^\circ - \Delta(\gamma)$ может быть не более $0.1''$) [15,19,27,32];

7. На базе разработанных математических моделей влияния внешних условий на метрологические характеристики материальных эталонов, учитывающих отклонение внешних условий в любой точке диапазона измерений (формула температурного удлинения) и исследуемого МКСИ, учитывающего отклонение коэффициента рефракции для компенсации влияния внешних условий только в месте расположения метеостанции (формула изменения коэффициента рефракции при отклонении внешних условий), **выявлены диапазоны отклонений внешних условий**, при которых применение материальных эталонов с оптическими или фотоэлектрическими микроскопами обеспечивает более высокую точность измерений, чем МКСИ с интерференционным измерителем перемещений, а именно, при градиенте температуры $\Delta T \leq 0,2^\circ\text{C}$ - более 17-ти метров, при $\Delta T \leq 0,5^\circ\text{C}$ - более 10-ти метров, при $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$ - более 6-ти метров [19,22];

8. Разработанный **метод** контроля длины линии в пространстве, как функции от ортогональных координат ΔX , ΔY и ΔZ , по контрольным маркам **обеспечивает контроль точности измерения** пространственных координат (X, Y, Z) оптико-электронного комплекса 3D МКСИ в соответствии с нормативным документом ISO 10360-10 с погрешностью измерений длины линии в пространстве $\Delta L \text{ (мкм)} \leq \pm [8,3 \text{ мкм} + 1 \text{ (мкм/м)} \times L \text{ (м)}]$ мкм [1, 13, 28, 39];

Достоверность полученных результатов теоретических исследований 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.

Личный вклад автора. Автором лично получены научные результаты, выносимые на защиту, и подготовлены основные публикации по выполненной диссертационной работе. Соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах диссертационного исследования, включая проведение экспериментальных исследований и обработку их результатов.

Лично автором разработаны научно-технические и технологические решения, включающие научно-обоснованные методы, устройства, алгоритмы и программы для ЭВМ, в соответствии с которыми реализована эталонная система пространственного оптико-электронного комплекса 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 и практически реализован 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 и практически реализован метод исследований МКСИ с одновременным использованием эталонного инварного геодезического жезла и лазерного интерферометра, позволяющий исключить влияние на погрешность исследований кратковременных отклонений температуры в зоне измерений,
- предложен и практически реализован трилатерационный метод исследований вертикальных углов, линейных размеров и перемещений, позволяющий по предварительно откалиброванной по длине линейной измерительной системе повысить точность исследований,
- в соавторстве предложен и практически реализован метод исследований измерительных систем «цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка с двумя пятками», позволяющий учитывать результаты исследований в полевых условиях,

- в соавторстве разработан и практически реализован нейросетевой алгоритм на основе гиперболического тангенса, позволяющий сократить количество итераций при обработке результатов исследований и аппроксимировать полученную функцию систематической погрешности исследуемых МКСИ,
- разработана и практически реализована оригинальная методика определения поправок, используемая в производстве для учета поправок при нивелировании измерительными системами с цифровым нивелиром,
- в соавторстве разработаны и практически реализованы компараторы для исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных преобразователей перемещений, используемых в МКСИ, а также измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН).

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных, республиканских и отраслевых научных и научно-технических конференциях, в том числе:

- на Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр – XX1 век» (МИИГАиК, г. Москва, 2009 г.),
- на II-ой международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 2011 г.),
- на IV международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 2013 г.),
- на V международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» г. Москва, 2014 г.),
- на 9-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, ВВЦ, 2013 г.),
- на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки», секция «Технические науки» (г. Москва, 2014 г.),
- на 6-м Московском симпозиуме метрологов «Точность. Качество. Безопасность» (г. Москва, ВВЦ, 2014 г.),
- на международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки» (г. Уфа, БашГУ, 2014 г.),

- на 10-м юбилейном московском международном форуме «Точные измерения – основа качества и безопасности» (г. Москва, ВВЦ, 2014 г.),
- на международной научно-технической конференции «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы» (г. Москва, МИИГАиК, 2014 г.),
- на 10-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (ВДНХ, октябрь 2014 г.),
- на десятой юбилейной общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ» (РИА НОВОСТИ, дек. 2014 г.),
- на VI международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 2015 г.),
- на научно-практической конференции «Фотоника. Мир лазеров и оптики» IV Конгресса технологической платформы РФ (Экспоцентр, Москва, 2015 г.),
- на VII международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 2016 г.),
- на IV Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения воздушно-космической обороны и комплексов управления и обработки информации» (РТИ Системы ВКО, г. Москва, 2016 г.),
- на VIII международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, 2016 г.),
- на международной конференции Geodata» (г. Москва, 2017 г.),
- на XIV общероссийской научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве» (г. Москва, 2018 г.),
- на X Международной научно-практической конференции «Геодезия, Маркшейдерия, Аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, февр. 2019 г.),
- на Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития» (г. Москва, май 2019 г.),
- на 15-ом Московском Международном форуме «Точные измерения – основа качества» (г. Москва, ВДНХ, май 2019 г.),

- на XI Международной научно-практической конференции «Геодезия, Маркшейдерия, Аэросъемка. На рубеже веков» (г. Москва, февр. 2020 г.),
- на международной научной конференции «Пространственные данные: наука и технологии 2021» (г. Москва, МИИГАиК, май 2021 г.),
- на форуме «Точные измерения – основа качества и безопасности» (г. Москва, Экспоцентр, октябрь 2021 г.),
- на международной научной конференции «Пространственные данные: наука и технологии» (г. Москва, МИИГАиК, май 2024 г.).

Объектом исследований является эталонная система сферических координат оптико-электронного комплекса для исследований современных МКСИ (лазерных трекеров, электронных тахеометров, измерительных систем с цифровыми нивелирами и др.), позволяющая выявить погрешность измерения ими пространственных координат в любой точке заявленного пространства измерений.

Предметом исследования является выявление погрешности измерения эталонной системы сферических координат (длин, горизонтальных и вертикальных углов) для современных МКСИ, а также отклонения от перпендикулярности их декартовых координат для решения научных и прикладных задач в критических технологиях отечественного производства.

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.

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 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.

Глава 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., а также измерительных систем для определения вертикальных размеров, в т.ч. 2D измерительных систем типа «цифровой нивелир + штрих кодовые рейки», 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 (определён и исследован) бюджет погрешности измерений с применением 1D÷3D МКСИ, зависящий от ПИ используемых рабочих эталонов, инструментальной ПИ МКСИ (используемых угловых и линейных измерительных преобразователей перемещений) и отклонений внешних условий.

На основе теоретического анализа бюджета погрешностей измерений МКСИ показано, что одним из существенных источников ПИ является короткопериодическая ПИ, связанная со старением элементной базы МКСИ, интерполяцией, квантованием по уровню и дискретизацией измерительных сигналов в диапазоне

измерений длин и углов. В целом, при заявленных микрометровых допусках на параметры изделий важное значение необходимо уделить погрешности измерений, связанной с методами и средствами 3D-измерений с помощью МКСИ. Известно также, что первичная информация о координатах точки в 3D-пространстве выдается МКСИ в собственной сферической системе координат (L, β, γ) . Поэтому все научные и технические разработки по созданию оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания мобильных координатных средств измерений проводились применительно к сферической системе координат.

В работе проведен анализ нормативных документов, используемых для исследований МКСИ в международной и отечественной практике, который показал, что все известные методики измерений нацелены на определение длины линии в пространстве, не предполагают выявление точности измерений 3D координат в любой точке заявленного пространства, кроме того, они не предполагают выявление детерминированных короткопериодических (циклических) составляющих ПИ, которые могут значительно превышать нормированные про-изводителем допуски.

Проведенный обзор и анализ известных современных координатных МКСИ, методов и средств их метрологического обеспечения позволил сделать следующие общие выводы:

1. В структуре ПИ оптико-электронных координатных МКСИ проявляются изменяющиеся со временем внутришаговые детерминированные высокочастотные (короткопериодические (циклические)) ПИ, связанные с интерполяцией, квантованием по уровню и дискретизацией по диапазону измерений измерительных сигналов, изменением межмонтажных емкостей в электрических цепях и т.д., на которые в известных методах исследований не уделяется должного внимания, в части их метрологического обеспечения. Анализ показывает, что влияние некоторых из них может значительно превышать заявленный производителем допуск.

2. Известные иностранные методики исследований МКСИ не предполагают выявление ПИ в любой точке линейных и угловых координат в заявленных диапазонах измерений. (Например, известный международный стандарт ISO 10360 предполагает исследование ПИ лишь в ограниченном количестве длин (координат), например-в 7 позициях рабочего пространства МКСИ с помощью набора материальных рабочих эталонов длины разного номинала).
3. Известные однокоординатные методы и средства (например, используемые, в стандарте ASME B89.4.19 [США]) требуют многократной перестановки исследуемого МКСИ или используемого рабочего эталона, что существенно снижает точность измерений за счет отсутствия точной привязки к единой системе координат, увеличения времени измерений и обеспечения постоянства внешних условий.
4. При исследованиях МКСИ, измеряющих пространственные координаты используется двухточечная схема измерений длины линии в пространстве, что не позволяет напрямую выполнить измерения координат в трехмерном пространстве, усложняет процедуру привязки смежных диапазонов координат и, соответственно, увеличивает погрешность измерений.
5. При исследованиях 1D измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН) перемещается рейка, закрепленная за ее корпус, что не соответствует методике измерений в реальных полевых условиях, кроме того, при таком креплении в штрих-кодowych рейках может произойти заклинивание шкалы относительно корпуса рейки.
6. При нивелировании с помощью ИСЦН отсутствует контроль измерений (аналогичный контролю по разности пяткок у штриховых реек) и привязка штрих-кодовой шкалы к основанию (пятке) рейке.

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, таких, как лазерные трекеры, интерферометры, измерительные системы с цифровыми нивелирами, электронные теодолиты и тахеометры, наземные сканеры и другие координатные средства измерений в основном иностранного производства, использующих их же иностранные специальные рабочие эталоны для их исследований.

Учитывая проведённый анализ состояния мобильных координатных средств измерений (МКСИ) в широком диапазоне длин и углов, а также их метрологического обеспечения, диссертационная работа направлена на разработку методов и средств исследований (метрологического обслуживания), как линейных и угловых измерительных систем и преобразователей, используемых в МКСИ, так и МКСИ в целом, путем создания эталонной системы пространственных сферических координат оптико-электронного комплекса, создающего (воспроизводящего, генерирующего) единую пространственную систему эталонных координат и его научно-методического обеспечения.

Глава 2. Исходя из проведенного в первой Главе анализа, вторая Глава диссертации посвящена теоретическому обоснованию создания эталонной системы пространственных координат (на базе оптико-электронного комплекса, создающего, воспроизводящего, генерирующего единую пространственную систему эталонных координат), повышающей точность измерений при исследованиях и использовании в производстве 1D÷3D МКСИ, в том числе на основе научно обоснованной модернизации существующего в метрологической лаборатории МИИГАИК 24-х метрового линейного оптико-механического компаратора, а также разработки компараторов для угловых и линейных размеров, в совокупности представляющих оптико-электронный комплекс, фактически являющийся материальной реализацией сферической системы координат (L, β, γ) .

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» [20]. Выявлено влияние градиента температуры ΔT° при разных отклонениях, доказано, что при ΔT° более $0,2^\circ$ на расстояниях более 17-ти метров меньшую погрешность измерений по сравнению с лазерными интерференционными преобразователями перемещений с одним температурным датчиком (помещённым в метеостанции, расположенной в начале координат) обеспечивают материальные эталоны (инварные жезлы с фотоэлектрическими микроскопами).

Для создания научно-технических основ оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания мобильных координатных средств измерений 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.

На основе разработанных математических моделей измерений длин, горизонтальных и вертикальных углов, а также оценки их погрешностей измерений теоретически обоснован и технически реализован оптико-электронный комплекс 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, а также 28-ми марок, расположенных на изолированных фундаментах, для оценки

ортогональности декартовых координат, контроля результатов исследований и привязки к первичным эталонам длины и угла. Вертикальная ось исследуемого МКСИ располагается соосно с осью эталонной призмы, расположенной на горизонтальном угловом компараторе, визирная ось совпадает с осью эталонного жезла [23,33].

Схема расположения отдельных компараторов оптико-электронного комплекса показана на рисунке 1.

Для линейного компаратора с целью исключения систематической ПИ, связанной с устранением влияния погрешности Аббе первого рода, разработаны: - математическая модель реализованного метода компенсации погрешности Аббе), 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 нее [33,34] и на основе математической модели- принципиальная схема компаратора.

Принципиальная схема линейного компаратора показана на рисунке 2, а математическая модель реализованного метода компенсации погрешности Аббе в компараторе с двумя эталонными мерами, описывается уравнением (1):

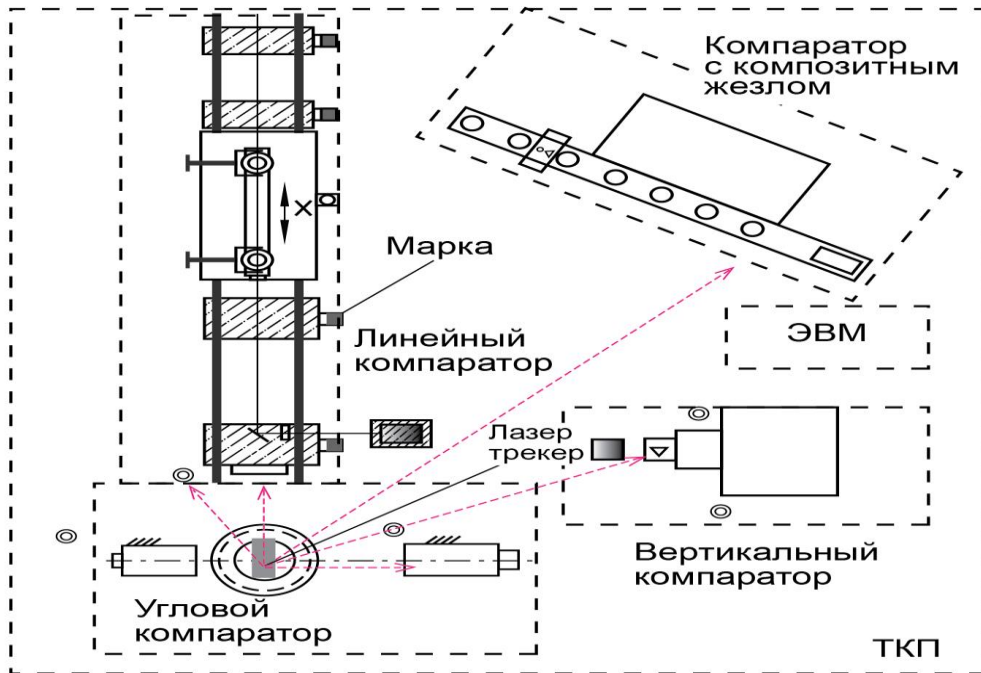
$$X_i = \frac{m[(x_{Bi} + \delta_{BEi}) - (x_{Bj} + \delta_{BDj})] + n[(x_{Ai} + \delta_{AEi}) - (x_{Aj} + \delta_{ADj})]}{m+n} \quad (1)$$

здесь m и n измеренные расстояния от осей; x_A и x_B – отсчеты по эталонам А и В, δ_i – поправки за калибровку эталонов в i -ой точке диапазона измерений, j – номер при многократных измерениях.

Измеряемая длина вычисляется по формуле (2): $L = X_{i+1} - X_i$, где i – измеряемая линейная координата.

Анализ формулы (1) показывает, что при отклонении от соосности эталонной оси и оси МКСИ не более 1 мм погрешность Аббе первого рода не превысит 0,2 мкм.

При равенстве размеров m и n между мерами и осью исследуемого МКСИ математическая модель измерений (2) упрощается и при использовании жезлов известной длины имеет вид:



**Рисунок 1 – Схема расположения компараторов
в термоконстантном помещении (ТКП)**



**Рисунок 2 – Принципиальная схема компаратора с двумя
эталонными мерами**

$$X_{im} = (X_{i\kappa 1} + X_{i\kappa 2})/2, \quad (3)$$

при использовании лазерных интерферометров имеет вид:

$$X_{im} = (X_{инт1} + X_{инт2})/2. \quad (4)$$

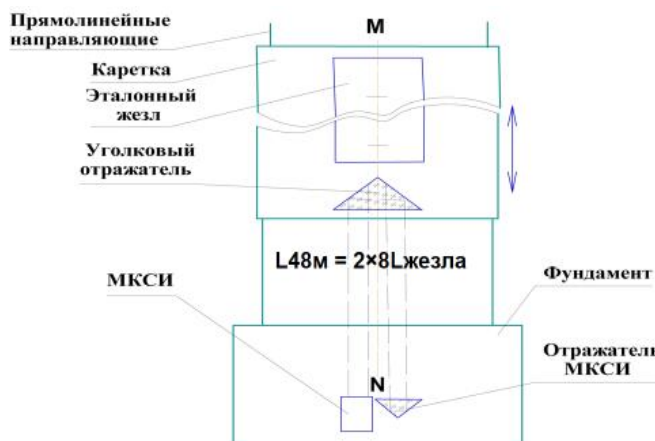
Здесь i – измеряемая координата.

При модернизации линейного оптико-механического компаратора

МИИГАиК этот метод был доработан для исследований МКСИ на 24-х метровом оптико-механическом компараторе в диапазоне измерения длин до 48-ми метров (принципиальная схема компаратора показана на рисунке 3), при этом отражатель МКСИ располагался неподвижно рядом с МКСИ (градиент температуры между начальной и конечной точками отсутствует в разработанном «методе удвоения расстояния», в отличие от метода измерений до 48-метров без «метода удвоения расстояния»), а на каретке устанавливался уголкового отражатель, например, от светодальномера СП-2, поворачивающий луч в измерительном канале на 180° [16,21]. При равенстве расстояний лучей прямого и обратного хода от оси инварного эталонного жезла (лазерного интерферометра) математическая модель метода описывается формулой:

$$X_{im} = 2 \times X_{инт}. \quad (5)$$

В диссертационной работе разработана научно обоснованная схема измерений, в которой оси исследуемого МКСИ, эталонного жезла и дополнительно введенного эталонного интерферометра совмещены, при этом рефракция сказывается на отсчетах обоих интерферометрических средствах измерений измерений одинаково, а использование в этом случае жезлов



позволяет, зная температуру жезлов и их коэффициенты линейного расширения, исключить рефракцию из результатов измерений и определить длину волны источника излучения МКСИ. Схема показана на рисунке 4.

Рисунок 3 – Схема измерений до 48-ми метров

В диссертационной работе на основе математической модели погрешности измерений МКСИ в схеме с общей оптикой, разработана научно обоснованная

схема изме-рений, в которой оси исследуемого МКСИ, эталонного жезла и дополнительно введенного эталонного интерферометра совмещены, при этом рефракция сказывается на отсчетах обоих интерферометрических средств измерений одинаково, использование в этом случае жезла позволяет, зная температуру жезла и его коэффициент линейного расширения, исключить рефракцию из результатов измерений и определить длину волны источника излучения МКСИ.

Погрешность измерений МКСИ в схеме с общей оптикой вычисляется из уравнений: $\Delta_{МКСИ} = L_{МКСИ} - L_{жезла} - \Delta_{рефр}$ и $\Delta_{рефр} = L_{инт} - L_{жезла}$, (6)

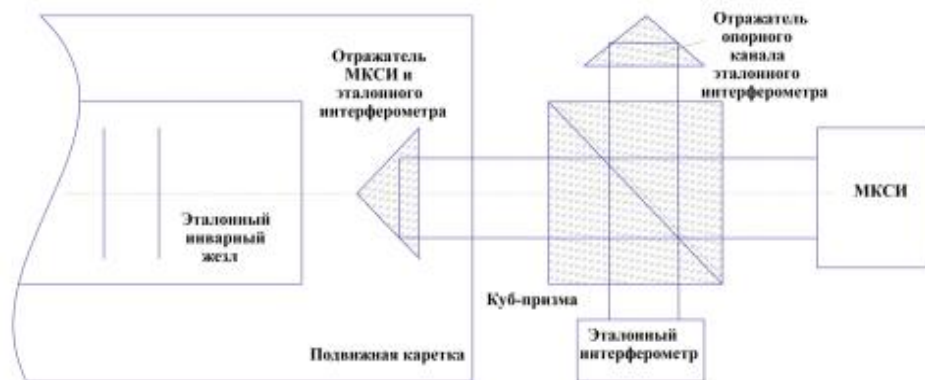


Рисунок 4 – Принципиальная схема линейного компаратора с общей оптикой и инварным жезлом

здесь $L_{МКСИ}$, $L_{жезла}$, $L_{инт}$ – отсчеты по исследуемому МКСИ, длина перемещающегося жезла и отсчет по эталонному интерферометру соответственно.

В фазовых светодальномерах, основанных на гетеродинном методе вычислений длины, основной источник погрешности исследований линейных размеров связан с погрешностью определения разности фаз опорной и измерительной длин волн. Современные фазовые светодальномеры работают на опорных длинах волн от двух до десяти метров, поэтому, в соответствии с известной теоремой Котельникова для выявления короткопериодической ПИ достаточно иметь значения координат с шагом в один метр. При этом, для выявления детерминированной короткопериодической ПИ светодальномеров может быть использован 3-х метровый инварный жезл, у которого откалиброваны метровые

интервалы. 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.

На основе математических моделей измерений (воспроизведения) горизонтальных углов в механической реализации эталонной сферической системы координат и оценки их погрешностей (описанных ниже), для генерации (воспроизведения) эталонных горизонтальных угловых координат и выявления ПИ горизонтальных углов исследуемых МКСИ был разработан компаратор, схема которого приведена на рисунке 5 [16,18].

Одной из проблем исследований точности горизонтальных углов β МКСИ является устранение эксцентриситетов осей МКСИ и многогранной эталонной призмы. При исследованиях использовались два автоколлиматора, один ориентировался на грань призмы как датчик нуля, другой фиксировал отклонения, которые после исследований учитывались как поправки при исследованиях МКСИ, эксцентриситет установки МКСИ на поворотном столе в разработанном методе компенсации систематической погрешности-эксцентриситета устранялся путем исключения первой гармоники в спектре полученной ПИ с использованием дискретного преобразования Фурье [20, 33]. В результате теоретических исследований систематическая ПИ должна устраняться (компенсироваться), при этом случайная ПИ не превысит $\pm 0,3''$.

Для устранения грубых ошибок из результатов измерений был разработан алгоритм искусственной трехуровневой нейронной сети (ИНС), позволяющий получить более точную аппроксимирующую кривую систематической ПИ, выявить и исключить грубые ошибки, за счет использования гиперболического тангенса уменьшить количество измерений для достижения требуемого результата, исключив потерю данных на границах заданного допуска [4,18].

При разработке алгоритма искусственной нейронной сети использованная процедура оптимизации выполнялась с применением настройки Excel-Поиск решения. Описанный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рисунке 6.

Для анализа спектра ПИ в разработанном алгоритме используется дискретное преобразование Фурье, при этом погрешность измерений имеет вид:

$$\Delta\beta(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{n=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (7)$$

а коэффициенты ряда Фурье определяются формулами:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\beta(k), \quad a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N a_{nk}, \quad b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N b_{nk}, \quad (8)$$

$$\text{где } a_{nk} = \Delta\beta(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad b_{nk} = \Delta\beta(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right),$$



Рисунок 5 – Принципиальная схема горизонтального углового компаратора

здесь $k = 1, 2 \dots N$ – значение текущего отсчета, соответствующего номеру грани призмы, n – номер гармоники,

$\Delta\beta(k)$ – дискретная функция погрешности измерений ЭТ, определяемая значениями текущих отсчетов k .

Рассчитанные в соответствии с (8) коэффициенты ряда Фурье $\frac{a_0}{2}$, a_{nk} ,

b_{nk} , a_n , b_n используются для определения поправок результатов измерений

каждого угла призмы $\beta_k = \frac{2\pi k}{N}$ по формуле:

$$\Delta\beta_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{n=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (9)$$

Скорректированные значения погрешностей измерений для углов,

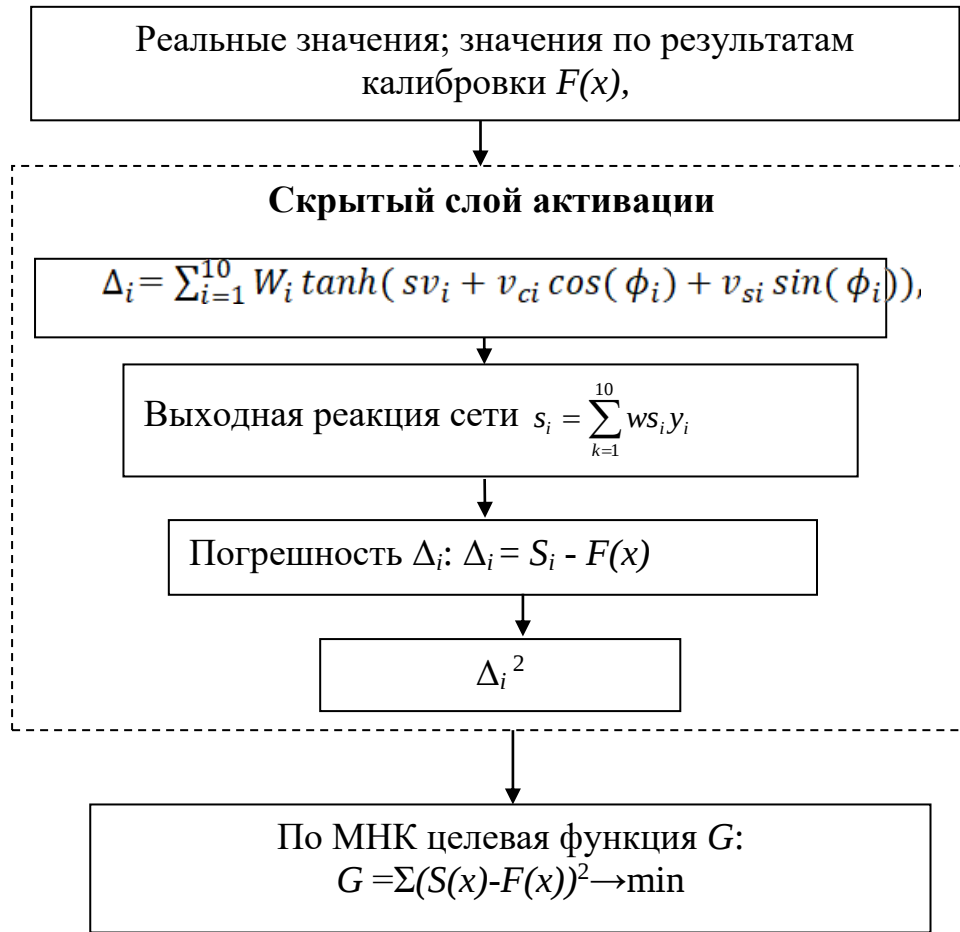


Рисунок 6 – Блок – схема нейронной сети

определяемых гранями призмы, при введении поправок, в соответствии с (8), будут, соответственно, равны:

$$\Delta\beta(k)_{ck} = \Delta\beta(k) - \Delta\beta_k ["]. \quad (10)$$

Результаты введения поправок в составе постоянной составляющей $\frac{a_0}{2}$ и коэффициентов ряда Фурье для 1-ой гармоники a_1 , рассчитанных с помощью ДПФ, позволяют устранить влияние эксцентриситетов установки вертикальной оси исследуемого ЭТ относительно оси многогранной призмы и оси поворотного стола.

С целью устранения влияния эксцентриситета при определении ПИ горизон-

тальных углов МКСИ на основе созданных алгоритмов разработана программа для ЭВМ его вычисления и учета, основанная на выполнении измерений исследуемым МКСИ координат указанных выше марок-гнезд по граням эталонной призмы через 15° . По каждой грани измеряются координаты марок, после чего выполняется их приведение (доворот по углу β) в единую систему координат, совпадающую с измерениями по первой грани призмы (аффинные преобразования координат).

Разность между углами доворота горизонтальных углов β и соответствующими углами между гранями эталонной призмы свидетельствует о погрешности угловой измерительной системы исследуемого МКСИ.

Исключение эксцентриситетов стола и расположения МКСИ на нем выполняется разработанным в диссертации методом аффинных преобразований в горизонтальной плоскости.

Схема доворота угла β в плоскости ХУ показана на рисунке 7.

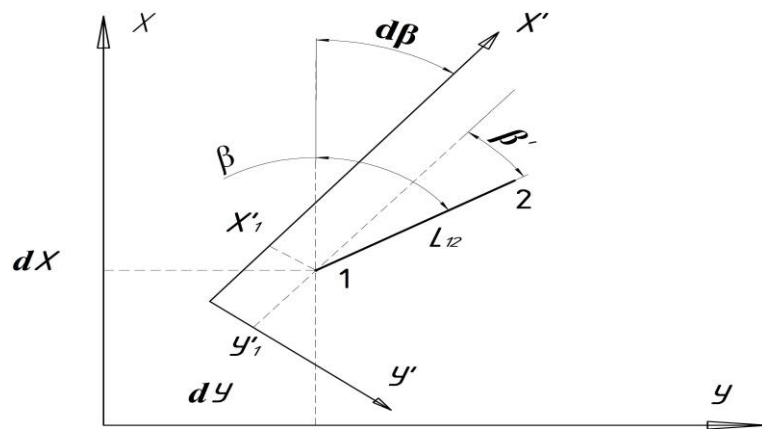


Рисунок 7 - Схема поворота системы координат в плоскости ХУ

Вычисления выполняются по формулам:

$$\operatorname{tg} \beta' = (y'_2 - y'_1) / (x'_2 - x'_1); \operatorname{tg} \beta = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1); d\beta = \beta' - \beta;$$

$$x_i = (x'_i - x'_0) \times \cos d\beta - (y'_i - y'_0) \times \sin d\beta + x_0;$$

$$y_i = - (x'_i - x'_0) \times \sin d\beta - (y'_i - y'_0) \times \cos d\beta + y_0;$$

$$z_i = (z'_i - z'_0) + z_0; L_i = ((x'_i - x_1)^2 + (y'_i - y_1)^2)^{1/2}; \quad (11)$$

$$\beta'_i = \operatorname{arctg}((y'_i - y'_1) / (x'_i - x'_1)); \beta_i = \beta'_i + d\beta;$$

$$dx_i = L_i \times \cos \beta_i; dy_i = L_i \times \sin \beta_i;$$

$$x_i = x_{01} + dx; y_i = y_{01} + dy; z_i = (z'_i - z'_0) + z_0,$$

здесь:

$(X'_i - X'_0), (Y'_i - Y'_0)$ - приращения координат точки в системе координат $X'Y'Z'$; X'_0, Y'_0 - координаты, принятые за начало системы координат $X'Y'Z'$;

$d\beta$ - угол доворота осей координат; X_0, Y_0 - координаты точки X'_0, Y'_0 в системе координат XYZ .

За начало систем координат XYZ и $X'Y'Z'$ в процессе пересчета, приняты координаты точки 1 (см. рисунок 6).

Для преобразования высот точек снимаемого объекта, достаточно выполнить параллельный перенос из условной системы координат $X'Y'Z'$ в систему XYZ , так как ось Z ортогональна плоскости XY : $Z_i = (Z'_i - Z'_0) + Z_0$, Z_0 - высота точки X'_0, Y'_0 в системе координат XYZ .

При исследованиях лазерных тахеометров и радаров важно на коротких расстояниях уменьшить погрешность наведения на опорное направление. В диссертации для этой цели разработана марка с четырех квадрантным приемником излучения - фотодиодом (рисунок 8), Теоретические расчеты разработанной схемы считывания сигналов показывают, что при расположении марки на расстоянии 24 метра ПИ не превысит 0,1 угл. сек. [2,3,7,16].

Для аттестации разработанного горизонтального углового компаратора в качестве эталонов разработаны и используются следующие методы:

- а) вторичный эталон призма-многогранник с фотоэлектрическим автоколлиматором типа ТА-1 с ПИ горизонтального угла $\Delta(\beta) \leq 0,2''$;
- б) эталон первого разряда – электронный тахеометр ТС-1000 с ПИ горизонтального угла $\Delta(\beta) \leq 0,5''$.

Для выявления ПИ вертикальных углов (координата Z) на основе разработанной математической модели измерения вертикального угла МКСИ разработан вертикальный компаратор с эталонным лазерным интерферометром [9,19].

Схема компаратора показана на рисунке 9.

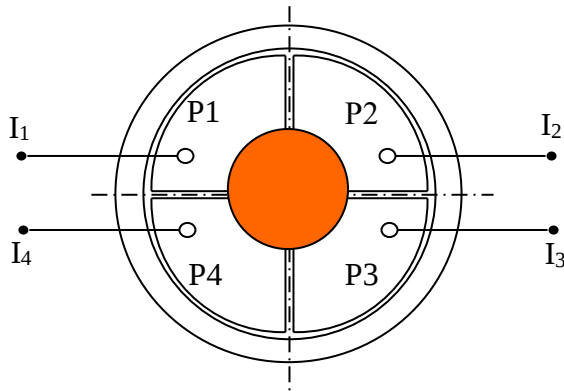


Рисунок 8 – Схема расположения светового пятна на марке

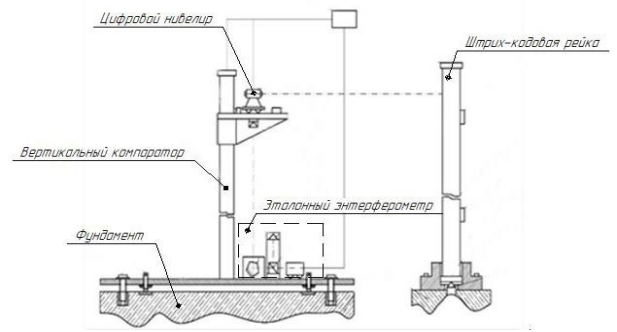


Рисунок 9 – Принципиальная схема вертикального компаратора

Здесь угол в вертикальной плоскости вычисляется при косвенных измерениях по теореме косинусов через измеренные предварительно откалиброванным по радиусу-вектору МКСИ.

Математическая модель измерения вертикального угла МКСИ в этом случае может быть представлена функциональной зависимостью по теореме косинусов:

$$\gamma = \arccos((a^2 + b^2 - L^2) / (2ab)) \times 180 / 3.14159 \quad (12)$$

Здесь a и b – наклонные расстояния, измеренные предварительно откалиброванным по длине МКСИ, L – длина перемещения каретки вертикального компаратора с установленными на ней соосно отражателями МКСИ и эталонного лазерного интерферометра (ЛИ). Оценка точности измерений на вертикальном компараторе выполнена на основе (12) по формуле:

$$\Delta(\gamma) = \sqrt{\left(\frac{d\gamma}{da}\right)^2 \times (\Delta a)^2 + \left(\frac{d\gamma}{db}\right)^2 \times (\Delta b)^2 + \left(\frac{d\gamma}{dL}\right)^2 \times (\Delta L)^2},$$

здесь:

$$\frac{d\gamma}{da} = \frac{a^2 - b^2 + L^2}{2a^2b\sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - L^2)^2}{4a^2b^2}}}; \quad \frac{d\gamma}{db} = \frac{b^2 + L^2 - a^2}{2b^2a\sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - L^2)^2}{4a^2b^2}}}; \quad (13)$$

$$\frac{d\gamma}{dL} = \frac{L}{ab\sqrt{1 - \frac{(a^2 + b^2 - L^2)^2}{4a^2b^2}}}$$

- частные производные по аргументам a , b и L , $\Delta a, \Delta b, \Delta L$ – допускаемые погрешности, вычисленные по эмпирической формуле Эдлена для разных температурных градиентов и длин a и b .

Поправка для вертикального угла вычисляется по формуле:

$$\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 \quad (14)$$

здесь: γ_1 – вертикальный угол, вычисленный по линейному перемещению ЛИ,

γ_2 – вертикальный угол, вычисленный по координатам исследуемого МКСИ.

Координаты марок (возможно с ориентированием на разные грани призмы) и вычисляются по формулам:

$$X_i = L \times \cos\gamma \times \cos\beta, Y_i = L \times \cos\gamma \times \sin\beta, Z_i = L \times \sin\gamma; \quad (15)$$

- по измеренным координатам вычисляются расстояния S_i между марками:

$$S_i = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}; \quad (16)$$

где $\Delta X = X_{i+1} - X_i$; $\Delta Y = Y_{i+1} - Y_i$; $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$; i -номер марки

- вычисленные размеры S_i сравниваются согласно международным стандартам с аттестованными рабочими эталонами длины, расположенными в пространстве между марками;

- по разности координат ΔX , ΔY и ΔZ проверяются их допустимые значения, по ним же определяется и ортогональность декартовых координат.

Глава 3. В ней на основе математической модели 3D измерений показано, что разработанный 3D пространственный компаратор (в частном случае) может быть использован для метрологического обслуживания 1D МКСИ, измерительных систем с цифровыми нивелирами, где важно знать линейный размер от основания (пятки) рейки до заданного отсчета по нивелиру. С этой целью в диссертации разработаны схема (рисунок 10) и математическая модель (17÷19) для горизонтального линейного компаратора [5, 9,10,17,24,27,28,30].

$$II_{эм} = \frac{D - L - d}{2} + d. \quad (17)$$

Размер до основания исследуемой рейки равен:

$$\Pi_{\text{кал}} = \Pi_{\text{эт}} - d \quad (18)$$

контроль измерений выполняется по формуле:

$$\Pi_{\text{кал}} + \Pi_{\text{эт}} + L = D \quad (19)$$

Здесь: D – размер, вычисленный по лазерному интерферометру между заданными отсчетами по рейкам,

L – известный размер сферической меры, расположенной между встречно соединенными пятками двух реек (блок концевых мер длины (специальная сферическая мера)),

Π_i – размеры до пятки реек от заданного отсчета по рейкам,

d – разность пятки реек.

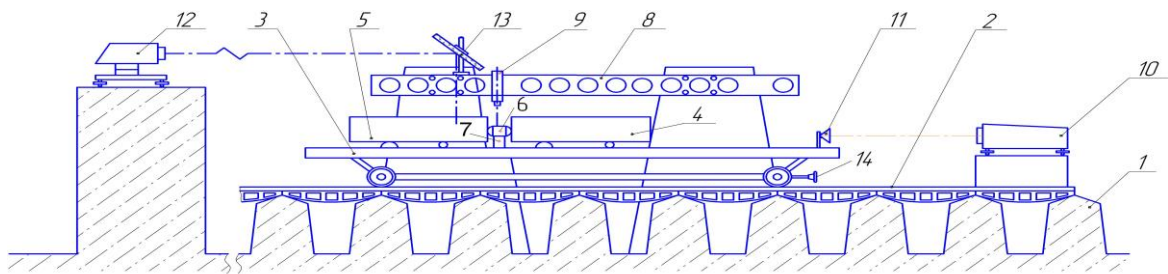


Рисунок 10 – Горизонтальный компаратор для исследований ИСЦН: 1 – фундаменты, 2 – направляющие рельсы, 3 – подвижная каретка, 4 – штрих-кодовая рейка исследуемой измерительной системы, 5 – эталонная штрих-кодовая рейка, 6 – штриховая мера, 7 – база, 8 – направляющие, 9 – микроскоп, 10 – лазерный интерферометр, 11 – отражатель, 12 – эталонный цифровой нивелир, 13 – поворотное зеркало, 14 – винт для микрометрического перемещения

Калибровка МКСИ во всем диапазоне измерений может быть выполнена, как на горизонтальном, так и вертикальном компараторе. При этом на вертикальном компараторе, в отличие от известных зарубежных компараторов, устанавливается цифровой нивелир, а рейка, являющаяся мерой, располагается неподвижно на требуемых для исследований расстояниях, как по инструкции по нивелированию.

Кроме того, в работе описаны запатентованные метод калибровки двухпяточных реек и математическая модель измерений с ними в полевых (произ-

водственных условиях [12,32,34,38].

Глава 4. В ней приводится новая разработка оптико-электронного комплекса для метрологического обслуживания МКСИ, который механически реализует описанные теоретически и 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.

Механическая реализация координаты L воспроизводится на модернизированном линейном ОМК МИИГАиК. Модернизация линейного ОМК состоит во включении в его состав запатентованных технических устройств и методов, позволяющих выявить и скомпенсировать его систематические погрешности и увеличить диапазон измерений (воспроизвести эталонную длину) ОМК с 24-х метров до 48-ми метров.

Механическая реализация угловой координаты β воспроизводится на вновь созданном горизонтальном угловом компараторе. Здесь запатентованные устройства и зарегистрированные программы обработки результатов измерений на ЭВМ за счет одновременного использования трех автоколлиматоров (два отслеживают горизонтальный угол, один следит за отклонением вертикального угла), направленных на грани призмы-многогранника, растрового преобразователя ROD-800 и горизонтального линейного компаратора с композитным жезлом и лазерным интерферометром позволяют исключить систематические погрешности эталонной системы координат.

Механическая реализация угловой координаты γ производится на вновь созданном автоматизированном линейном вертикальном компараторе с эталонным лазерным интерферометром трилатерационным методом при известных поправках за калибровку линейной измерительной системы МКСИ. Систематическая составляющая ПИ, связанная с постоянным расположением отражателя МКСИ на подвижной каретке компаратора устраняется исключением соответствующей гармоники из спектра ПИ.

Механическая реализация контроля перпендикулярности декартовых координат выполнена в виде постоянных, разнесенных по высоте и азимуту, марок с априори известными координатами для размещения отражателя исследуемого МКСИ.

Методика реализации исследований 3D МКСИ состоит из следующих этапов:

- на линейном горизонтальном 24-х метровом компараторе выполняется исследование (калибровка) дальномеров МКСИ в интерференционном и светодальномерном 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-хгранной 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 (регрессионный анализ, аффинные преобразования, гармонический анализ с помощью дискретного преобразования Фурье или обработка с помощью искусственной нейронной сети);

- по откалиброванному по призме измерительному преобразователю ROD-800, 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 ПИ $\Delta(\beta)$ горизонтального угла β ;

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

- измеряются координаты марок (возможно с ориентированием на разные грани

призмы) и вычисляются по формулам (15) и (16). По разности измеренных и эталонных координат ΔX_i , ΔY_i и ΔZ_i проверяются их допустимые значения.

На рисунке 11 приведена механическая реализация метода эталонных линейных измерений с удвоением диапазона измерений до 48-ми метров. Здесь измерительная ось инварного эталонного жезла расположена по середине между прямым и повернутым на 180° с помощью углового отражателя лучами (может быть на известных расстояниях от нее). Метеостанция исследуемого МКСИ (в данном случае лазерного трекера) для обеспечения одинаковых внешних условий в начале и в конце диапазона измерений (отсутствует градиент внешних условий). При перемещении линейного эталона, например, на один метр отсчет по МКСИ составит 2 метра.

На рисунке 12 приведена механическая реализация метода линейных изме-



Рисунок 11 - Механическая реализация линейного компаратора с удвоением отсчетов по МКСИ: 1 – исследуемый лазерный трекер, 2 – отражатель лазерного трекера, 3 – поворотный отражатель, 4 - жезл

рений с одновременным применением эталонного инварного жезла и эталонного лазерного интерферометра. Здесь измерительные оси исследуемого МКСИ и эталонов совпадают, при этом использование материального эталона позволяет исключить влияние рефракции, а использование эталонного интерферометра позволяет выявить инструментальную погрешность измерения МКСИ.

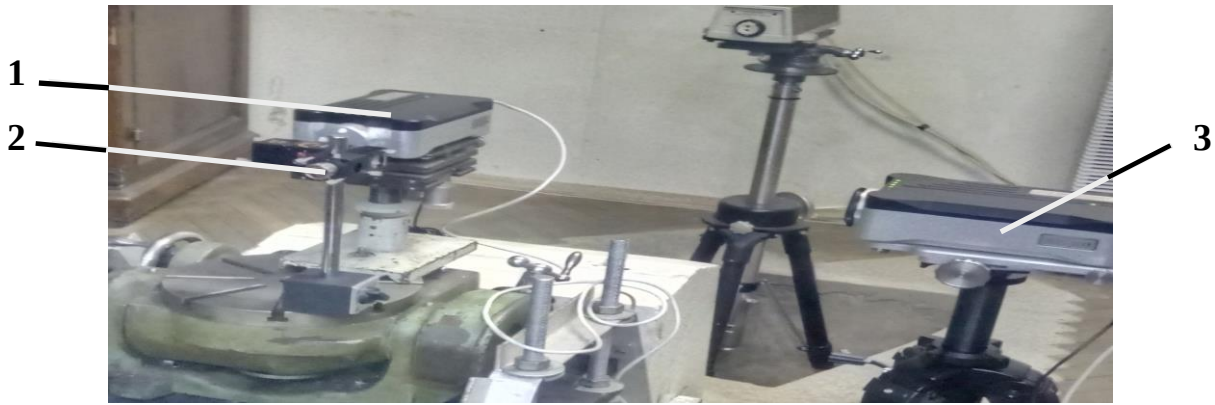


Рисунок 12 – Механическая реализация линейного компаратора с общей оптикой и инварным жезлом: 1 – исследуемый МКСИ, 2 – куб-призма с опорными каналами, 3 – эталонный интерферометр

На рисунке 13 приведена механическая реализация горизонтального углового компаратора. Здесь исследуемый МКСИ расположен над призмой многогранником 1-го разряда на поворотном столе, соосно с ними внизу через прецизионную муфту с поворотным столом соединен измерительный преобразо-



Рисунок 13 – Механическая реализация горизонтального углового компаратора: 1 – исследуемое МКСИ, 1 – автоколлиматор, ориентированный на первую грань призмы, 2 – автоколлиматор, установленный под 90°, автоколлиматор, установленный через 180°, 4 – цифровой блок преобразователя ROD-800, 5 – поворотный стол ватер ROD-800 фирмы «Хайден Хайн (германия).

Слежение за гранями призмы осуществляется с помощью трех автоколлиматоров, расположенных через 90° относительно друг друга.

Два встречных автоколлиматора нацелены на измерение горизонтальных углов

при повороте призмы, а автоколлиматор, установленный под углом 90° , отслеживает изменение положения поворотного стола в вертикальной плоскости.

На рисунке 14 приведена механическая реализация вертикального углового компаратора. Здесь расстояние до исследуемого МКСИ равно 1,5 метра.

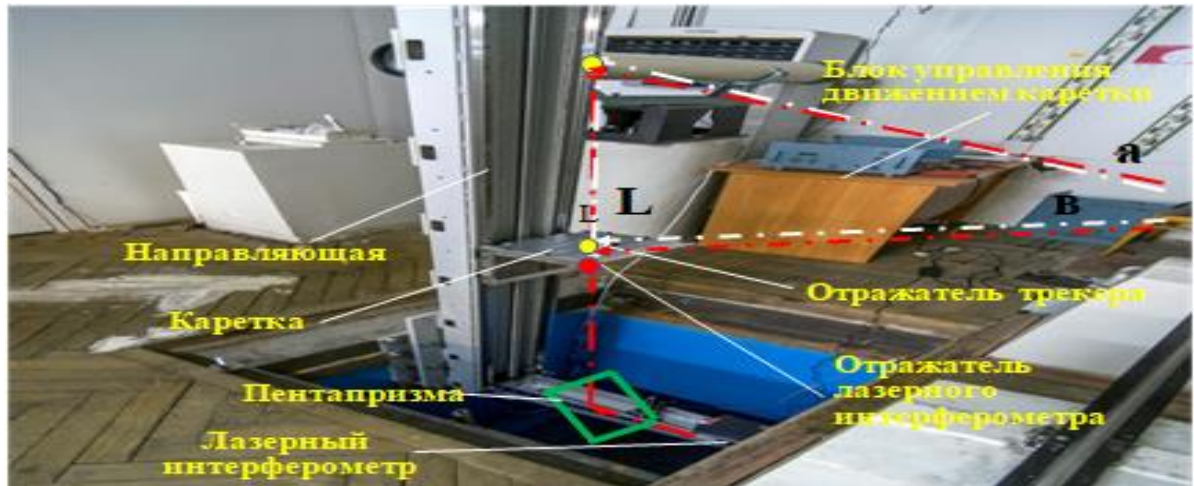


Рисунок 14 – Механическая реализация вертикального компаратора

Калибровка вертикальной измерительной системы исследуемого МКСИ выполняется описанным в Главе 2 трилатерационным методом.

На рисунке 15 приведена механическая реализация горизонтального компаратора с композитным жезлом и лазерным интерферометром для калибровки горизонтальной угловой измерительной системы МКСИ в пределах углов $0 \div 20^\circ$ с целью выявления внутришаговой погрешности измерения горизонтальных углов МКСИ.

Глава.4. В ней проведены экспериментальные исследования по установлению адекватности разработанных основных теоретических положений и математических моделей компараторов в составе оптико-электронного комплекса для его технической реализации.

Аттестация линейного компаратора

Аттестация линейного компаратора выполнялась с помощью специального первичного эталона длины – лазерного трессера фирмы «Etalon» (Германия), ПИ которым заявлена производителем и аттестована ВНИИМом $\pm(0,2 \text{ мкм} + 0,3 \text{ мкм/м})$.

Результаты аттестации приведены на рисунке 16.

Результаты аттестации показали, что ПИ в четыре раза меньше заявленного



Рисунок 15 – Механическая реализация компаратора с композитным жезлом и лазерным интерферометром: 1 – фундамент, 2 – лазерный интерферометр, 3 – отражатель интерферометра, 4 – направляющая с композитным жезлом

допуска на линейный компаратор, при этом случайная ПИ в диапазоне измере-

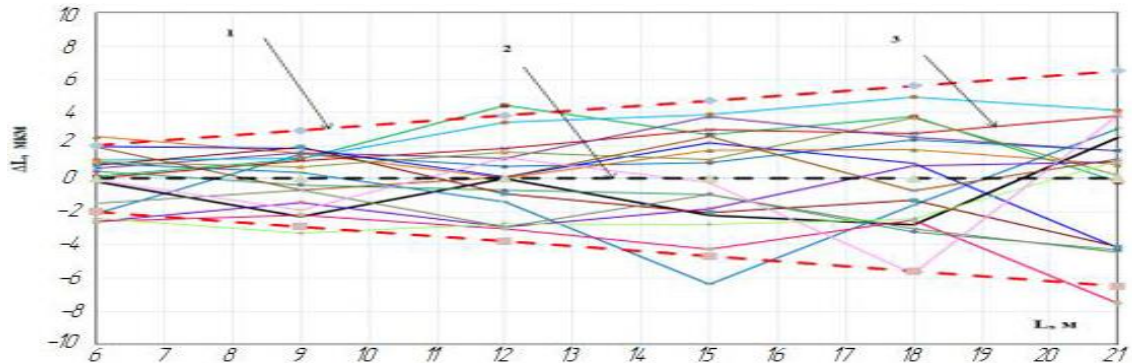


Рисунок 16 - Результаты аттестации линейного компаратора с помощью лазерного трессера фирмы «Etalon» (Германия):

ний до 21 метра не превысила ± 4 мкм, что можно объяснить влиянием рефракции на лазерный трессер, кроме того, производитель лазерного трессера согласно нормативной документации на него гарантирует точность измерений только в диапазоне до 15-ти метров.

Исследование погрешности измерения длины при совмещении осей исследуемого МКСИ и эталонного лазерного интерферометра

На рисунке 17 приведены результаты исследований дальнометра трекера

по схеме с общей оптикой МКСИ и ЛИ, а также соосно расположенного с ними инварного жезла после исключения влияния рефракции.

Из экспериментальных исследований, приведенных на рисунке 17, видно,

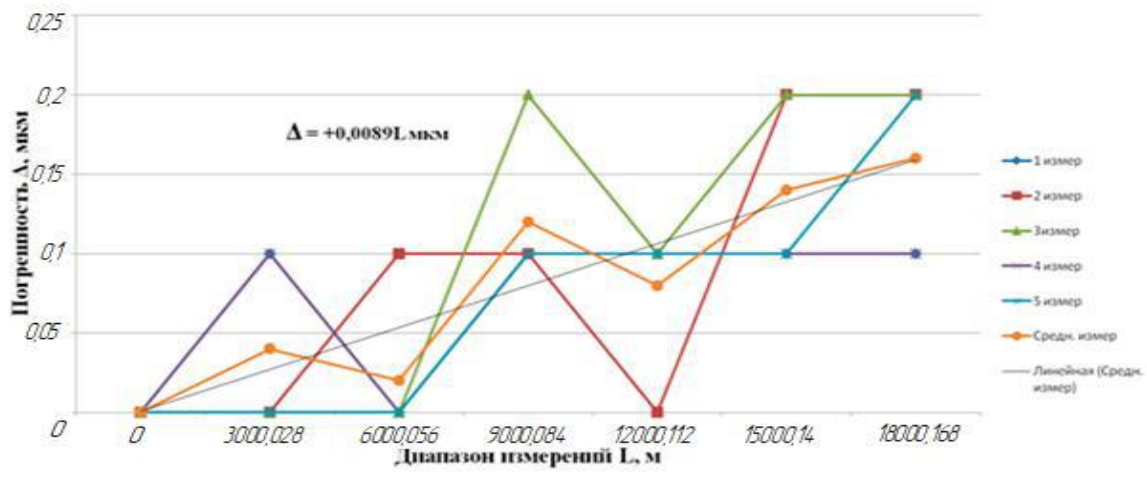


Рисунок 17 – Исследование ПИ длины дальномером лазерного трекера при совмещении осей жезла и МКСИ после компенсации влияния рефракции

что ПИ исследуемого МКСИ при исключении влияния рефракции не превышает 0,2 мкм, соответствует разработанной в Главе 2 математической модели.

Исследование ПИ длины в диапазоне до 48-ми метров

В соответствии с математической моделью, разработанной в Главе 2, на 24-х метровом компараторе были выполнены исследования лазерного трекера в диапазоне измерений до 48-ми метров.

На рисунке 18 приведены результаты исследований. Из них видно, что 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.

Исследование погрешности измерения длины на компараторе с двумя параллельно расположенными эталонными мерами

В диссертации также приведены результаты исследований ПИ с двумя параллельно расположенными эталонными жезлами, расположенными на

известных расстояниях от оси МКСИ, подтверждающие адекватность разработанной математической модели (формула 3). Результаты исследований

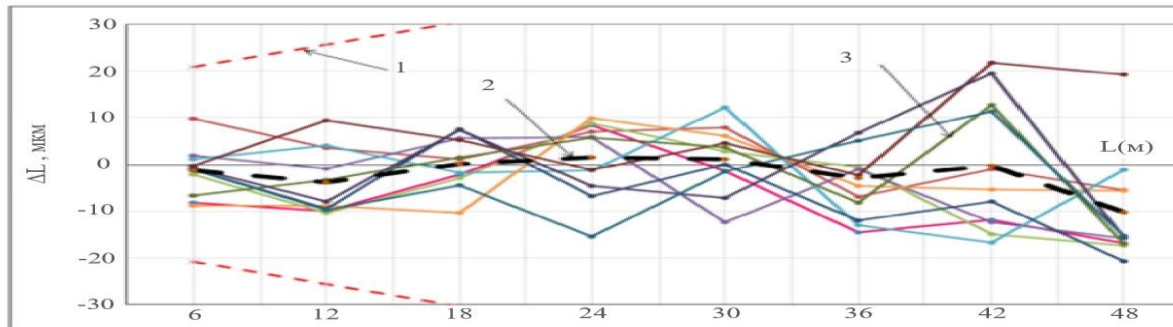


Рисунок 18 - Графики зависимости ПИ лазерного трекера «FARO Laser tracker Vantage» в диапазоне измерений до 48 – ми метров

приведены на рисунке 19. Здесь в качестве линейных эталонов использовались инварные жезлы длиной 1 метр, а в качестве исследуемого МКСИ использовался измерительный преобразователь фирмы «ХайденХайн».

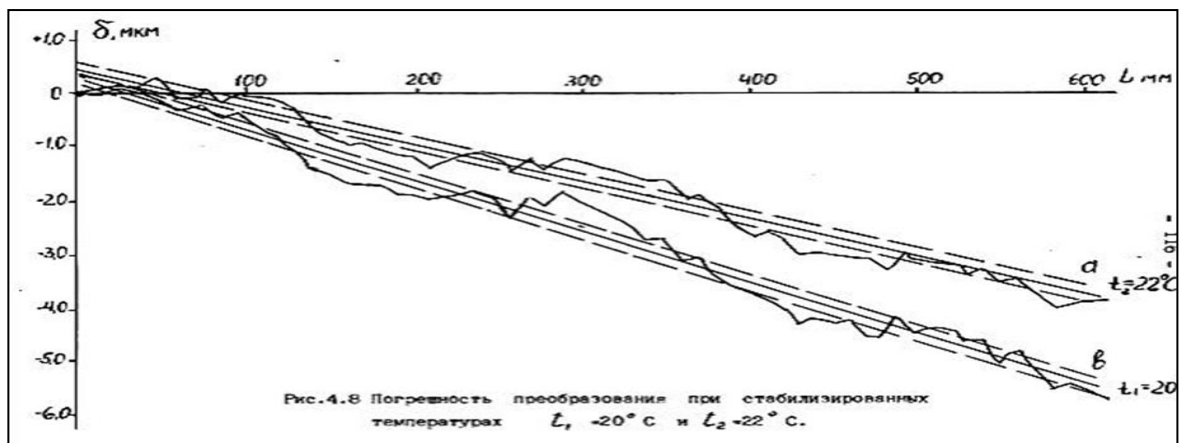


Рисунок 19 – Результаты исследований линейного компаратора с двумя эталонными жезлами

Исследования при разных температурах с учетом температурных коэффициентов линейных расширений эталонов и МКСИ показали, что погрешность Аббе 1-го рода уменьшилась с 4 мкм до 0,2 мкм.

Исследование детерминированной короткопериодической ПИ

С целью подтверждения адекватности основных теоретических положений, сформулированных при разработке метода выявления короткопериодической ПИ,

проведены экспериментальные исследования, выявляющие на практике детерминированную короткопериодическую ПИ конкретного лазерного трекера FARO Laser Tracker Vantage S.

Результаты исследований ПИ с шагом 1 метр показаны на рисунке 20.

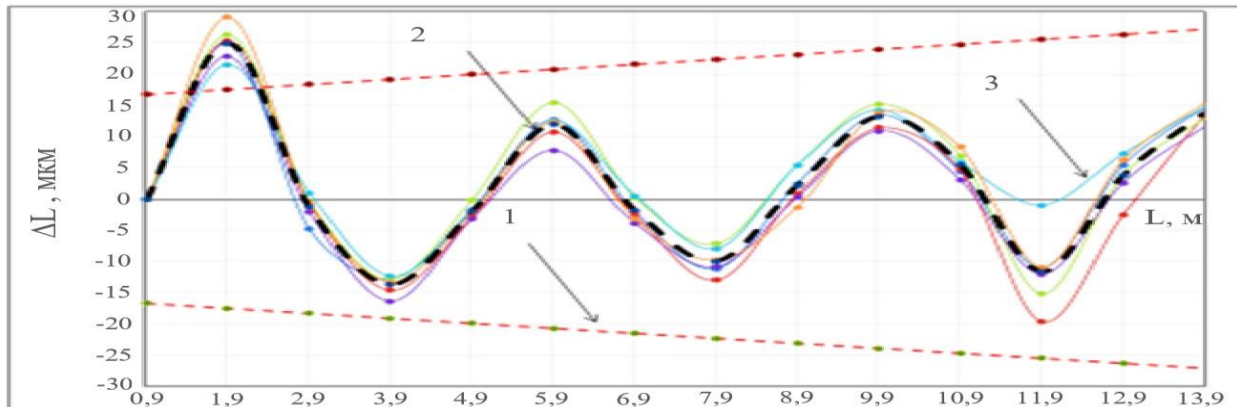


Рисунок 20 - Графики зависимости циклической погрешности измерений расстояний лазерным трекером FARO Laser Tracker Vantage S

Из графиков видно, что циклическая ПИ соизмерима с предельно допустимой ПИ, изменяется с периодом 4 метра, что соответствует длине волны опорного канала гетеродина, на длине в 1 метр превышает допуск.

Исследование горизонтального углового компаратора

Исследование компаратора осуществлялось по призме-многограннику – вторичному эталону (Ростест) и с помощью эталонного тахеометра ТС-2003, аттестованного по первому разряду.

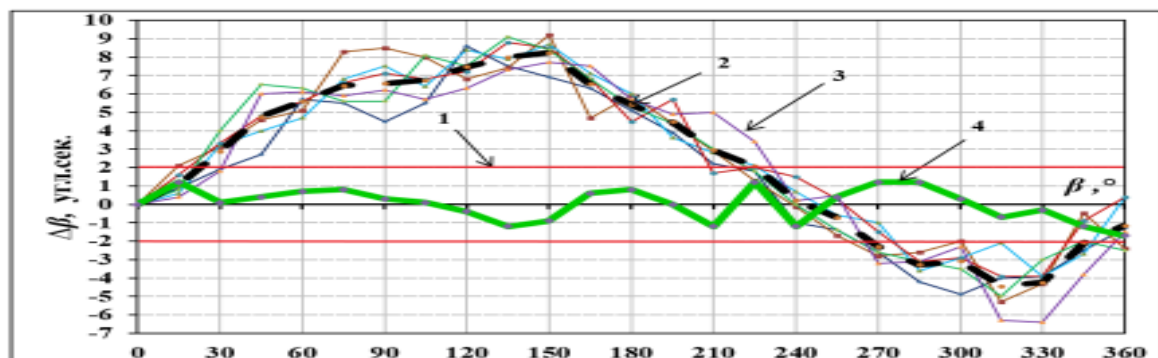


Рисунок 21 - Графики зависимости погрешности измерений при аттестации углового компаратора с помощью эталонного тахеометра Leica TC-2003

Обработка результатов исследований выполнялась аффинными преобразованиями, преобразованиями Фурье и с помощью искусственной нейросети.

Результаты исследований по электронному тахеометру, имеющему ПИ угла $\Delta(\beta) \leq 0,5''$, обработанные методом Фурье преобразований, показаны на рисунке 21, спектр погрешности измерения приведены на рисунке 22.

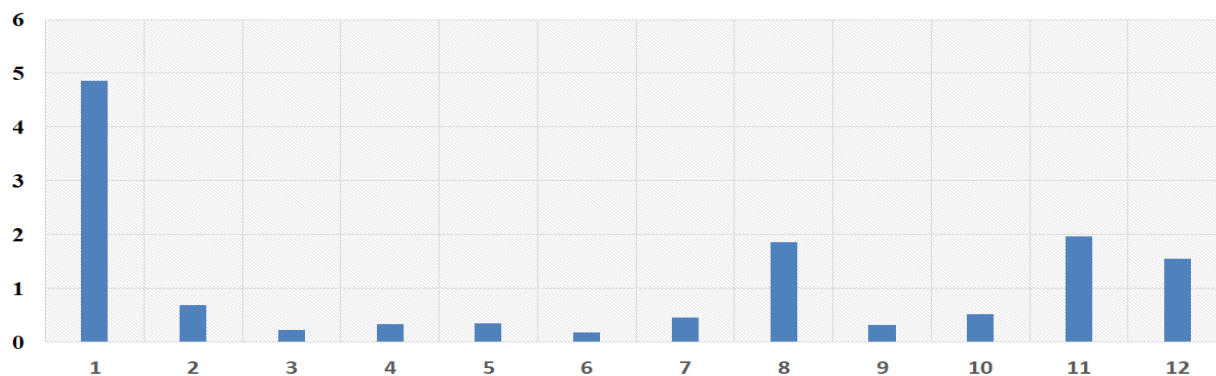


Рисунок 22 - Спектр амплитуд горизонтального углового компаратора

После устранения из спектра систематических гармоник, относящихся к эксцентриситетам осей тахеометра и компаратора, погрешность не превысила $\Delta(\beta) \leq 0,5''$.

Исследование горизонтального углового компаратора с помощью искусственной нейронной сети

Выявленная нейросетью из 10-ти нейронов скрытого слоя случайная составляющая погрешности системы «TS - 2003 – эталонная призма», показана на рисунке 23 и 24.

На рисунке 24 приведен график погрешности измерения горизонтального углового компаратора, выявленной с помощью разработанной ИНС.

Исследование горизонтального углового компаратора с помощью аффинных преобразований

Результаты измерений приведены на рисунках 25 и 26.

Проведенные экспериментальные исследования и вычисления разными методами (дискретным преобразованием Фурье, аффинными преобразованиями и с помощью разработанной ИНС при сходимости результатов в целом

подтверждают адекватность разработанных математических моделей их физическим аналогам в составе разработанного оптико-электронного комплекса, при этом $\Delta(\beta) \leq 0,5''$.

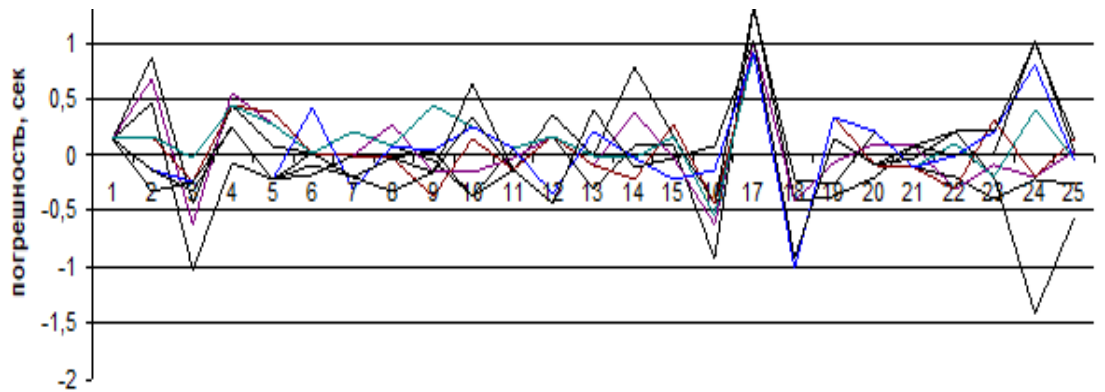


Рисунок 23 – Случайная составляющая ПИ по 24-м граням призмы без коррекции систематической ПИ нейросетью из 10-ти нейронов скрытого слоя



Рисунок 24 – Систематическая составляющая ПИ, выявленная коррекцией нейросетью из 10-ти нейронов скрытого слоя

Исследование вертикальной измерительной системы лазерного трекера

Исследование вертикального компаратора выполнялось прямым методом измерения перемещения каретки компаратора по лазерному интерферометру.

После устранения систематической ПИ компаратора (путем введения поправки, полученной в результате ее гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье), связанной с неподвижным расположением отражателя МКСИ, погрешность трекера (кривая 4 на рисунке 27) не превышает $\Delta(\gamma) \leq 0,5''$, что доказывает адекватность основных теоретических положений,

полученных при разработке математической модели вертикального компаратора.

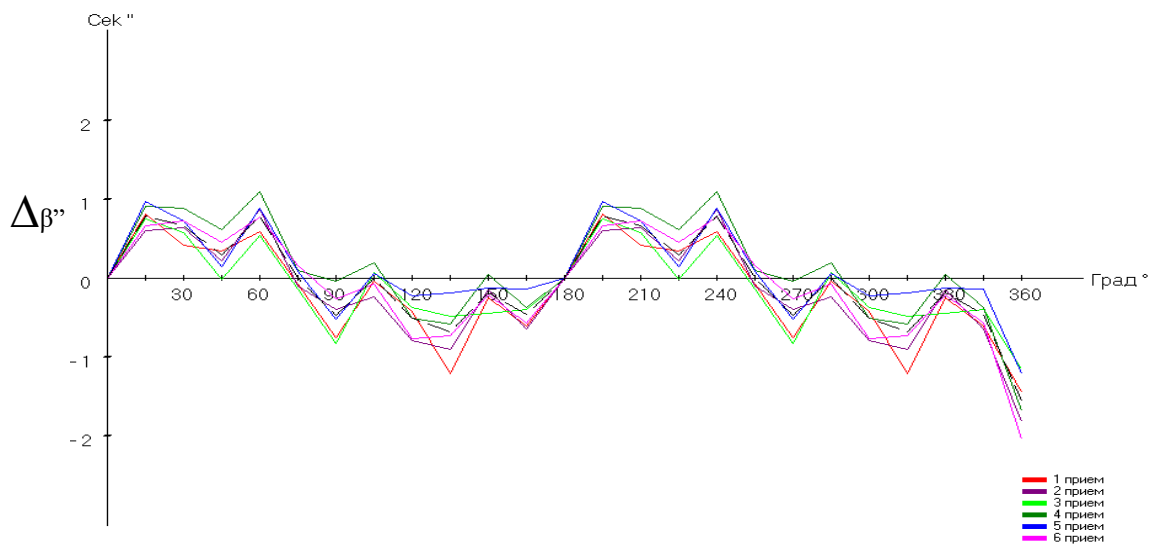


Рисунок 25 – Результаты исследований с помощью аффинных преобразований до устранения эксцентриситета

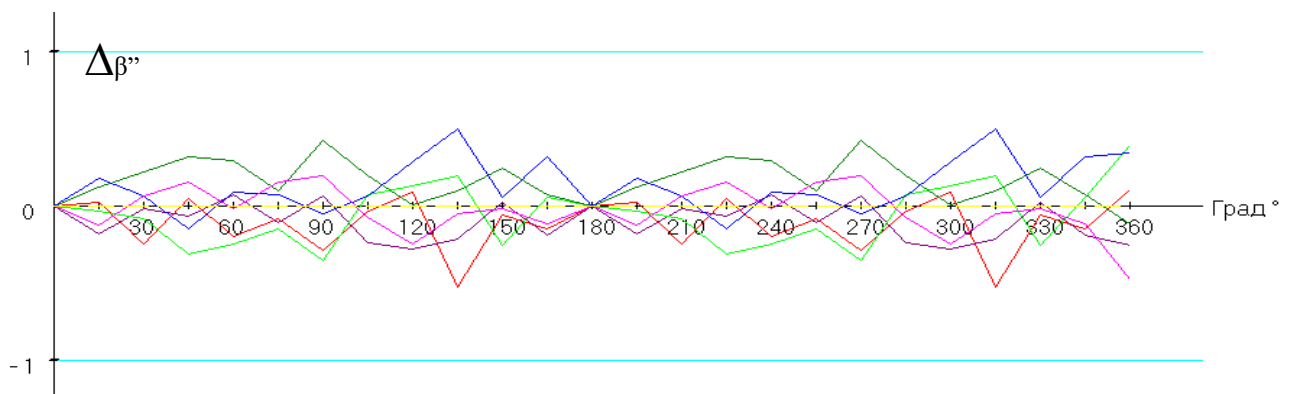


Рисунок 26 – Результаты исследований с помощью аффинных преобразований после устранения эксцентриситета

Заключительный контроль измерений сферических координат и их ортогональности в декартовой системе координат

Для исследований использовались 28 марок, расположенных по горизонту в пределах 100° , по вертикали $\pm 50^\circ$, при этом одна марка располагалась на каретке с жезлом и перемещалась на длину эталонного жезла в пределах до 24-х метров [27,31,34,35]. Схема для уравнивания эталонных координат замкнутой сети в горизонтальной плоскости проекций расположения марок показана на рисунке 28.

Аналогичным образом получена схема для уравнивания координат в вертикальной плоскости. На рисунке 29 приведены результаты вычислений пог-

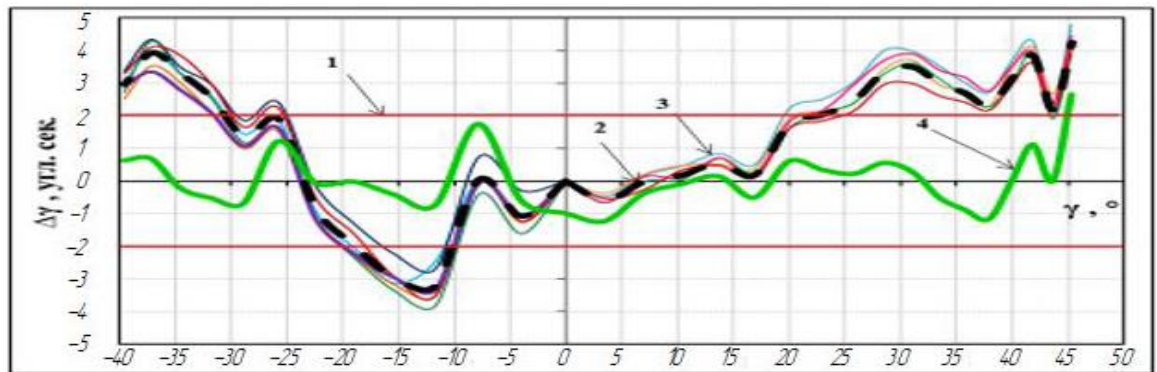


Рисунок 27 - Графики зависимости измерений вертикальных углов лазерным трекером FARO Laser Tracker Vantage S

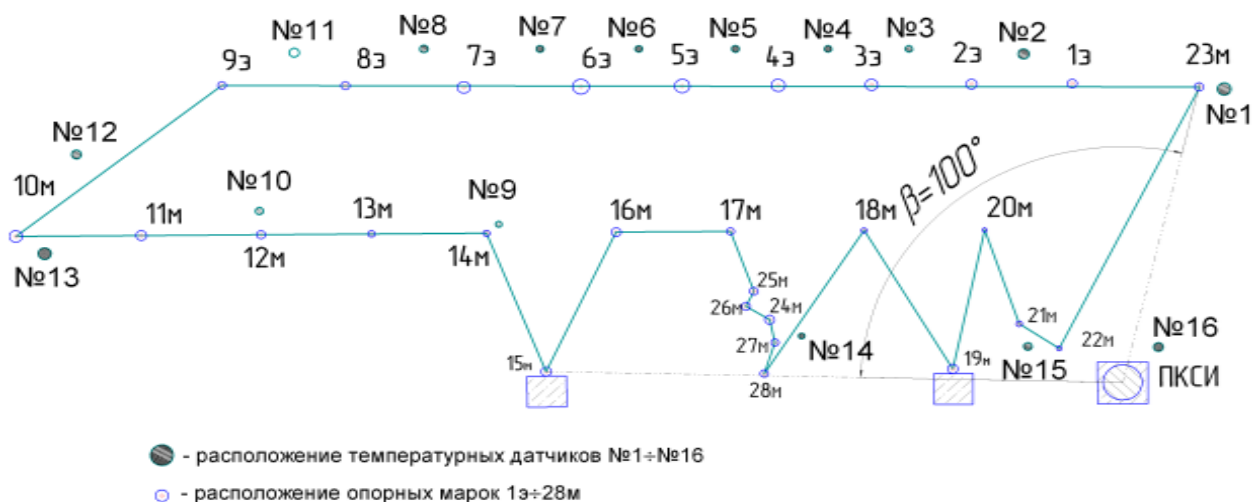


Рисунок 28 – Контроль пространственных координат по маркам

решности пространственных координат по измеренным лазерным трекером сферическим координатам длины линий в пространстве от 2-х до 27-ми метров, обработанные в соответствии с известными международными нормативными документами. Результаты исследований убедительно доказывают их сходимость, подтверждают ортогональность его декартовой системы координат и служат окончательным контролем исследований МКСИ. Результаты проведенных экспериментальных исследований длины линий в пространстве 3D МКСИ

подтверждают правильность разработанных принципиальной схемы пространственного компаратора и методики измерений.

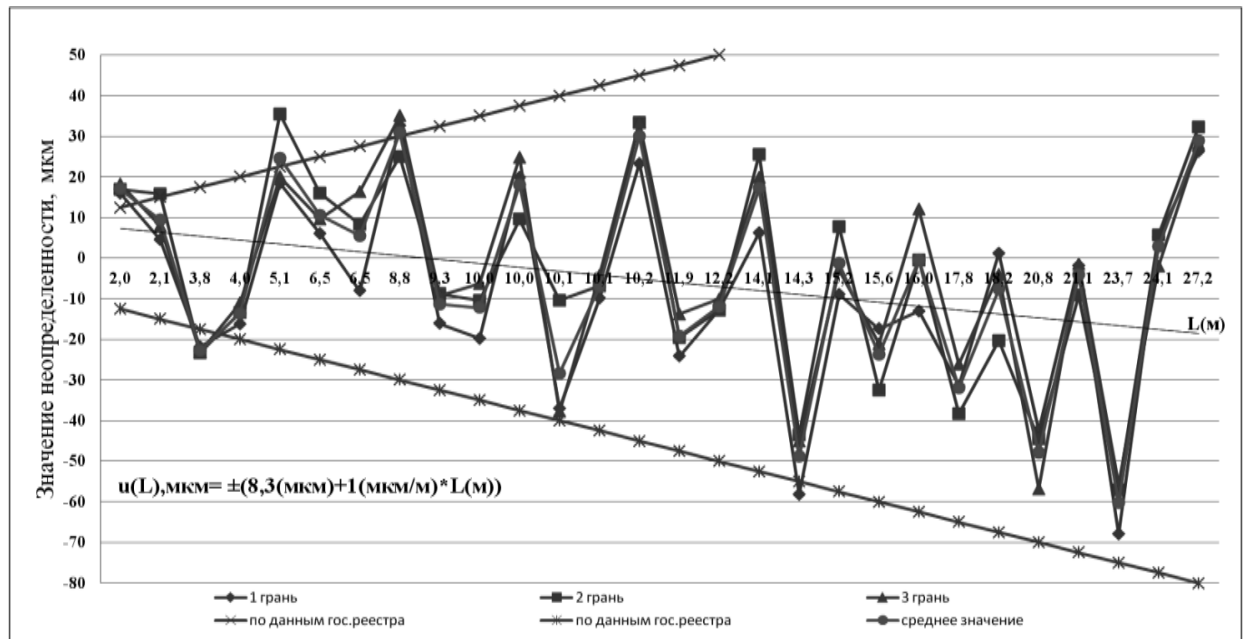


Рисунок 29 – Исследование длины линий в пространстве прямоугольных координат, вычисленных по измеренным сферическим координатам

Исследование измерительных систем с цифровыми нивелирами

В крупногабаритном машиностроении, авиационной и других отраслях при определении пространственных координат одновременно требуется привязка их к линии горизонта, используемая в метрологии для задач геодезии. Поэтому при создании оптико-электронного комплекса одновременно особое внимание было уделено методам исследования измерительных систем, позволяющих выполнить такую привязку в машиностроительных отраслях.

На рисунках 30 и 31 приведены результаты исследований ИСЦН при горизонтальном и вертикальном расположениях рейки.

В соответствии с разработанным Протоколом исследований создана опция для ЭВМ, позволяющая вводить поправки по результатам исследований в производственные измерения.

Проведенные в диссертационной работе экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанных математических моделей их физическим аналогам.

Описанные в Главе 4 экспериментальные исследования проведены при соблюдении единой метрологической базы.

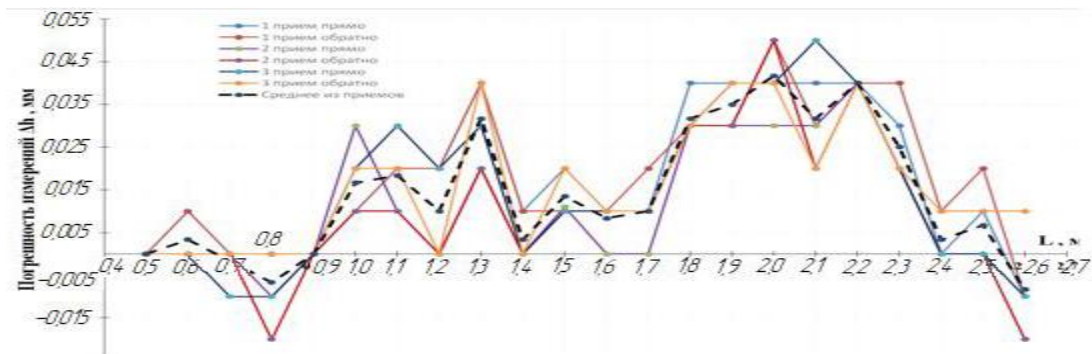


Рисунок 30 – Исследования ИСЦН с горизонтальной рейкой

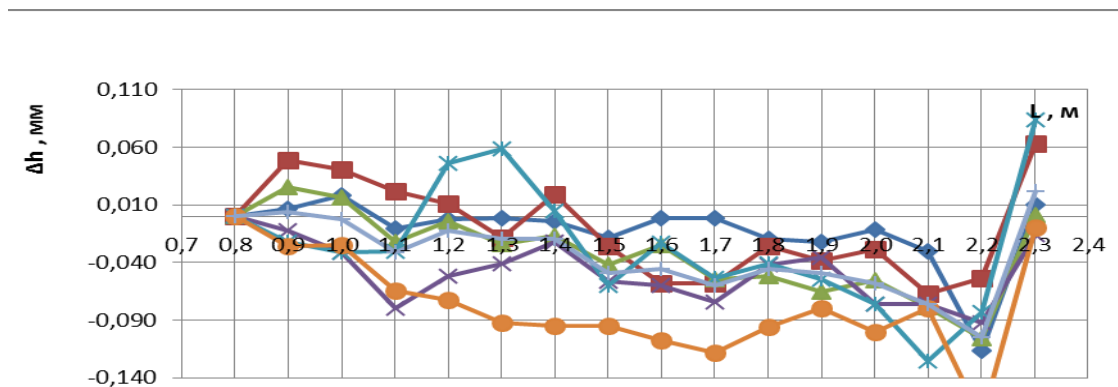


Рисунок 31 – Исследования ИСЦН с вертикальной рейкой

Таким образом на основе теоретического обоснования математическими моделями и алгоритмами методов создания механической реализации эталонной системы пространственных координат (на базе оптико-электронного комплекса, создающего, воспроизводящего, генерирующего единую пространственную систему эталонных координат), доказано, что созданный универсальный пространственный оптико-электронный 3D компаратор обеспечивает точность измерений с коэффициентом запаса не менее двух для широкой гаммы мобильных оптико-электронных средств измерений (МКСИ).

Заключение

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 крупно-габаритных изделий прецизионного машиностроения, где от точности изготовления изделий критически зависят их эксплуатационные свойства.

Разработанный оптико-электронный комплекс для исследований мобильных координатных средств измерений позволяет выявить их наиболее значимые, в т.ч. изменяющиеся со временем, короткопериодические детерминированные составляющие погрешности измерений сферических координат в любой точке заявленного диапазона измерений.

Итоги проведенных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в данной диссертационной работе:

1. Проведен анализ современного состояния научно-технической базы для исследований МКСИ, который показал, что, как научно-техническая, так и нормативно-методическая отечественная и международная базы разработаны по двухточечному (одномерному (1D)) принципу измерений и выявляют только ПИ длин линий в ограниченном пространстве исследований трехмерных координат; научно-техническая и нормативно-методическая базы, позволяющие выявить ПИ пространственных 3D координат в любой точке требуемого пространства измерений практически отсутствуют. По результатам анализа поставлена и решена задача создания научной, технической и нормативно-методической базы оптико-электронного комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений.

2. В диссертации разработана и исследована научно-техническая база оптико-

электронного комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений, как система принципов и методов метрологического обеспечения, направленных на гарантированное достижение требуемой точности результатов исследований метрологических характеристик МКСИ, позволяющая по результатам исследований повысить точность измерений координат точек изделий, как в нормальных условиях, так и в условиях реального производства. Критериями точности результатов исследований являлась их проверка методами, основанными на разных физических принципах.

3. Итогом научного результата являются научно-обоснованные и экспериментально доказанные методы и средства исследований МКСИ, базирующиеся на разработанных и исследованных:

- математических моделях измерений, погрешностей измерений и генерации эталонных сферических координат, основанных на методах аффинных преобразований, нейросетевых алгоритмах, методах регрессии и Фурье анализа для выявления и компенсации систематических погрешностей МКСИ,
- математических моделях влияния внешних условий (температуры, давления, электронных и механических шумов) на результаты координатных измерений средствами измерений, основанными на разных физических принципах,
- алгоритмах, реализующих разработанные математические модели,

4. В диссертации выявлено существенное влияние внешних условий на результаты измерений МКСИ, как в нормальных (требуемых при метрологическом обеспечении МКСИ), так и цеховых условиях, при этом выявлено, что:

а) при метрологическом обеспечении современных координатных средств измерений, которые, как правило, имеют только одну метеостанцию, находящуюся в одной (начальной) точке диапазона линейных измерений, для обеспечения коэффициента запаса по точности не менее 3-х относительно их допуска необходимо обеспечить в лабораторных условиях знание градиента температуры $\Delta T \leq 0,2^\circ\text{C}$;

б) при исследованиях МКСИ с большими градиентами температуры ($\Delta T > 1^\circ\text{C}$,

как правило в производственных цеховых условиях) материальные эталоны (инварные жезлы), длина которых зависит только от температуры, обеспечивают бóльшую точность измерений на длинах более 3-х метров по сравнению с лазерными интерферометрами без коррекции влияния рефракции во всем диапазоне измерений на длинах более 3-х метров по сравнению с лазерными интерферометрами без коррекции влияния рефракции во всем диапазоне измерений.

5. Разработаны и экспериментально подтверждены математические модели линейного горизонтального компаратора:

- с двумя мерами, расположенными на известных расстояниях от оси исследуемого МКСИ (устраняется погрешность Аббе 1-го рода);
- с удвоением перемещения отражателя МКСИ относительно линейного эталона (увеличение диапазона и точности измерений на коротких направляющих линейного компаратора), позволяют расширить диапазон измерений на 24-метровом компараторе до 48-ми метров и повысить точность измерений линейной координаты до требуемого в настоящее время уровня погрешности измерений не более $(0,33+0,66L)$ мкм/м на длине до 24 метров при метрологическом обеспечении современных прецизионных МКСИ в любой точке этого диапазона;
- по схеме с совмещением измерительных осей исследуемого МКСИ и эталонного лазерного интерферометра, расположенных соосно с осью эталонного инварного жезла (компенсируется влияние рефракции и появляется возможность исследований короткопериодических погрешностей измерений).

6. Выявлены разными методами, основанными на разных физических принципах (прямым методом с помощью эталонной призмы, трилатерационным с помощью лазерного интерферометра, эталонным тахеометром и композитным жезлом) исследований горизонтальных угловых измерительных систем МКСИ и результатов их обработки (методом дискретного преобразования Фурье, аффинными преобразованиями, ИНС и регрессионным анализом) с компенсацией систематических погрешностей и определением уровня случайных погрешностей с применением многократных измерений, погрешности исследований гори-

горизонтальных угловых измерительных систем не более 0,5 угловой секунды, обеспечивающие запас по точности исследований относительно допуска на погрешность измерений ($1,1 \div 3$ угловые секунды) современных МКСИ.

7. Теоретически установлено и экспериментально доказано, что разработанный трилатерационный метод исследований точности вертикальных угловых измерительных систем МКСИ на вертикальном компараторе с лазерным интерферометром позволяет выявить ПИ вертикальных углов с погрешностью измерений не более 0,5 угловой секунды, в т.ч. и короткопериодическую, в заявленных диапазонах углов с коэффициентом запаса не менее 2-х.

8. Доказано, что разработанные в диссертации математические модели исследований и использования МКСИ с цифровыми нивелирами обеспечивают погрешность измерений не более 20 мкм за счет привязки измерительной шкалы рейки к основанию (пятке) рейки и дальнейшему введению поправок по результатам калибровки ИСЦН в результаты производственных измерений, обеспечивают контроль результатов производственных измерений по результатам калибровки.

9. Проведенные экспериментальные исследования доказали адекватность разработанных математических моделей исследований МКСИ и погрешностей разработанного оптико-электронного комплекса их физическим аналогам, а также соответствие его метрологических характеристик значениям, сформулированным в положениях, выносимых на защиту.

10. Разработана нормативная документация на оптико-электронный комплекс для исследований $1D \div 3D$ координатных средств измерений, на основе которой метрологическая служба МИИГАиК была аккредитована на право поверки и калибровки указанных выше координатных средств измерений, в том числе:

- 1) Разработаны локальные поверочные схемы, использованные при аккредитации метрологической лаборатории МИИГАиК на право поверки МКСИ,
- 2) Составлены описание типа, программа испытаний и методика поверки, которые использованы при утверждении типа модернизированного оптико-механического компаратора УМК-М МИИГАиК (прототипа универсального оптико-

электронного 3D компаратора (рег.№ 023-01.00063-2011), входящего в состав разработанного оптико-электронного комплекса,

3) На основе указанных документов, разработанных автором, а также по результатам испытаний Испытательным центром ВНИИМС Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии был выдан сертификат об утверждении типа средств измерений RU.E27.004.A №24762,

4) Результатом разработки и исследований оптико-электронного комплекса явились аккредитация метрологической службы университета МИИГАиК на право поверки и калибровки указанных выше средств измерений и создание на базе метрологической лаборатории МИИГАиК совместного с ВНИИМС центра эталонов для координатных средств измерений, деятельность которого утверждена управлением метрологии РОССТАНДАРТа,

5) Для однокоординатных оптико-электронных средств измерений (цифровых нивелиров) разработана утверждена методика измерений длины штрих-кодовых реек на разработанной поверочной установке УМК-М МИИГАиК (рег.№ 023-01.00063-2011),

6) Для измерительных систем с цифровыми нивелирами разработана методика определения систематических погрешностей измерений, на основе которой фирмой «Кредо-Диалог» создана опция, которая позволяет вводить поправки, получаемые при исследованиях на оптико-электронном комплексе, в результаты полевых (производственных) измерений.

Результаты диссертационных исследований внедрены в машиностроении, геодезии и на предприятиях авиационной, космической, приборостроительной отраслей отечественной промышленности и оборонно-промышленного комплекса, (на что имеются соответствующие акты внедрения).

Рекомендации. 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.

Перспективы. В перспективе разработанный оптико-электронный комплекс может быть использован для дальнейшего развития теории $1D \div 3D$ координатных измерений:

- в части совершенствования научной базы с целью дальнейшего повышения точности исследований необходимо разработать матричные методы обработки результатов исследований, в частности, с помощью матричных преобразований методом Дэнавита-Хартенберга выполнить компенсацию систематических погрешностей горизонтального компаратора и учитывать положение отражателя в пространстве,
- в части совершенствования элементной базы разработанного оптико-электронного комплекса для повышения точности исследований реализовать способ и устройство для калибровки 3D МКСИ, описанные в патенте [35], для измерения температуры использовать платиновые термодатчики с погрешностью измерений $0,05^{\circ}\text{C}$, разработать алгоритмы, позволяющие автоматизировать процедуры линейных и угловых измерений, используя фотоэлектрические микроскопы, кольцевые и фемтосекундные лазеры,
- в части нормативно-методической базы исследований МКСИ необходимо разработать документы для признания разработанного оптико-электронного комплекса в качестве рабочего (вторичного) эталона для воспроизведения и передачи единиц длины и угла этом виде измерений, а также испытаний, поверки и калибровки МКСИ,
- в части обеспечения точности изготовления и функционирования изделий в реальных условиях эксплуатации выполнить исследования в широких диапазонах изменений внешних условий.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в изданиях, вошедших в перечень ВАК РФ:

1. Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Хижняков В.А. Метрологическое обеспечение координатных оптико-электронных измерений // Измерительная техника.- №10. - 2016 г. – с. 35-41,
2. Голыгин Н.Х., Шилин В.А. О повышении точности угловых измерений в геодезии // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №5. – с. 94-97,
3. Голыгин Н.Х., Салунин Н.В., Шилин В.А. Оценка точности образцовой Установки для измерительных систем геодезических приборов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №6. – с. 125-128,
4. Голыгин Н.Х., Хиноева О.Б., Ямбаев Х.К. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №4. – с. 17-27,
5. Голыгин Н.Х., Шаимкулов Д.А. Исследование внутришаговой короткопериодической погрешности цифрового нивелира DINI-10 // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2003. - №5. – с. 106-111,
6. Бахарев Е.С., Голыгин Н.Х., Степочкин А.А., Травкин С.В. Исследования оптико-электронных геодезических приборов и устройств для их аттестации // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №5. – с. 123-135,
7. Голыгин Н.Х., Салунин Н.В., Шилин В.А. Преобразователь положения визирной системы на основе координатно-чувствительного приемника излучения // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №3. – с. 88-93,
8. Голыгин Н.Х., Ямбаев Х.К. Измерительный комплекс для аттестации оптико-электронных геодезических приборов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. – №6. – с. 113-117,
9. Голыгин Н.Х., Травкин С.В. Стенд для аттестации вертикальных угловых измерительных систем геодезических приборов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №2. – с. 128-131,
10. Голыгин Н.Х., Ковалев С.В., Лебедев С.В., Пегливанян Г.Г., Федосеев Ю.Е.

- Поверка и калибровка цифровых нивелиров и штрих-кодовых реек // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2009. - №2. – с. 93-97,
11. Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д., Черепанов П.А. Поверка и калибровка современных оптико-электронных геодезических приборов // Геодезия и картография. - №12. – 2012. – с. 139÷143,
12. Голыгин Н.Х., Федосеев Ю.Е., Черепанов П.А. Перспективы использования измерительных систем «цифровой нивелир+штрих-кодовая рейка» // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2013. – №6 – с. 113 ÷ 116,
13. Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д., Лысенко В.Г., Непоклонов В.Б. Поверка и калибровка лазерных трекеров и наземных сканеров на универсальном комплексе эталонов сложных координатных измерений УМК-М МИИГАиК // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. – №1 – с. 22 ÷ 27,
14. Голыгин Н.Х. Принципы метрологического обеспечения координатных оптико-электронных средств измерений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2015. – №5 – с. 107 ÷ 110,
15. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Чугреев И.Г. Методика калибровки координатных средств измерений в сферической системе координат // Приборы. – 2019. - №12. – с. 22÷27.
16. Голыгин Н.Х., Шилин В.А. Стенд для поверки горизонтальных измерительных систем угловых перемещений геодезических приборов // Приборы. - 2006. – №5. – с. 55-56,
17. Голыгин Н.Х., Лазуткин А.М., Пегливанян Г.Г. Исследование погрешности измерений цифровых нивелиров DINI-03 и DINI-12 с инварными штрих-кодовыми рейками // Приборы. - 2009. - №4. – с. 52-56,
18. Бахарев Е.С., Голыгин Н.Х., Травкин С.В., Хиноева О.Б., Ямбаев Х.К. Измерительный комплекс для аттестации угловых и линейных измерительных систем УМК-М // Приборы. - 2006. - №5. – с. 50-54,
19. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Шилин В.А. Оптико-электрон-

ный комплекс для испытаний, поверки и калибровки координатных средств измерений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2021. – т. 65. - №2. – с. 232÷240,

20. Голыгин Н.Х. Влияние первичных погрешностей преобразователей с голографическими дифракционными решетками на погрешность измерения // Метрология. - 1988.-№2. – с. 41-45,

21. Голыгин Н.Х., Шилин В.А., Осипова Н.С., Беломытцев В.Д. Метод оценки и устранения влияния эксцентриситетов на компараторе для исследования электронных тахеометров //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2021. - Т. 65. - №5. - с. 609-614,

22. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Табачникова Н.А., Бабаджанова М.Л., Маликов К.И. Экспериментальные исследования влияния локальных и глобальных изменений температуры окружающей среды на точность измерений длины лазерным интерферометром перемещений //

Законодательная и прикладная метрология. – 2023. - №1. – с. 19 – 24,

Патенты РФ:

23. Голыгин Н.Х. Широкодиапазонный компаратор для поверки и калибровки координатных средств измерений / пат. РФ № RU2401985 С1. – МПК G01C 3/00,

24. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х., Травкин С.В., Степочкин А.А., Стенд для поверки и калибровки нивелиров и реек / пат. РФ № RU2341772 С2.- МПК G01C 5/00,

25. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х., Универсальный метрологический геодезический комплекс / пат. РФ № RU2320961 С1. - МПК G01C 1/00,

26. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х., Бахарев Е.С., Травкин С.В., Хиноева О.Б.

Универсальный метрологический геодезический стенд / пат. РФ № RU2362978 С2. – МПК G01C25/00,

27. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х., Травкин С.В. Устройство для поверки и калибровки вертикальных угловых измерительных систем геодезических приборов / пат. РФ № RU2349877 С2. – МПК G01C25/00,

28. Голыгин Н.Х. Стенд для поверки и калибровки цифровых нивелиров и штрих-кодовых реек / пат. РФ № RU2419070. – МПК G01C 5/00,

29. Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д. Поверочный комплекс координатных приборов и измерительных систем / пат. РФ №2494346. – МПК G01C 25/00,
30. Голыгин Н.Х., Черепанов П.А. Стенд для поверки и калибровки цифровых нивелиров и штрих-кодовых реек / пат. РФ № RU2419766. – МПК G01C 5/00,
31. Голыгин Н.Х., Черепанов П.А. Стенд для поверки и калибровки штрих-кодовых реек/ пат. РФ № RU 2500987. – МПК G01C 5/00,
32. Федосеев Ю.Е., Голыгин Н.Х., Еременко И.Б. Способ высокоточного геометрического нивелирования // пат. РФ №2535230/28 – МПК G01C 5/00,
33. Чугреев И.Г., Голыгин Н.Х., Хижняков В.А. Координатное уравнивание высокоточных измерений. – Программа для ЭВМ. – Свид. о рег. №2016615109 от 16.05.2016 г.,
34. Голыгин Н.Х., Хижняков В.А., Мельников А.В. Стенд для поверки и калибровки измерительных систем «Цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка» / пат. РФ № RU 2584725. – МПК G01C 5/00,
35. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Чугреев И.Г., Пономаренко К.И., Сванидзе М.И. Способ калибровки мобильных 3D-координатных средств измерений и устройство для его реализации / патент РФ №2710900. – МПК G01C 1/00,
36. Чугреев И.Г., Голыгин Н.Х., Хижняков В.А., Маркелов Г.М. Исключение влияния эксцентриситета эталонной призмы и поверяемого 3D координатного прибора при его калибровке (Свидетельство о государственной рег. программы для ЭВМ – № 2018611208), - рег. в госреестре программ для ЭВМ от 25 января 2018 г., приоритет 22 июня 2017 г.,
37. Чугреев И.Г., Голыгин Н.Х., Хижняков В.А., Маркелов Г.М. Преобразование контрольных измерений сложных инженерных изделий, объектов и сооружений к их математическим моделям (Свидетельство о государственной рег. программы для ЭВМ – № 2018618871) - рег. в госреестре программ для ЭВМ от 23 июля 2018 г., приоритет 13 июня 2018 г.,
38. Голыгин Н.Х., Федосеев Ю.Е., Ключников Д.А., Власкин Л.И. Нивелирная рейка для геометрического нивелирования / пат. РФ № RU 2569940. – МПК

G01C 15/06,

Статьи, опубликованные в международной базе Скопус (Scopus):

39. Metrological support for optoelectronic coordinate measurements.

N. Golygin, V. Lysenko, V. Khizhniakov. Measurement Techniques. – 2017. –

T. 59. - №10. - p.1073-1077,

Другие издания:

40. Голыгин Н.Х. Установка для контроля параметров голографических дифракционных решеток. Сб. «Голографические методы в науке и технике». – Л.: ЛИЯФ, 1985. – с. 27-29,

41. Голыгин Н.Х., Кононогов С.А., Лысенко В.Г. Поверка и калибровка многофункциональных приборов для координатных измерений в геодезии и машиностроении // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. - 2009. - №1. – с. 77-79.