

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет геодезии и
картографии» (МИИГАиК)

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский
научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС)»

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)

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант: д. т. н., профессор Лысенко Валерий Григорьевич

Москва, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Анализ состояния вопроса обеспечения исследований	
координатных средств измерений в широких диапазонах измерений	
координат	24
1.1 Состояние проблемы и задачи исследований	24
1.2 Известные методы и средства метрологического обеспечения	
трехкоординатных оптико-электронных МКСИ для измерения	
3D-координат и длины в пространстве	37
1.2.1 Анализ современных мобильных трехкоординатных средств	
измерений	37
1.2.2 Метрологическое обеспечение дальномерных измерительных	
систем	38
1.2.3 Метрологическое обеспечение горизонтальных и вертикальных	
угловых измерительных систем	43
1.2.4 Существующее метрологическое (нормативное, методическое и	
техническое) обеспечение мобильных широкодиапазонных	
трехкоординатных средств измерения	47
1.3 Известные методы и средства метрологического обеспечения	
современных оптико-электронных измерительных систем для измерения	
превышений и высотных размеров	56
1.4 Анализ структуры погрешности измерений на компараторах, поверочных	
установках и методов передачи размеров от эталонов	61
1.5 Пути повышения точности координатных измерений	70
Выводы по Главе 1	71
Глава 2. Разработка научно-технической основы оптико-электронного	
комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений .	74
2.1 Общие требования к разработке оптико-электронного комплекса для	
исследований мобильных координатных средств измерений	74

2.3.6 Разработка линейного компаратора с двумя эталонными мерами, позволяющими исключить влияние отклонения принципа Аббе 1-го рода при параллельном расположении осей исследуемого и эталонных средств измерений (не в створе	83
2.3 Разработка комплекса для исследований мобильных 3D-координатных средств измерений	86
2.3.1 Разработка структурной схемы комплекса	86
2.3.2 Разработка функциональной схемы комплекса для исследований трехкоординатных средств измерений	87
2.3.3 Метод исследований дальномеров МКСИ в диапазоне измерений до 24-х метров	89
2.3.4 Метод исследований дальномеров в диапазоне длины до 48-ми метров...	94
2.3.5 Компаратор для исследований горизонтальных угловых измерительных систем МКСИ	94
2.3.6 Компаратор для исследований вертикальных угловых измерительных систем МКСИ	103
2.3.7 Алгоритмы вычислений при исследованиях МКСИ	105
2.3.8 Оценка точности результатов измерений	106
2.4 Метод повышения точности наведения визирной оси МКСИ на отражатель с использованием преобразователя перемещений на основе координатно-чувствительного приемника излучения	109
2.5 Метод исследований дальномерных измерительных систем с помощью композитного жезла	115
2.6 Методы обработки результатов измерений	116
2.6.1 Метод обработки результатов исследований с использованием дискретного преобразования Фурье	117
2.6.2 Метод обработки результатов исследований с использованием искусственной нейросети	121
Выводы по Главе 2.....	123

Глава 3. Разработка научно-технической основы для исследований

измерительных систем для измерений превышений.....	128
3.1 Методы исследований измерительных систем «Цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка».....	128
3.1.1 Методика исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами на вертикальном компараторе.....	129
3.1.2 Методика исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами на горизонтальном компараторе.....	131
3.1.3 Метод определения погрешности нанесения штрих-кода на инварной рейке.....	133
3.1.4 Метод учета поправок за компарирование измерительных систем с цифровыми нивелирами в результаты производственных измерений	135
3.1.5 Методика учета результатов калибровки в производственных условиях..	135
Выводы по Главе 3.....	136
Глава 4. Механическая реализация и экспериментальные исследования разработанной научно-технической базы для исследований мобильных координатных средств измерений.....	138
4.1 Экспериментальные исследования распределения температуры в термостатном помещении при отклонениях внешних условий.....	138
4.2 Экспериментальные исследования линейного оптико-механического компаратора.....	140
4.2.1 Исследование отклонений от прямолинейности перемещения каретки с эталонным жезлом.....	140
4.2.2 Исследование погрешности измерений при визировании на оптические микроскопы.....	141
4.2.3 Исследование погрешности измерений десятиметрового композитного жезла	143
4.2.4 Исследование погрешности измерений длины радиуса-вектора в диапазоне длин до 48-ми метров.....	145
4.2.5 Исследование погрешности измерений при совмещении осей	

исследуемого МКСИ и эталонного лазерного интерферометра.....	147
4.2.6 Исследование погрешности измерений оптико-механического компаратора лазерным трессером.....	148
4.2.7 Исследование измерительного преобразователя перемещений с голографическими дифракционными решетками	149
4.2.8 Исследование детерминированной короткопериодической погрешности измерений светодальномером.....	150
4.3 Исследование погрешности измерений компаратора для исследований горизонтальных угловых измерительных систем.....	151
4.3.1 Определение погрешности измерений растрового измерительного преобразователя угловых перемещений.....	151
4.3.2 Экспериментальные исследования по выявлению влияния эксцентриситета установки исследуемого МКСИ на горизонтальном угловом компараторе с вычислением с помощью дискретного преобразования Фурье.....	154
4.3.3 Экспериментальные исследования по выявлению влияния эксцентриситета установки исследуемого МКСИ на круговом компараторе с вычислением с помощью ИНС	155
4.3.4 Экспериментальные исследования по выявлению влияния эксцентриситетов установки исследуемого МКСИ на горизонтальном угловом компараторе с вычислением с помощью аффинных преобразований	157
4.4 Исследование вертикального углового компаратора.....	159
4.5 Погрешность измерений длины линий в пространстве.....	161
4.6 Экспериментальные исследования измерительных систем «цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки».....	162
4.6.1 Исследование нанесения отдельных штрихов на инварной полосе штрих-кодовой рейки.....	162
4.6.2 Исследование измерительных систем с цифровыми нивелирами.....	164
4.6.3 Выявление погрешности измерений превышений измерительной системой «нивелир + рейка» с использованием концевых мер длины.....	168
4.6.4 Исследования ИСЦН на горизонтальном линейном компараторе.....	174

4.6.5 Исследование ИСЦН при горизонтальном и вертикальном расположении рейки.....	177
4.6.6 Разработанная методика измерений измерительными системами с цифровым нивелиром и двухпяточными рейками позволяет учитывать результаты исследований в реальных условиях эксплуатации.....	179
Выводы по Главе 4.....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	181
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ: Письма от предприятий, подтверждающие актуальность разработки оптико-электронного комплекса для координатных средств измерений	206

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе обобщены результаты исследований, выполненные автором в период с 2003 по 2024 гг., направленные на разработку оптико-электронного комплекса для решения проблемы координатных измерений в широких диапазонах длин, углов и превышений, позволяющего повысить точность 1D÷3D координатных измерений в любой точке заявленного пространства измерений за счет снижения уровня погрешности измерений при метрологическом обеспечении многофункциональных широкодиапазонных мобильных оптико-электронных координатных средств измерений и измерительных систем.

Актуальность темы исследования. В настоящее время мобильные оптико-электронные координатные средства измерений (МКСИ) для измерения координат и размеров крупногабаритных изделий и объектов, как в плане, так и по высоте, широко известны и интенсивно развиваются, в отечественной практике используются при создании новых высокотехнологичных производств, а также в критических технологиях, обеспечивая безопасность измерений и контроля параметров пространственных координат, линейных и угловых размеров. В тяжелом машиностроении, кораблестроении, авиации, космической технике, геодезии и других отраслях производства используются десятки тысяч таких МКСИ (лазерные трекеры, интерферометры, электронные тахеометры (в том числе самонаводящиеся), измерительные системы с цифровыми нивелирами (ИСЦН), наземные сканеры и др.). Для некоторых деталей типа корпусов подводных лодок, самолетов, турбин гидроагрегатов с известными математическими моделями формы изделий, а также при исследовании динамических характеристик мостов, нефтепроводов и т.п., где они являются практически единственно возможным средством измерения, актуальными являются вопросы исследований критической погрешности измерений 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 и где эксплуатационные свойства (показатели) конечных изделий существенно (критически) зависят от точности измерений координат обрабатываемых поверхностей изделий.

Работа по заданным программам (математическим моделям) позволяет также выполнять измерения деталей сложной формы, например, турбинных лопаток, в которых необходимо выполнить более тысячи измерений параметров. Современные требования к точности изготовления крупногабаритных деталей и юстировке крупногабаритных изделий вызывают необходимость уменьшения допусков на изготовление больших размеров. Например, при юстировке зеркала с фокусным расстоянием 12 метров размером 12,5 м×12,5 м, используемого для исследования антенн, необходимо выставлять отдельные его щиты (более 200 шт.) с ПИ не более 15-ти микрометров. Анализ литературных источников информации и экспериментальные исследования, выполненные автором диссертации, показывают, что в бюджет ПИ МКСИ значительный вклад вносят высокочастотные детерминированные (короткопериодические) составляющие ПИ (ВДК), которым в известных в настоящее время методиках измерений не уделяется должного внимания.

В МКСИ основные источники в бюджете ПИ связаны с используемыми в них угловыми и линейными измерительными преобразователями перемещений, их взаимным расположением и внешними условиями. При заявленных микрометровых допусках на параметры изделий особое значение необходимо уделить ПИ, связанной с методикой исследований МКСИ (поверкой, калибровкой, испытаниями с целью утверждения типа средства измерений (ПКИ)).

До принятия Федерального Закона «Об обеспечении единства измерений» №102-ФЗ [146] в связи с отсутствием эталонов оценка точности широкодиапазонных координатных МКСИ выполнялась в основном по материалам документации зарубежных фирм - производителей, а также по результатам косвенных измерений, не привязанных напрямую к вышестоящим эталонам, и на линейных базисах (линейных компараторах).

Пространственные 3D координатные измерения геометрических параметров в широких диапазонах длин существенно отличаются от одномерных измерений больших длин. Известные в настоящее время методы и эталонные средства измерений, разработанные в трехмерном пространстве, не позволяют обеспечить требуемую точность измерений при ПКИ МКСИ в пространстве, так как не учитывают ротационные и трансляционные составляющие ПИ, а также взаимное расположение сферических и прямоугольных координат.

Развитие и совершенствование МКСИ, повышение их точности и надежности невозможно без создания новых методов и средств контроля их метрологических характеристик, разработки новых измерительных технологий и средств их исследований, испытаний, поверки и калибровки.

При разработке методов и средств исследований координатных средств измерений необходимо решить комплекс вопросов по обеспечению единства измерений, включая научные, технические, нормативно-методические, а также организационные составляющие, разработать единый универсальный подход к метрологическому обеспечению МКСИ.

Данная работа выполнялась в соответствии с приоритетными направлениями развития отечественной промышленности (п. 1 – безопасность, п. 5 – перспективные виды вооружения и специальной техники, п. 6 – развитие природопользования, п. 8 – энергоэффективность и ядерная энергетика), определенными в Указе Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г. по критическим технологиям атомной энергетике (п. 9), предупреждения и ликвидации ситуаций природного и техно-генного характера (п. 21), создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения (п. 24).

В Приложении 1 приведены Письма от предприятий отечественной промышленности (Управления метрологии Росстандарта, РОСТЕСТа, РАН, Красногорского оптико-механического завода, Роскартографии, РКЦ им. М.В. Хруничева, Атомной и других отраслей), подтверждающие актуальность разработки оптико-электронного комплекса для координатных средств измерений.

Исходя из выше сказанного, разработка новых технологий, методов и

средств контроля метрологических характеристик координатных МКСИ, создание научно-методической и технической базы обеспечения единства измерений, а также корректировка существующей нормативно-технической документации их метрологического обеспечения является актуальной и широко востребованной в высокотехнологичных отраслях промышленности задачей.

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 исследований 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 Спиридоновым А.И. Исследованию МКСИ также посвящены труды проф. Соломатина 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. Туруханов Б.Г. (ЛИЯФ), д.т.н. Лысенко В.Г. (ВНИИМС), д.т.н. Телешевско-го 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).

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÷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÷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-ми 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.

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.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке ма-

тематических 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 решения 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.

Заложенные принципы:

- при метрологическом обеспечении в целях импортного замещения по возможности использовать отечественные эталонные средства измерений,
- возможность реализовать математическую модель функционирования исследуемого МКСИ в единой с эталонным комплексом системе 3D координат,
- измерения проводить с одной установки МКСИ (соблюдением единой метрологической базы с оптико-электронным комплексом),
- при линейных измерениях особое внимание уделять изменению внешних условий (градиенту температуры), соблюдению принципа Аббе, косинусной составляющей ПИ, отклонению от прямолинейности перемещения эталона и другим влияющим факторам,
- при угловых измерениях экспериментально выявлять и математическими методами компенсировать влияние эксцентриситета осей МКСИ и эталонного углового горизонтального компаратора на результат измерения,
- выявить допустимую границу колебаний внешних условий, при которой можно заменить лазерный интерферометр (ЛИ) иностранного производства на материальный эталон (трехметровый жезл с оптическими или фотоэлектрическими микроскопами).

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

1. Изобретённый метод генерации (воспроизведения) 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
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;
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;
4. Изобретённый метод генерации (воспроизведения) эталонного горизонтального угла β , разработанный на основе 24-хгранной призмы 1-го разряда, **позволяет исследовать** погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ, **обеспечивая** измерение горизонтальных углов в пределах $0\div 360^\circ$ с погрешностью измерений не более 0,5'' секунды, что не менее, чем в два 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;

5. На разработанном горизонтальном линейном компараторе изобретённый трилатерационный метод генерации (воспроизведения) горизонтальных эталонных углов **позволяет** исследовать горизонтальные угловые измерительные системы МКСИ (измеряющие угловую горизонтальную сферическую координату β) с помощью композитного жезла или лазерного интерферометра по предварительно откалиброванному по длине МКСИ, обеспечивая выявление короткопериодической ПИ измерений с ПИ не более 0,5”;

6. Разработанный вертикальный линейный компаратор, основанный на трилатерационном методе генерации (воспроизведения) вертикальных углов **позволяет исследовать** вертикальные угловые измерительные системы МКСИ, вертикальной сферической угловой координаты γ по предварительно откалиброванному по длине МКСИ и **выявить**, в том числе, и короткопериодическую 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”);

7. На основе разработанных математических моделей влияния внешних условий на метрологические характеристики эталонов, учитывающих отклонение внешних условий в любой точке диапазона измерений (формула температурного удлинения жезла) 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;

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 ΔL (мкм) $\leq \pm [8,3\text{мкм} + 1 (\text{мкм/м}) \times L(\text{м})]$ мкм;

Степень достоверности полученных результатов. 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. 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 – XXI 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.).

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.

Глава 1. Анализ состояния вопроса обеспечения исследований координатных средств измерений в широких диапазонах измерений координат

1.1 Состояние проблемы и задачи исследований

В настоящее время в России, как и в других, экономически развитых, странах наблюдается рост наукоемких производств в машиностроении, судостроении, авиационной, оборонной, геодезии и других отраслях промышленности. Высокие технологии обеспечивают новый уровень точности и улучшают эксплуатационные показатели изделий. До тех пор, пока требования к точности производства и эксплуатации деталей сложной формы, особенно это касается крупногабаритных изделий, были относительно невысоки, точность обеспечивалась технологически, либо выборочным контролем с использованием механических и оптических средств контроля (микроскопов, проекторов, нутромеров, измерительных головок и др.). Тенденция к увеличению требований по точности изготовления изделий выдвигает требования 100% контроля их параметров в процессе изготовления. 100% контроль обеспечивает безопасность в критических областях технологий и сегодня эта проблема находится под постоянным наблюдением государственных органов.

Координатные средства измерений больших диапазонов измерений (от единиц до десятков метров) применяются: при контроле крупногабаритных деталей и узлов морских судов, подводных лодок, самолетов, турбоагрегатов, атомных реакторов, эвольвентных зубчатых передач, турбинных лопаток, а также при статических и динамических испытаниях и исследованиях смещений трубопроводов, мостов и сооружений (см. рисунок 1.1).

В области координатных измерений практически произошел переход от оптических методов измерений к оптико-электронным, появился принципиально новый класс оптико-электронных координатных средств измерений, решающих

одновременно задачи, как в области линейных и угловых измерений, так и в трехмерном пространстве. Такие задачи являются особенно проблемными для критических технологий, где встречаются детали сложной формы, а именно, в прецизионном машиностроении, аэрокосмической и автомобильной промышленности, оборонном комплексе, в геодезии, например, при слежении на геодинамических полигонах, за осадками зданий и сооружений и другого оборудования.

Кроме того, следует отметить, что в современных МКСИ, используемых для целей, например, машиностроения, при измерениях и обработке результатов все более используются методы, ранее использовавшиеся только в геодезии, например, метод свободной станции, используемый в лазерных трекерах и сканерах. Оптико-электронные методы позволяют расширить функциональные возможности средств измерений, повысить точность измерений, автоматизировать процесс измерений и обработку их результатов [80,88]. На российском рынке используется широкая гамма лазерных трекеров, манипуляторов, лазерных интерферометров и сканеров, измерительных систем «цифровой нивелир + штрих-кодовые рейки», светодальномеров и электронных теодолитов, а также самонаводящихся тахеометров, как отечественного, так и в основном иностранного производства.

Проверка метрологических характеристик МКСИ органами Росстандарта показывает [12], что до 44% отечественных и до 10% импортных МКСИ не соответствуют заданным нормам. В связи с этим особо остро встала проблема исследований и метрологического обслуживания координатных оптико-электронных средств измерений.

В отличие от оптических и механических средств, оптико-электронные средства измерений, как правило:

1. Многофункциональные, имеют сложные оптические и электрические схемы, подвержены влиянию внешних условий и старению элементов, приводящих к появлению короткопериодических (высокочастотных) детерминированных составляющих суммарной ПИ,

2. Могут обеспечить более высокую точность измерений, при этом во многих



Рисунок 1.1 - Примеры крупногабаритных изделий

случаях погрешность измерения соизмерима с технологически достижимой, дальнейшее повышение точности измерений возможно за счет их калибровки, учета постоянных во времени более высокочастотных детерминированных составляющих погрешностей измерений,

3. Так как при их использовании возможна автоматизация процесса измерений и обработки результатов измерений, то возникает необходимость и поиска новых методов обработки результатов измерений, например, аффинных преобразований, дискретного Фурье анализа, построения нейронных сетевых алгоритмов, путем дальнейшего ввода соответствующих поправок в результаты измерений, 4. Очевидно, возрастает трудоемкость процесса исследований, например, за счет увеличения количества исследуемых точек на оборот алидады;

в оптико-электронных СИ особым образом проявляются динамические составляющие ПИ, которые возможно выявить только в автоматизированном режиме измерения,

5. Устройства для исследований 3D МКСИ должны иметь возможность проверки горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем, измерения длин, расстояний и превышений, как в нормальных условиях, так и в условиях, заданных техническими условиями на МКСИ,

6. Исследования измерительных систем с цифровыми нивелирами и штрих-кодовыми рейками практически невозможны известными методами проверки метровых интервалов рейки, так как считывание происходит электрически с большого участка рейки путем анализа автокорреляционной функции,

7. Исследования координатных оптико-электронных МКСИ требуют больших материальных затрат, а также большего времени на проведение измерений, что увеличивает методическую ПИ при измерениях, поэтому возникла необходимость в поиске новых методов исследований.

Исследования, проведенные рядом авторов [85], показывают, что в настоящее время в различных диапазонах координатных измерений наблюдается серьезное отставание по точности между требуемым и достигнутым уровнями измерений, практически отсутствуют эталонные средства координатных измерений в диапазоне координат от 1-го до 50 метров. На рисунке 1.2 приведена диаграмма, из которой по исследованиям, проведенным во ВНИИМС [75], видно, что уровень достигнутой в предшествующем десятилетии точности измерений геометрических величин в машиностроении ниже требуемой. В дополнение к этому, анализ показывает, что за последнее десятилетие в этой отрасли резко увеличился разрыв в уровне достигнутой точности и других эксплуатационных показателей между МКСИ, производимыми в России и за рубежом. Из сказанного следует необходимость существенного развития эталонной базы в области измерений геометрических параметров обработанных поверхностей, разработки системы обеспечения единства их измерений на новом уровне точности, а также создание принципиально новых методов исследований.

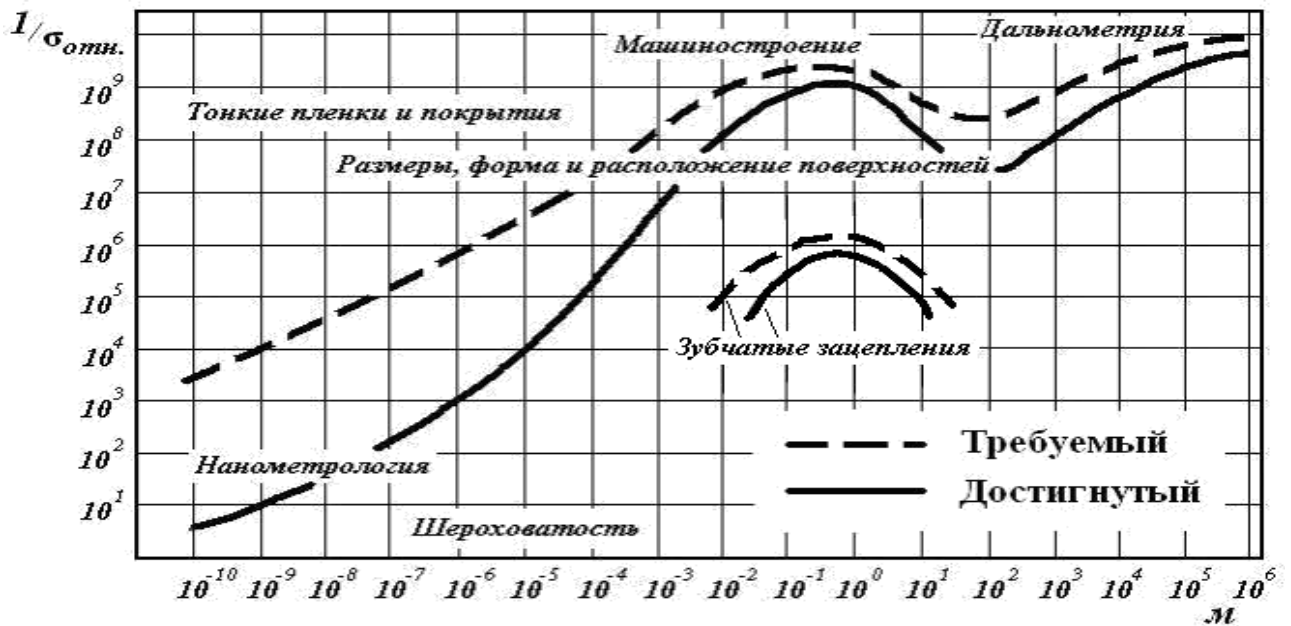


Рисунок 1.2 - Требуемый (сплошная линия) и достигнутый (штриховая линия) уровни точности измерений геометрических величин

На рисунке 1.3 показаны результаты измерений при исследованиях лазерного трекера, выполненные в национальном институте метрологии в Германии. Из них видно, что размах показаний при измерениях составляет порядка 100 мкм, что характеризует ПИ, как явно превышающую современный уровень требований по точности измерений в требуемых диапазонах измерений координат.

В указанном выше диапазоне измерений при исследованиях МКСИ в основном используют традиционные подходы, связанные с поочередной проверкой угловых и линейных метрологических параметров (погрешности, диапазонов измерений и др.). При этом используются отдельные стенды, на которых устанавливаются исследуемые средства координатных измерений, что существенно увеличивает методическую ПИ при измерениях, а именно, при перестановке координатного МКСИ каждый раз сказываются ПИ его центрирования при совмещении осей, ПИ установки уровня, ПИ ориентирования МКСИ на коллиматор (визирную марку) и др. Выше сказанное впоследствии влияет и на

точность измерения координат. Кроме того, известные средства измерений [99,100] не исследуются во всем рабочем диапазоне измерений с требуемой ПИ.

Существуют разные методы исследований линейно-угловых МКСИ, наиболее распространенный и точный из них, метод сравнения с эталонной

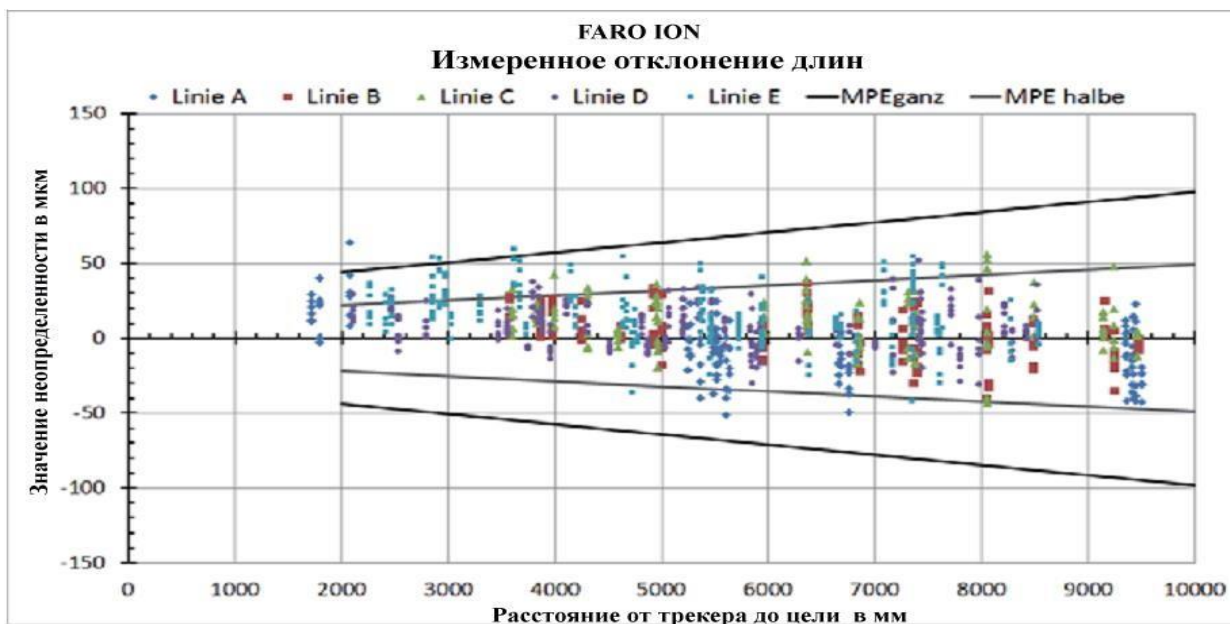


Рисунок 1.3 - Результаты измерений при калибровке лазерного трекера в национальном институте метрологии в Германии

мерой на компараторе. При этом существующие в настоящее время государственные и локальные поверочные схемы обеспечения единства измерений при передаче точности от эталонных СИ к рабочим МКСИ предполагают практику решения одномерных линейных и угловых измерений [72,100,108].

В связи с тем, что 3D координатные измерения никак не вписываются в существующую теорию и практику одномерных линейно-угловых измерений, необходимо решить большое количество задач по их метрологическому обеспечению, разработать научные, технические и нормативные основы обеспечения единства координатных измерений.

В современном производстве экономически развитых стран до 90% измерений составляют линейно-угловые измерения, при этом свыше 80%

операций размерного контроля сложных деталей осуществляется на координатно-измерительных машинах (КИМ), оснащенных мощным компьютерным обеспечением. Доля стоимости координатно-измерительных операций высокотехнологичных производств изделий сложной формы достигает 50% от общей стоимости изделий. Например, лопатки газотурбинных двигателей являются наиболее массовыми деталями. Контроль лопаток – важная и неотъемлемая часть технологического процесса их изготовления. Контроль точности изготовления лопаток выполняется для выявления производственных отклонений от заданных допусков, определяющих допускаемые предельные отклонения от теоретических размеров элементов пера лопаток (поверхностей спинки и корыта, входных и выходных кромок), размеров хвостовиков, полок хвостовиков, бандажных и антивибрационных полок, крепежных элементов хвостовика (пазы, выборки, отверстия и др.), положения трактовых поверхностей хвостовиков и полок.

В процессе производства контролю подлежат десятки геометрических параметров лопатки в [52], количество контролируемых координат точек достигает более тысячи. Известные в настоящее время методы контроля параметров лопаток, основанные на методах стереонаблюдения, голографических и триангуляционных, не обеспечивают точность измерений, трудоемки и не всегда поддаются автоматизации процесса измерений [53,54,111].

В настоящее время в Европе эксплуатируется свыше 20 тысяч КИМ, в США – более 15 тысяч КИМ, при этом ежегодный прирост составляет порядка 20%. В России эксплуатируется более тысячи КИМ. Традиционные КИМ обеспечивают измерения параметров деталей в основном размерами до 1÷6 метров. В последние 10-15 лет появились новые КИМ – мобильные лазерные трекеры и сканеры, электронные теодолиты и тахеометры, диапазон измерений которых составляет десятки и даже сотни метров.

Следует сказать, что проблема пространственной трехмерной метрологии появившихся МКСИ в полном объеме не решена до сих пор на национальном и международном уровне, в основном решается методом проб и ошибок. В насто-

ящее время отсутствует системный подход к метрологическому обеспечению МКСИ. Кроме того, в полном объеме не учитываются все факторы, влияющие на точность измерений при их исследованиях, отсутствует математическая оценка суммарной методической погрешности измерений.

Настоящая диссертационная работа направлена на разработку научно-технической базы создания оптико-электронного комплекса для исследований современных оптико-электронных МКСИ, : лазерных трекеров, манипуляторов и сканеров, электронных теодолитов и тахеометров, светодальномеров и цифровых нивелиров, исследованию их измерительных систем, а также на создание единого системного подхода к выявлению источников их погрешности измерений.

Первичная информация о координатах точки трехкоординатным МКСИ выдается в сферической системе координат, начало системы координат находится в точке пересечения трех прямых: визирной оси зрительной трубы, вертикальной оси вращения и горизонтальной оси вращения. Вертикальная ось Z декартовой системы координат ориентируется перпендикулярно плоскости горизонта.

Погрешность угловых преобразователей сказывается значительно больше на точности измерений, чем измеренная длина. Связь сферических координат точки пространства с декартовыми в векторной форме можно описать известным соотношением: соотношением:

$$\Delta X = \Delta L \cos \gamma \cos \beta, \Delta Y = \Delta L \cos \gamma \sin \beta, \Delta Z = \Delta L \sin \gamma \quad (1.1)$$

Учитывая то, что измерения, как правило, выполняются полным приемом (ход прямо и обратно), часть инструментальных (приборных) ПИ компенсируется, не исключенные составляющие ПИ не превышают $2 \div 3\%$. Систематические составляющие погрешности измерений компенсируются введением поправок с помощью встроенных программных средств.

Для лазерных трекеров ПИ можно теоретически рассчитать по тем же формулам, однако, практически сделать это невозможно, так как мы не знаем расположение осей системы координат, не можем напрямую выявить угловые

рассогласования между осями. Поэтому ПИ мобильных КИМ (лазерных трекеров) целесообразно выявлять при их поверке и калибровке с помощью эталонов.

Традиционные методы исследований средств измерений предполагают в основном использование инварных штриховых мер [70,84,94,105], косвенную проверку на частотах задающих генераторов [86], создание полевых компараторов или с использованием лазерных интерферометров [100,72,103,4,77,76,78, 105,106], инварных проволок [98,2], концевых мер длины и специальных жезлов со сферическими наконечниками, переставляемых в пространстве измерения по заданным траекториям [101]. Допустимое отклонение длины штриховой меры в зависимости от класса точности меры лежит в пределах от 0,1 до 50 мкм [5]. ПИ при наведении на штрих меры с помощью серийно выпускаемых фотоэлектрических микроскопов (ФЭМ) находится в пределах $\pm 0,5$ мкм [10,102]. Известно использование вместо ФЭМ многоэлементных приемников излучения, полученных на основе приборов с переносом заряда, штрихи меры проецируют в их плоскости и подсчитывают количество импульсов, уместившихся между ними [95].

Применение лазерных интерферометров (ЛИ) и трекеров (ЛТ), несмотря на их высокую стоимость, имеет ряд преимуществ. Предел измерений с помощью ЛИ и ЛТ может достигать 60-ти и более метров [76], излучатель при этом может быть развязан от объекта измерения. При высокой разрешающей способности порядка $0,1 \div 0,01$ мкм у них отсутствуют характерные для штриховых мер длины ПИ [78]. Наличие связи с ЭВМ позволяет автоматизировать процесс измерений. ПИ современными ЛИ с использованием блока автоматической компенсации достигает порядка $1 \div 2$ мкм/м [76, 82] и менее. Однако на ПИ ЛИ и ЛТ оказывают влияние короткопериодические отклонения и колебания внешних факторов: турбулентность воздуха, температура и атмосферное давление, а также погрешности датчиков температуры, влажности и давления [78,82,101], анализ дисперсионной формулы Эдлена показывает, что наибольшее влияние на ПИ оказывают непостоянство температуры и атмосферного давления, которые

учесть наиболее сложно. Из сказанного следует, что при измерениях с использованием лазерных интерферометров и трекеров необходим постоянный контроль измерений внешних условий в диапазоне измерений, так как они наиболее чувствительны к их изменениям в процессе измерений.

Методы исследований угловых измерительных систем в основном основаны на использовании эталонных призм с автоколлиматорами [69,74,75,101,158,162], в машиностроении известны работы по исследованию угловых преобразователей с использованием фотоэлектрических преобразователей более высокого класса точности [89].

Однако известные устройства нацелены в основном на проверку одного из метрологических параметров (горизонтальных или вертикальных углов, линий или превышений).

При метрологическом исследовании эталонного средства измерения необходимо выполнить [3,59] оценку полноты и правильности методов выражения метрологических характеристик средства измерения, обеспечивающих требования к средству измерения, оценку значений ПИ и других характеристик во времени, а также экспертизу методики его периодической переаттестации. При этом необходимо выявить, как систематическую, так и случайную ПИ. При метрологических исследованиях поверочных установок используют разнообразный метрологический арсенал: представление исследуемого МКСИ в виде математической модели, теоретическое исследование математической модели, уточнение формулы измерения, а также экспериментальное исследование исследуемого МКСИ. Кроме того, при исследованиях МКСИ необходимо оценивать влияние изменения внешних условий на метрологические характеристики [97].

Известно несколько типов компараторов [100], отличающихся между собой по физическому принципу измерения: механические, оптико-механические и интерференционные.

Общими требованиями, которые предъявляются к компараторам для исследований угловых и линейных средств измерений, являются: создание эталонных

углов и линий, изменяющихся в широких пределах, обеспечение их постоянства в течение времени исследований, а также обеспечение минимальных значений исследуемых параметров, задаваемых в зависимости от ПИ проверяемого МКСИ.

В настоящее время исследованиям координатных МКСИ уделяется недостаточное внимание, необходимы исследования четкого взаимодействия различных измерительных систем МКСИ, при этом методы и средства, описанные, например, в международном стандарте DIN 18723 являются сложными [58].

Особую сложность при исследованиях представляют измерительные системы с цифровыми нивелирами (ИСЦН), в которых информация о превышениях или вертикальных размерах считывается с большого участка штрих-кодовой рейки (более 300 мм), а результат измерений вычисляется при анализе автокорреляционной функции кода, записанного в памяти ИСЦН, и кода, расположенного непосредственно на рейке. Здесь результат измерений зависит от пространственного расположения рейки, от качества нанесения кода на инварную полосу рейки и наличия на ее поверхности царапин, трещин и т.д. Существующие в настоящее время методики исследований штриховых мер длины (реек), предполагающие определение при поверке среднего значения одного метра, в данном случае не могут быть использованы. Как известно [123], наибольшая точность достигается при калибровке средств измерений.

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 долж-

ного 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-кодовых 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 метрологи-

ческого 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 проведенный 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.

1.2 Известные методы и средства метрологического обеспечения трехкоординатных оптико-электронных МКСИ для измерения 3D-координат и длины в пространстве

1.2.1 Анализ современных мобильных трехкоординатных средств измерений

Современные мобильные трехкоординатные средства, как правило иностранного производства, имеют сложные функциональные схемы, в отличие от механических и оптических средств измерений, более подвержены влиянию на точность измерений внешних условий (температуры, влажности и давления),

ста- рению элементной базы (например, появление межмонтажной емкости приводит к циклическим погрешностям при измерении расстояний и углов, в некоторых случаях превосходящим основную погрешность измерений).

Известные трехкоординатные МКСИ (лазерные трекеры и электронные тахеометры) имеют в своей структуре угловые (вертикальные и горизонтальные) и дальномерные (интерференционные и светодальномерные) измерительные системы. Первичной информацией при этом являются сферические координаты (два угла (вертикальный γ и горизонтальный β) и длина линейного радиуса-вектора L), которые затем в компьютерном блоке преобразуются по известным из математики формулам в прямоугольные координаты XYZ. На результаты измерений расстояний, как в интерференционном, так и светодальномерном режимах, особое влияние оказывает рефракция, связанная с изменением длины волны распространения излучения в реальной среде. На результаты измерений углов растровыми измерительными системами сказываются ПИ при интерполяции

сигнала внутри периода раstra, ПИ при квантовании сигнала по уровню, ПИ при дискретизации сигнала по времени и другие источники (смещение лазерного луча относительно начала отсчета, эксцентриситеты горизонтальных и вертикальных угловых измерительных преобразователей перемещений, погрешности отражателей и др.). В настоящее время существует три основных производителя лазерных трекеров: Leica Geosystems, Faro Inc. и API. Каждый из них использует свою конструкцию и функциональные характеристики.

Проведенный в данной работе анализ источников ПИ показывает, что из-за большого количества составляющих (более 100) практически невозможно составить математическую модель и спрогнозировать в дальнейшем характер проявления большинства из них. Поэтому одними из основных методов выявления ПИ при таких точностях являются экспериментальные методы выявления ПИ при метрологическом обеспечении указанных выше средств измерений.

1.2.2 Метрологическое обеспечение дальномерных измерительных систем

Современное машиностроение характеризуется повышенной производительностью используемого оборудования за счет цифровых систем управления и контроля технологических процессов при одновременном повышении качества обрабатываемых деталей [77], при этом значительное место (до 90%) занимают измерения линейных размеров и перемещений [96].

В настоящее время расстояния L более 1 метра в машиностроении в основном измеряют с помощью светодальномеров (светодальномерных блоков, заложенных в конструкцию электронных тахеометров и других координатных МКСИ), лазерных интерферометров, сканеров и трекеров. ПИ МКСИ можно выявить разными методами [100,114]: измерением контрольных базисов, поэлементно, измерением отрезков во всевозможных комбинациях, на компараторах и на имитаторе дальности.

Принцип действия светодальномерных измерительных систем основан на использовании электромагнитных колебаний оптического диапазона [83,93,102]. Известны два типа светодальномерных измерительных систем (ИС): фазовые и импульсные. И те, и другие измеряют время прохождения светового импульса до отражателя и обратно [67]. Отсюда видно, что значительное влияние на ПИ оказывает среда распространения излучения (ПИ при измерении скорости света в вакууме, ПИ показателя преломления в среде распространения импульса). Поэтому необходимо устройство, имитирующее большие расстояния (более 10-ти метров) в лабораторных условиях.

Приборная (инструментальная) ПИ дальномерного блока современных оптико-электронных МКСИ в основном определяется флуктуациями индикатрисы источника излучения и старением элементов электронной схемы, приводящим к снижению отношения сигнал/шум и, как следствие, увеличению высокочастотной детерминированной ПИ. Кроме того, в фазовом светодальномере ПИ зависит от ПИ частоты и разности фаз, в импульсном

светодальномере ПИ зависит от формы и длительности импульса, а также от ПИ времени распространения импульса. Развитие импульсных светодальномеров, которые обеспечивают максимальную дальность, ограничивается в настоящее время быстродействием микросхем (для получения требуемой точности измерений необходимы микросхемы с быстродействием в несколько пикосекунд). Известны зарубежные импульсные светодальномеры, однако в них точность измерений достигается в основном за счет обработки многократных измерений.

В настоящее время ПИ известных оптико-электронных дальномерных блоков, например, в электронных тахеометрах, в нормальных условиях эксплуатации находится в пределах $0,5 \div 5$ мм [66], ПИ расстояний лазерными интерферометрами и трекерами нормируется в пределах $0,5 \div 10$ мкм/м.

В общем случае для ПИ однократного измерения фазовыми методами справедливо соотношение [100, 102]:

$$\sqrt{\Delta_F^2 + \Delta_0^2 + \Delta_n^2 + \Delta_K^2 + \Delta_r^2 + \Delta_\psi^2}$$

Здесь:

$$\Delta_0 = \frac{v \sigma_\varphi}{4\pi F} \quad - \text{погрешность считывания информации,}$$

$$\Delta_F = \frac{\Delta F}{F} D \quad - \text{ПИ при отклонении масштабной частоты генератора,}$$

O_φ - ПИ разности фаз,

$$\Delta_n = \frac{\Delta n}{n} D \quad - \text{ПИ из-за неточного знания интегрального показателя}$$

преломления атмосферы n вдоль линии измерения,

Δ_K - ПИ нестабильности приборной поправки,

Δ_r - ПИ центрирования светодальномера и отражателя,

Δ_{ν} - высокочастотная (циклическая) ПИ светодальномера.

Некоторые из составляющих суммарной ПИ не зависят от измеряемой дальности, некоторые пропорциональны длине линии, по характеру действия они имеют как систематическое влияние (Δ_K и Δ_F), так и случайное влияние (Δ_n);

знание закономерности высокочастотной детерминированной ПИ может значительно повысить точность измерений.

Для обеспечения единства измерений в качестве эталонных мер на компараторах используются меры длины первого или второго разрядов. При этом основным источником ПИ меры может быть изменение ее длины под влиянием изменения температуры в рабочем пространстве. В процессе измерения, для исключения данной ПИ, измерения выполняют, как правило, по симметричной программе: эталонная мера – поверяемая мера – эталонная мера.

Особое внимание при исследованиях следует обратить на соблюдение принципа Аббе (оси исследуемого МКСИ и эталонного СИ должны лежать на одной линии).

Известны примеры компараторов для проверки МКСИ, измеряющих размеры и расстояния, разработанных во ВНИИМ, МИИГАиК и ЦНИИГАиК, в которых в качестве эталонной меры используются штриховые меры длины [16,21,62,102]. Известна схема компаратора, разработанного во ВНИИФТРИ, с использованием фемтосекундного лазера [62,103].

Оптико-механический компаратор МИИГАиК (ОМК), построенный в 1926 г. под руководством проф. Ф.Н. Красовского, изначально был предназначен для поверки линейных средств измерения, в частности, 24-х метровых инварных проволок и штриховых реек. Общий вид ОМК показан на рисунке 1.4. В нем на изолированных фундаментах располагается рельсовое полотно, по которому перемещается каретка с эталонным жезлом 1-го разряда, длина жезла равна 1-му,

или 3-м метрам. На отдельных фундаментах закреплены микроскопы с винтовыми микроскоп-микрометрами, имеющими в поле зрения шкалу из ста делений, цена одного деления равна 1 мкм. Перед исследованиями МКСИ по инварному жезлу устанавливается расстояние между микроскопами, затем проверяется используемое средство измерения. ПИ эталонирования 24-х метровых проволок на компараторе МИИГАиК с учетом ПИ эталонного жезла составляет $10 \div 20$ мкм.

Компаратор МИИГАиК использовался ранее только для поверки инварных 24-х метровых проволок. Эталонирование инварных проволок может быть выполнено также и в других метрологических лабораториях (например, во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева (г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербургском политехническом университете, ЭОМЗ (г. Москва)) [98].

Исследования показали, что при доработке оптико-механического компаратора ПКИ линейных размеров на нем с помощью инварного жезла 1-го разряда могут быть выполнены с ПИ не более ± 7 мкм. Однако в таком виде данный компаратор не может быть использован для исследований, испытаний, калибровки и поверки координатных оптико-электронных средств измерений из-за малого количества контрольных точек (8 отсчетов), невозможности выявления высокочастотной детерминированной ПИ дальномерных блоков, при поверке МКСИ по трем координатам требовалась его перестановка, практически отсутствовала возможность поверки вертикальной координаты Z, не было возможности проверки МКСИ в рабочих интервалах горизонтальных углов, при этом максимальная длина измеряемого интервала составляла 24 метра, не учитывалось влияние рефракции. Полностью отсутствовала возможность калибровки измерительных систем «цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки».

В РОСТЕСТ (г. Москва) имеется линейный компаратор, представляющий из себя швеллер длиной 50 метров. В нем на длине 2 метра установлены с интервалом 200 мм подставки от теодолита, в которые устанавливается ось отражателя или



Рисунок 1.4 - Общий вид ОМК МИИГАиК

исследуемого МКСИ. Кроме того, подставки установлены на длине 25 и 50 метров. Расстояния между подставками выявлены путем многократных измерений. Данный интервал выявления ВДП может быть использован для приборов типа СП2 и не может быть в принципе применен, например, для лазерных трекеров и интерферометров, работающих в интерференционном режиме [8,109,46].

Рассмотренные выше компараторы не позволяют в полной мере выявить ВДК ПИ дальномерных блоков современных координатных МКСИ, работающих на высоких масштабных частотах порядка $15 \text{ мГц} \div 100 \text{ мГц}$ (с длиной волны $2 \div 10 \text{ м}$).

Длины линий более 50 метров в настоящее время проверяются на полевых базисах, где значительный вклад в ПИ поверки вносят изменения внешних условий. Косвенно ориентировочную дальность действия дальномера можно выявить использованием светофильтра с известным коэффициентом ослабления.

Рабочие эталоны с диапазоном пространственных 3D-координатных измерений до 50 метров и более и имитацией внешних условий в настоящее время практически отсутствуют.

В результате анализа выявлено, что современные МКСИ могут обеспечить измерения линейных размеров и перемещений с ПИ от нескольких микрометров до единиц миллиметров. Исходя из этого, эталонный пространственный компаратор для измерения расстояний должен быть универсальным, адаптированным к широкой гамме современных координатных средств измерений, по точности измерений линейных размеров в 2-3 раза выше, чем исследуемые МКСИ.

1.2.3 Метрологическое обеспечение горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем

Все угловые измерительные системы (ИС) условно делятся на два класса: ИС для измерения малых углов (не превышающих несколько градусов) и ИС для измерения углов в пределах $0 \div 360^\circ$. ИС первого класса наиболее изучены [11]. В машиностроении, в т.ч. крупногабаритном, и геодезии наиболее распространены МКСИ, которые измеряют произвольные углы, как малые, так и большие. Кроме того, эти МКСИ работают, как правило, в цеховых и полевых условиях, где должны сохраняться их заданные Техническими условиями точностные (например, прослеживаемость) и другие (например, надежность) технические характеристики. Отсюда видно, что при исследованиях МКСИ совершенно недостаточно только их лабораторной проверки в нормальных условиях измерений. Поэтому помещение для выполнения работ, связанных с исследованиями МКСИ, в условиях, предусмотренных Техническими условиями, должно быть оборудовано системой термостатики на разные температуры.

ПИ угла получают следующими методами [8,89,158,162]: многократными измерениями одного и того же угла, сравнением с эталонными углами, по

отклонениям в условных уравнениях, в результате измерения углов в разных комбинациях или расчетным путем по отдельным составляющим приборной погрешности измерений.

Для исследований указанных выше МКСИ могут быть использованы разработанные в ЦНИИГАиК коллиматорные компараторы УК-1, ПК-1 или лабораторный комплекс ЭЛИТА, а также КС-1 (“ФГУП ”ПО УОМЗ”). В институте Укрметртестстандарт (г. Киев) разработана автоколлимационная установка для проверки нивелиров и теодолитов АУПНТ. Перечисленные эталонные СИ не дают полной информации о ПИ исследуемого МКСИ, так как имеют ограниченное количество проверяемых точек в пределах диапазона измерений горизонтальных углов до $(0\div 360)^\circ$, вертикальных углов – до $\pm 45^\circ$. Выявление источников ПИ измерений и их учет в пределах измерения до 360° является наиболее сложным этапом исследования МКСИ [69,74,105, 90,73,88,100,101,158,162].

В геодезии разработаны методы так называемой технологической проверки угломерных МКСИ в полевых условиях (например, по известным углам в триангуляционных методах). Однако данные эксперименты, как правило, многофакторные и не позволяют выявить влияние отдельных ПИ на суммарную ПИ.

Анализ показывает, что при разработке угломерных компараторов наиболее часто используются в машиностроении, приборостроении, геодезии, метрологии и др. областях измерительной техники эталонные призмы с автоколлиматорами (АК). Главное достоинство автоколлиматоров заключается в повышении их чувствительности вдвое в сравнении с коллиматорными угломерными системами. В них угловое рассогласование β между оптической осью автоколлиматора и осью отраженного плоской гранью призмы параллельного пучка лучей соответствует удвоенному значению угла поворота α этого зеркала, установленного на контролируемом объекте.

Автоколлиматоры делятся на три класса: однокоординатные (измеряют угловые повороты в одной плоскости); двух координатные (измеряют угловые по-

вороты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях); трех координатные (измеряют дополнительно угол скручивания). В зависимости от типа используемого приемника излучения и анализатора изображения автоколлиматоры делятся на визуальные и фотоэлектрические. В аналоговых фотоэлектрических автоколлиматорах имеются, как правило, оптические или оптико-механические компенсаторы, служащие для компенсации смещений изображения вручную или автоматически. При этом отсчет угла производится либо с отградуированной в угловой мере шкалы компенсатора, либо со шкалы системы регистрации. Автоколлиматоры с ручной компенсацией снабжены нуль-индикатором с визуальным отсчетом нулевого сигнала. В цифровых фотоэлектрических автоколлиматорах угол поворота α контрольного элемента (зеркала, призмы и др.) определяется, например, путем счета числа стандартных импульсов, заполняющих интервал времени между опорным и рабочим импульсами, формируемыми при попадании на анализатор изображения светового сигнала, отраженного контрольным элементом при сканировании изображения целевой диафрагмой. Основное преимущество цифровых фотоэлектрических автоколлиматоров, по сравнению с аналоговыми, состоит в простоте их согласования с ЭВМ, при подключении к АК современных WEB-камер возможен автоматический ввод постоянных поправок (например, при ориентировании поворотного стола стенда). С помощью АК ПИ угла не превышает 0,3”.

С использованием автоколлиматора фирмы ”Leica” разработан автоматизированный комплекс ТРМ [91,92]. В качестве эталонных средств измерения горизонтальных и вертикальных углов здесь использованы системы отсчитывания теодолита WILD Theomat T2002. При использовании автоколлиматоров с призмами-многогранниками наиболее часто используют два метода [74]: метод сличения (здесь эталонный многогранник применяется в качестве угловой меры с известными значениями углов между гранями – используется, когда ПИ углов призмы много меньше ПИ испытуемой ИС) и метод калибровки (здесь угол призмы измеряется по специальной программе, его

значение может быть не известно – используется, когда ПИ углов призмы сопоставимы с ПИ исследуемой ИС).

Основные источники методической ПИ возникают при перестановках МКСИ на разные компараторы. При исследованиях современных прецизионных МКСИ требуется эталонное средство измерений, которое обеспечивает измерение углов с погрешностью не более 1-ой угл. сек. в пределах измерения горизонтального угла $0^\circ \div 360^\circ$ и вертикального угла $\pm 50^\circ$ и более.

В результате анализа *установлено*, что повышение точности при исследованиях, калибровке и поверке МКСИ возможно за счет обеспечения единой метрологической базы (одной установки МКСИ). При этом исключаются такие источники ПИ, как ПИ за эксцентриситет, ПИ горизонтирующего уровня, что, как показывает анализ, повысит точность измерений в 2÷3 раза. Кроме того, измерения должны быть выполнены в единой эталонной системе координат.

1.2.4 Существующее метрологическое (нормативное, методическое и техническое) обеспечение мобильных широкодиапазонных трехкоординатных средств измерения

Исследования мобильных координатных МКСИ, измеряющих пространственные координаты, представляют особую сложность, достаточно сказать, что при исследованиях, например, стационарных координатно-измерительных машин портального типа необходимо проверить 21 метрологический параметр [51]. При этом допустимая ПИ координат, например, современными лазерными трекерами нормируется в пределах $10 \div 20$ мкм.

В отечественной практике эталонные средства измерений для 3D МКСИ в широком диапазоне измерения длин практически отсутствуют, а зарубежные фирмы-изготовители крупногабаритных КИМ и лазерных трекеров (Leica и др.) не представляют подробной информации о внутрифирменных методиках и способах оценки точности данных МКСИ, которые являются ноу-хау фирмы.

Однако, в международной практике, известны методики исследований

МКСИ, приведенные ниже.

Для метрологического обеспечения координатных МКСИ в 1978 г. создана международная организация СММА (Coordinate Measuring Machine Manufacturer Association), в организации ISO и национальных метрологических организациях созданы технические комитеты для решения задач метрологического обеспечения координатных измерений. Однако до конца проблема трехмерной метрологии не решена до сих пор и на международном уровне.

В настоящее время известен ряд нормативных документов по оценке точности координатных средств измерений, основанных на методах с вращающимся жезлом, на двух противоположных поверхностях и с использованием концевых мер длины и других артефактов: 1) Методика СММА, 2) Стандарт BS6808, 3) Методика ASME B89, 4) Стандарт VDI/VDE 2617, 5). Методика CNOMO, 6) Стандарт ISO 10360, 7) Методика МИ 2569-99.

Методика СММА. В данной методике предлагаются два вида измерений:

- 1) независимые измерительные процедуры (отклонения от прямолинейности осей КИМ, отклонения от перпендикулярности осей и точность позиционирования),
- 2) измерения эталона длины для определения общей измерительной точности (точность измерения длины вдоль осей, точность измерения длины в пространстве и повторяемость измерений длины). В данной методике при испытаниях оговорены условия измерений (температура $20^{\circ}\pm 2^{\circ}$, температурный пространственный градиент 1° , относительная влажность $60\pm 5\%$, ПИ определяется как разность между результатом измерения с КИМ и используемым эталоном длины, произвольно расположенным в пространстве КИМ. При этом измеряется набор из трех эталонов (как правило, концевых мер длины), диапазон измерения по наибольшей оси до 1000 мм, длины эталонов соответствуют $1/3$, $1/2$, и $3/4$ диапазона измерений. Значение повторяемости измерений длины определяется по разности между наибольшим и наименьшим

значениями из разброса по 36 измерениям, при этом при доверительной вероятности 95% допускается одно измерение, превышающее заданный предел повторяемости. Несмотря на то, что измерения выполняются в определенных позициях, выявленная ПИ распространяется на весь рабочий диапазон измерений.

Стандарт BS6808. Данный стандарт разработан Британским институтом стандартов (British Standards Institution) по поручению Комитета по стандартам Великобритании (General Mechanical Engineering Standards Committee) для производителей и конечных пользователей КИМ. В соответствии с данным стандартом при исследованиях МКСИ необходимо выполнить следующие тесты:

- определение повторяемости в одном направлении, получение одних и тех же результатов в нормальных условиях,
- выявление температурной ПИ,
- определение ПИ длины, при этом выбирается 8 прямых отрезков, выбираемых случайным образом, вдоль которых располагается эталон, производится по 50 измерений, при этом допускается превышение не более двух значений над заданным допуском.

Здесь также в качестве эталонов используются концевые меры длины (КМД) и ступенчатые меры длины (СМД), при этом определении ПИ длины стандарт рекомендует располагать измерительные прямые вблизи основных диагоналей КИМ, на каждой измерительной прямой проводится не менее 50 измерений длины эталона, допускается превышение двух значений из 50-ти над заданным допуском.

Методика ASME B89. Данная методика предлагается Американским Сообществом Инженеров (American Society of Mechanical Engineers), она нашла наибольшее распространение. В ней при определении точности линейного перемещения предполагается использование эталонов типа КМД, ступенчатой меры длины и лазерного измерителя перемещений (лазерного интерферометра), а также

использование некалиброванных артефактов, представляющих собой два шара с малыми отклонениями от сферичности, жестко соединенных между собой металлическим стержнем. Для измерения в кубическом объеме предусмотрена установка мер в 20-ти позициях (как минимум вдоль 10-ти диагоналей измерительного объема (шести диагоналей граней и четырех основных диагоналей). Стандарт допускает использование для испытаний стенда с вращающимся жезлом, на концах которого расположены отражатели.

В соответствии с данным стандартом при исследованиях МКСИ необходимо выполнить следующие тесты:

- влияние отклонений температуры на ПИ,
 - влияние вибраций, выявление максимальной амплитуды и частоты вибраций,
 - повторяемость измерений, производят не менее 10-ти измерений в середине рабочего диапазона,
 - точность линейного перемещения, при этом для каждой оси должно быть выполнено по три набора измерений,
- точность объемных измерений, при этом используемый артефакт устанавливается вдоль шести диагоналей, требующих одновременного перемещения вдоль двух осей КИМ, и четырех основных диагоналей, что требует одновременного движения по трем осям КИМ.

Стандарт VDI/VDE 2617. Данный Стандарт разработан немецкой ассоциацией инженеров (Ferein Deutscher Ingenieure). В отличие от предыдущих методик здесь предусмотрены более строгие требования к отклонениям температурных условий, например, допустимый пространственный градиент температуры $0,3^{\circ}\text{C}/\text{метр}$, а относительная влажность регламентируется $45\% \pm 10\%$. В качестве эталонов используются КМД, СМД и ЛИ, эталонные цилиндры и кольца, а также эталоны угла, при этом ПИ соответствующей меры должна быть не более $1/5$ от ПИ КИМ. Методика предполагает два способа проверки точности: 1) определение ПИ отдельных отклонений (позиционирования, отклонения от прямолинейности, отклонения поворота и т.д.), 2) описание ПИ в общем, например, при помощи тестовых образцов, размеры которых априори известны.

Методика CNOMO. Методика разработана содружеством французских производителей в машиностроении (PSA Peugeot-Citroen и Renault S.A.) для нормирования точности КИМ. Данная методика предполагает использование КМД или эталонной сферы диаметром от 10 мм до 50 мм с отклонением от сферичности не более четверти допуска, заявленного производителем, при этом производится измерение 25 точек, распределенных случайным образом по поверхности сферы. Измерения проводятся на максимальной скорости, при максимальном усилии прижатия наконечника к сфере и на минимальной скорости при минимальном усилии прижатия измерительного наконечника (щупа).

Стандарт ISO10360. Здесь выполняются измерения пяти калиброванных длин, расположенных в семи разных позициях в измерительном объеме КИМ, при этом каждое измерение повторяется три раза, а общее количество измерений составляет 105 измерений. В качестве эталонов используются КМД и СМД. Наибольшая используемая мера должна быть не менее 66% от длины наибольшей диагонали, наименьшая – не менее 30 мм.

Методика МИ 2569-99. Методика разработана ВНИИМС в 1999 г., распространяется на КИМ портального типа. В качестве эталонов используются КМД,

Методика МИ 2569-99. Методика разработана ВНИИМС в 1999 г., распространяется на КИМ портального типа. В качестве эталонов используются КМД, при этом для линий, параллельных оси X, рекомендуются следующие положения КМД: в центре рабочей зоны, на краю рабочей зоны на минимально возможной высоте от плоскости стола, на краю рабочей зоны на максимально возможной высоте от плоскости стола; для линий, параллельных оси Y, рекомендуются следующие положения КМД: в центре рабочей зоны в максимально возможном верхнем положении и в центре рабочей зоны в максимально возможном нижнем положении. Кроме того, измерения выполняются вдоль пространственной диагонали в одном положении в центре рабочей зоны. По результатам измерений вычисляются ПИ.

В настоящее время для крупногабаритных КИМ известны методики

поверки их с использованием разъемной эталонной меры длиной до 5-ти метров, располагающейся в разных положениях пространства измерений КИМ, а также лазерного трекера [101]. Однако здесь отсутствует необходимый запас по точности эталонного средства измерений, сам лазерный трекер является мобильной КИМ и требует соответствующей поверки и калибровки.

В работе [113] описывается система метрологического обеспечения для МКСИ и электронных тахеометров, используемых при координатных измерениях в судостроении, приведена локальная поверочная схема. Однако привязка к эталонам высшего порядка точности осуществляется за счет косвенных измерений, поэтому точность здесь ограничивается ПИ порядка одного миллиметра и более. Кроме того, здесь отсутствует возможность выявления ВДПИ.

Известен метод исследований лазерного трекера с использованием поворотного стола. При этом ЛТ закрепляется на поворотном столе так, что его траектория описывает окружность, смещение по окружности вычисляется из системы уравнений: $\Delta X = d \cos \beta \cos \gamma \Delta \beta - d \sin \beta \sin \gamma \Delta \gamma$,

$$\Delta Y = d \cos \beta \sin \gamma \Delta \beta + d \sin \beta \cos \gamma \Delta \gamma, \Delta Z = -d \sin \beta \Delta \beta,$$

где d – радиус окружности,

Зная радиус стандартной окружности, можно определить ПИ в каждой плоскости.

Все рассмотренные выше нормативные документы предполагают ограниченное количество измерений, трудоемки в реализации, в большинстве из них практически невозможно повторить результаты измерений вследствие сложности

установки КМД в то же самое положение, кроме того, не выявляются высокочастотные (короткопериодические) ПИ.

Некоторые конструктивные варианты решения, разработанные известной фирмой «КОВА» (Германия), показаны ниже на рисунке 1.5 [119].

ПИ исследований приведенных эталонов по данным [119] колеблется в пределах от $(0,12 + 0,6 \cdot 10^{-6} L)$ мкм до $(1,5 + 1,5 \cdot 10^{-6} L)$ мкм.

Известен метод исследований лазерных трекеров с использованием КИМ, разработанный фирмой «РТВ», схема метода приведена на рисунке 1.6, известен компаратор, разработанный национальным институтом стандартов и технологий (NIST (Великобритания)), показанный на рисунке 1.7. На рисунке 1.8 приведена схема измерений, используемая фирмой «Нева Технолоджи» (г. Санкт-Петербург).

Рассмотренные выше методики и средства поверки и калибровки имеют ряд недостатков: отсутствие возможности проверки мобильного координатно-измерительного средства в требуемом диапазоне измерений (до 360° по горизонтали и $\pm 45^\circ$ по вертикали), ограниченную дальность измерений, необходима перестановка эталонных средств измерений, что приводит к невозможности повторения измерений с течением времени, использование тетраэдрических отражателей при вращении жезлов известной длины позволяет обеспечить максимальный угол отклонения осей отражателя и ПКИ МКСИ не более $20^\circ \div 35^\circ$ [116].

Известна методика измерений, реализованная на фирме «РТВ» (Германия), согласно которой в качестве эталонов использованы три крестообразных композитных жезла, расположенные на жестком основании.

Проведенный анализ известных методов и средств метрологического обеспечения измерений для координатных МКСИ позволяет сделать следующие **выводы**:

1. В структуре ПИ оптико-электронных координатных МКСИ проявляются



а)



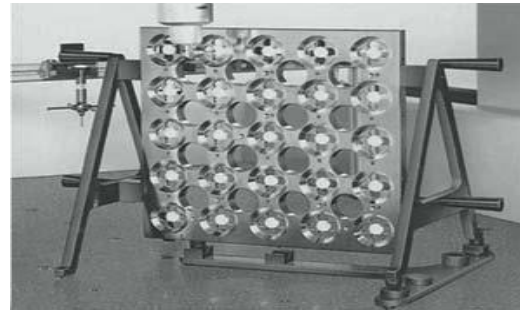
в)



с)



д)



е)

Рисунок 1.5 - Эталоны фирмы «КОВА»

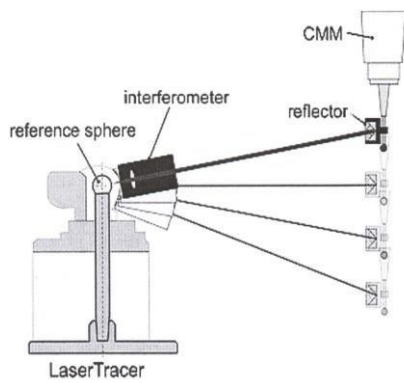


Рисунок 1.6

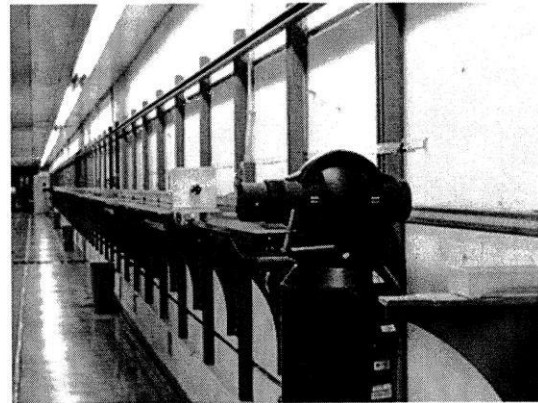


Рисунок 1.7

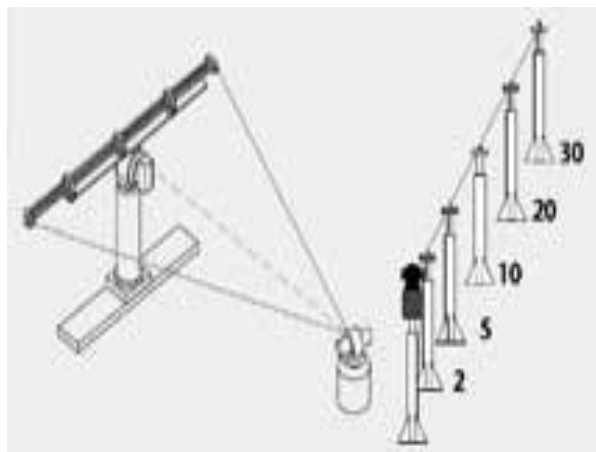


Рисунок 1.8

изменяющиеся со временем внутришаговые детерминированные высокочастотные (короткопериодические (циклические)) ПИ, связанные с

интерполяцией, квантованием и дискретизацией сигналов во времени, изменением межмонтажных емкостей в электрических цепях и т.д., на которые в известных методах испытаний не уделяется должного внимания. Анализ показывает, что влияние некоторых из них может значительно превышать заявленный производителем допуск,

2. Известные иностранные и отечественные методики поверки, калибровки и испытаний МКСИ не предполагают выявления ПИ в любой точке линейных и угловых координат в заявленных диапазонах измерений,
3. Известные однокоординатные методы и эталоны требуют многократной перестановки испытуемого МКСИ или используемого эталона, что существенно снижает точность измерений за счет отсутствия привязки к единой системе координат, увеличения времени измерений и обеспечения постоянных внешних условий,
4. При исследованиях пространственных координат используется двухточечная схема измерений, что усложняет процедуру привязки смежных диапазонов координат и, соответственно, увеличивает методическую ПИ,
5. При исследованиях измерительных систем с цифровыми нивелирами на известных иностранных и отечественных компараторах перемещается рейка, закрепленная за ее корпус, что не соответствует методике измерений в реальных полевых условиях.

Проведенные обзор и анализ координатных средств измерений в широком диапазоне измерений координат, а также их метрологического обеспечения, показывает, что в настоящее время в отечественной практике отсутствует единая универсальная и научно-обоснованная методика обеспечения дорогостоящих широкодиапазонных 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 части их калибровки и испытаний.

Диссертационная работа направлена на устранение указанных выше недо-

статков, разработку научно-технической базы для исследований МКСИ, в измерительных системах которых используются источники и приемники оптического диапазона длин волн.

1.3 Известные методы и средства метрологического обеспечения современных оптико-электронных измерительных систем для измерения превышений и высотных размеров

На рубеже двадцать первого столетия появились оптико-электронные МКСИ для измерения координат в вертикальной плоскости (превышений) между

отдельными точками – измерительные системы с цифровыми нивелирами и штрих-кодowymi рейками (ИСЦН).

В настоящее время известна широкая гамма этих СИ, ПИ колеблется в пределах $(0,3 \div 1)$ мм, изготовители заявляют об их пригодности для выполнения высокоточных классов нивелирования (1 и 2 классы) и измерения высотных размеров (координата Z). На российском рынке присутствуют средства измерений таких фирм, как Trimble, Leica, Topcon, Sokkia и другие.

В настоящее время цифровые нивелиры в машиностроении широко используются для выверки направляющих прямолинейного перемещения, измерения перемещений отдельных узлов устройств в вертикальном направлении, в геодезии - для измерения изменений положения мостов, труб газопроводов в динамике, высоты уступов и т.д. ПИ современных рабочих ИСЦН может быть уменьшена раза в три по сравнению с заявленной точностью измерений до величин $(10 \div 50)$ мкм за счет калибровки измерительной системы в целом и введения поправок в результаты производственных измерений. Результаты калибровки в виде поправок при соответствующем отсчете по рейке могут быть использованы для уравнивания нивелирных ходов, тем самым уменьшается ПИ измерения в ходе.

Известен метод выявления приборной ПИ нивелиров на полевом нивелирном базисе, закрепленном пунктами, стабильное положение которых сохраняется в процессе измерений [89,90]. Недостатком метода является ограниченное количество калибруемых превышений, кроме того, здесь не исключаются ПИ, связанные с нивелирными рейками и влиянием внешних условий. В метрологии, машиностроении и геодезии известны методы выявления приборной ПИ, связанные с многократными измерениями превышений в нивелирных ходах, косвенные методы из измерений на станции, расчетные методы и т.д. Однако все они трудоемки и не позволяют в полной мере выявить приборную ПИ ИСЦН.

В ЦНИИГАиК разработано автоматическое рабочее место для поверки оптических нивелиров типа Н-3 или Н-05, состоящее из шести пунктов, расположенных в створе на расстояниях $15 \div 25$ метров (в зависимости от точности исследуемого нивелира).

При исследованиях ИСЦН необходимо отделить ПИ самого нивелира и ПИ штрих-кодовой рейки. При исследовании штрих-кодowych реек известны два метода [72,108]: 1) проверка положения отдельных штрихов реек, 2) исследование ПИ измерительной системы “нивелир - рейка”.

Известно [9], что метод проверки отдельных штрихов кодовой рейки наблюдением штриха в поле зрения микроскопа имеет большую ПИ из-за неровных краев рейки. При измерениях цифровыми нивелирами отклонения отдельных краев рейки. При измерениях цифровыми нивелирами отклонения отдельных штрихов рейки от теоретического значения оказывают незначительное влияние на точность измерений, так как съем информации происходит с большого участка кодовой рейки (не менее 300 мм). Кроме того, разработчики используют каждый свой код и, как правило, не представляют о нем информацию при покупке средства измерений.

Проверка по отдельности цифрового нивелира и штрих-кодовой рейки не обеспечивает сходимость результатов для измерительной системы в целом. Поэтому наибольший интерес представляет исследование ПИ измерительной

системы в целом. В литературе описываются случаи калибровки ИСЦН, когда ПИ достигает значений порядка $\pm 0,35$ мм [144].

Известны методы исследования на компараторах с использованием лазерных интерферометров [62,72,13,103,107,101]. На рисунках 1.9 и 1.10 показаны схемы с лазерным интерферометром, используемые в Стенфордском университете (США) [142] и университете технологий в геодезии (Австрия) [143].

При использовании интерферометров кодовая рейка может быть установлена вертикально, или горизонтально. При горизонтальном расположении рейки световой поток от нивелира направляется на нее через плоское зеркало, расположенное под углом 45° . ПИ при исследованиях составляет порядка $\pm 0,04$ мм. Однако известные методы не позволяют определить расстояние до пятки реек. За рубежом используются компараторы для калибровки штрих-кодовых реек [62], представляющие собой герметичную камеру, однако, здесь съем информации выполняется с ограниченного участка рейки, считывание информации производится с малого расстояния до рейки и не позволяет судить о ПИ измерительной системой в целом и на рабочих расстояниях. В Финляндии в институте геодезии и геодинамики при калибровке измерительных систем с цифровыми нивелирами в качестве эталона используют аттестованный цифровой нивелир [142], принципиальная схема компаратора приведена на рисунке 1.11.

Кроме того, все известные отечественные и зарубежные схемы исследований предполагают перемещение рейки, что приводит к смене метрологической базы (положения рейки), длина компаратора увеличивается в два раза, вследствие чего рейка находится в разных температурных условиях, а также на ограниченной до 10 метров длине плеча от рейки до нивелира (при данных увеличениях зрительной трубы, а также исходя из рабочего расстояния порядка $25 \div 30$ метров при выполнении производственных измерений и зависимости ПИ от этого расстояния, расстояний до 10 метров явно недостаточно.

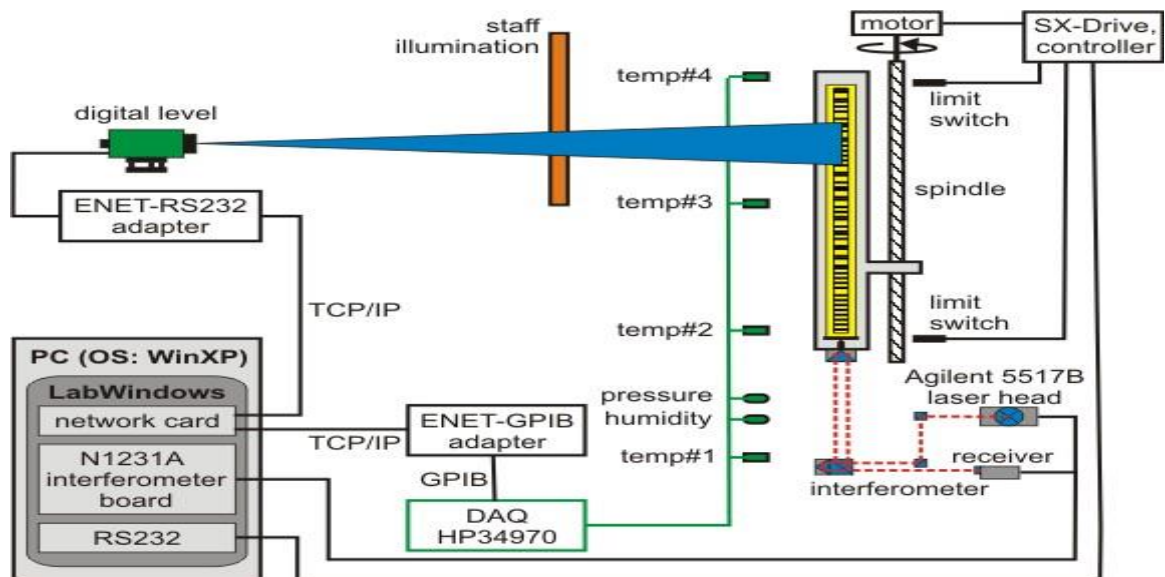


Рисунок 1.9 - Схема с лазерным интерферометром

Исследования, проведенные автором диссертации, показывают, что, судя по сертификатам зарубежных фирм, максимальная ПИ, выявленная ими при калибровке реек колеблется в основном около 5 мкм, в то время, как ПИ измерительной системы в целом при дискретности отсчитывания 0,01 мм ограничена, и составляет более 0,05 мм [23], в основном определяется собственно цифровым нивелиром, для системы в целом достигает порядка 0,3÷0,5 мм. Кроме того, известные средства измерений не позволяют выполнить исследования цифровых нивелиров на расстояниях до рейки, наиболее часто используемых в машиностроении и геодезии. Известные ГОСТы и методики поверки оптических нивелиров лишь в незначительной степени могут быть использованы при поверке указанных выше оптико-электронных МКСИ. Анализ литературных источников и результаты

предварительных экспериментальных исследований показали, что точность измерений при исследованиях ИСЦН в настоящее время недостаточна, кроме того, необходимы методы и средства измерений, позволяющие выполнять измерения на расстояниях, приближенных к рабочим условиям эксплуатации.

Целью данной работы является разработка методов исследований,

испытаний, калибровки и поверки измерительных систем с цифровыми

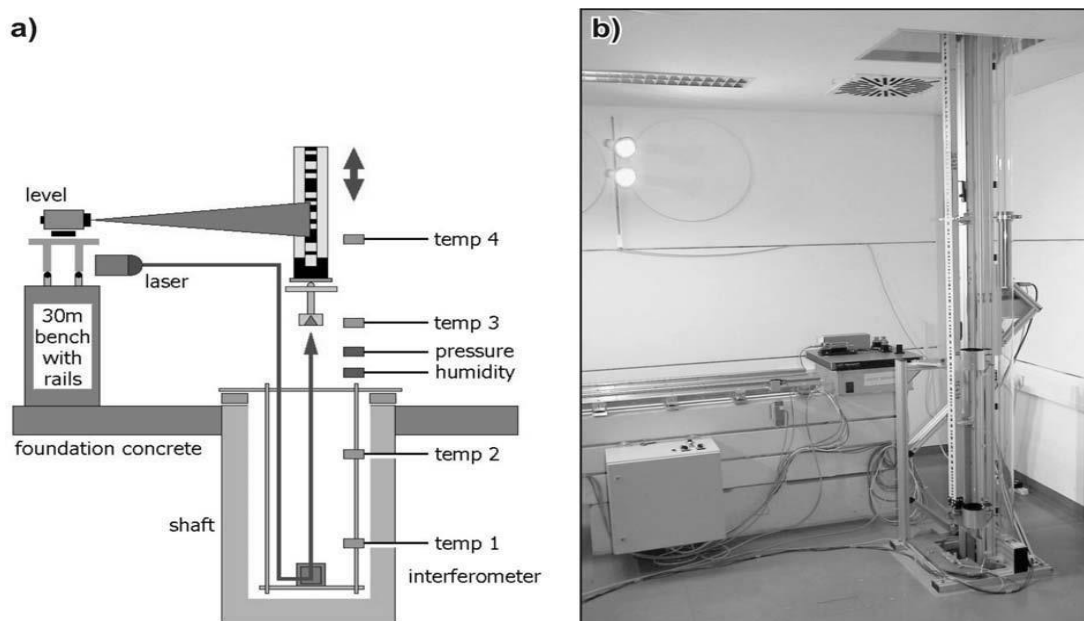


Рисунок 1.10 - Схема с лазерным интерферометром

нивелирами, повышающих точность измерений в рабочем диапазоне, свободных от указанных выше недостатков, а также разработка методики определения размеров от пятки реек до конкретного отсчета по штрих-кодовой шкале.

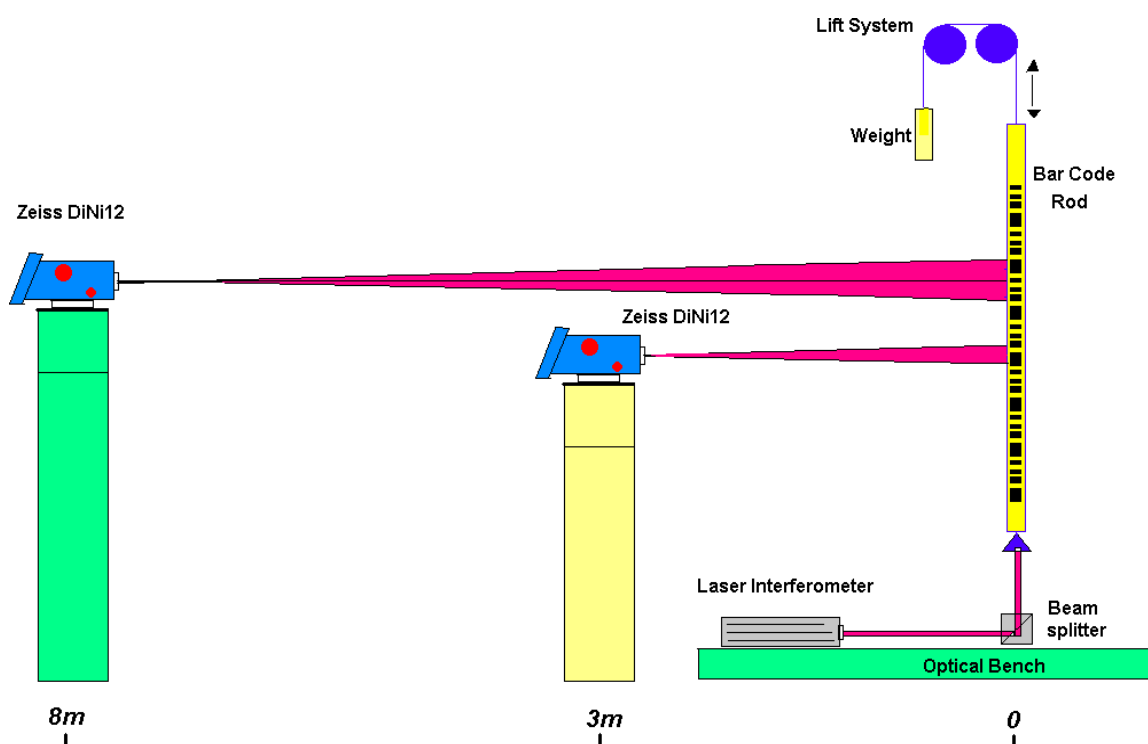


Рисунок 1.11 - Схема с эталонным нивелиром

1.4 Анализ структуры погрешности измерений на компараторах, поверочных установках и методов передачи размеров от эталонов

При анализе структуры ПИ МКСИ основное внимание необходимо уделить вопросам прослеживаемости результатов измерений от вышестоящих эталонов к рабочим МКСИ, как в части разрабатываемой документации (например, при создании поверочных схем), так и при создании соответствующего метода измерений (например, использование двухточечной схемы измерений). При этом рассматривают, как ПИ эталонных СИ и отклонения внешних условий, так и влияние методов передачи размеров при ориентировании МКСИ относительно эталонов.

Анализу ПИ современных широкодиапазонных МКСИ посвящено значительное количество литературы [11,93,100,72,86], поэтому в данной работе они подробно не рассматриваются. Примерная структура погрешности влияющих факторов при испытаниях, полученная по результатам проведенного обзора, и его анализа показана на рисунке 1.12.

Известные 3D координатные роботизированные электронные тахеометры, радары и лазерные трекеры способны выполнять измерения, как в статическом, так и в динамическом режиме, при этом ПИ измерений за счет использования лазерного интерферометра в дальномерном блоке достигается 10 мкм и менее.

Принцип измерения основан на измерении полярных координат: расстояний L и двух углов (горизонтального β и вертикального γ). Расчет прямоугольных координат XYZ выполняется с помощью компьютера по формулам:

$$X = L \sin \gamma \cos \beta, Y = L \sin \gamma \sin \beta, Z = L \cos \gamma, \quad (4)$$

где L – расстояние от МКСИ до отражателя.

Общую структуру ПИ условно можно разделить на ПИ ориентирования МКСИ относительно опорного направления (например, погрешность датчика угла наклона относительно отвесной линии и канала преобразования его сигнала при

измерении вертикальных углов), ПИ наведения зрительной трубы на визируемую цель (например, смещение визирной оси зрительной трубы при перефокусировке на разные расстояния, а для самонаводящихся на отражатель МКСИ (лазерных трекеров, электронных тахеометров) – проверка мертвого хода и др.), погрешность отсчётных устройств (например, ПИ базирования и установки растровых шкал (лимбов)), ПИ нарушения расположения основных осей компаратора (например, коллимационная ПИ и нестабильность вертикальной оси вращения, вызванная разноразмерностью шариков в опорном подшипнике поворотного стола), а также ПИ, вызванных изменением внешних условий (например, изменением температуры, рефракции и др.).

Анализ литературных источников информации показывает, что ПИ современных электронных угловых МКСИ массового применения составляет порядка $2 \div 5$ угловых секунд [107]. Повышение точности МКСИ достигается за счет ужесточения технологических допусков, как при изготовлении отдельных деталей и узлов, так и при сборке и юстировке МКСИ в целом. Дальнейшее повышение точности достигается в основном селективным отбором МКСИ при

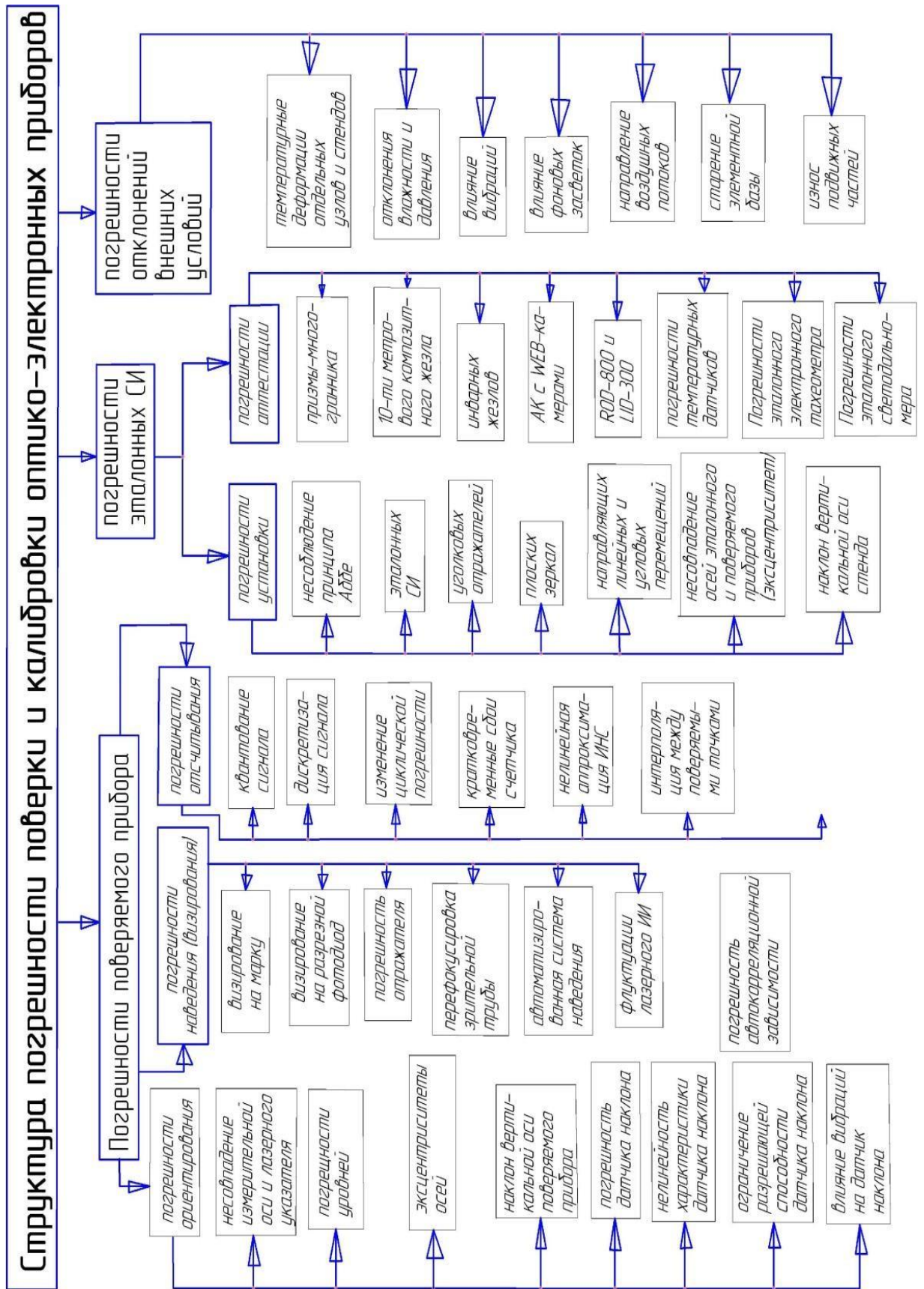


Рисунок 1.12

их исследованиях.

Для разделения ПИ эталонного измерительного комплекса и ПИ, относящихся к исследуемому МКСИ, ниже остановимся на некоторых из них более подробно.

Погрешность измерений, вызванная нарушением принципа Аббе

В рассмотренных выше иностранных Стандартах известны методы измерений с использованием следующих эталонных СИ:

- 1) лазерной измерительной системы,
- 2) штриховой меры длины,
- 3) артефактов с двумя гнездами-целями,
- 4) вращающегося жезла,
- 5) концевых мер длины.

В настоящее время наиболее точными для исследований рабочих средств измерений среди линейных эталонных средств являются штриховые инварные жезлы первого и второго разрядов. Они поверяются с ПИ не более $0,01 \div 0,15$ мкм, увеличение погрешности происходит при считывании информации. При использовании для считывания ФЭМ этот источник ПИ может быть уменьшен до $0,05$ мкм [156]. Среди угловых мер предпочтение остается за призмами-многогранниками 1 разряда, калибровка которых выполняется с ПИ $0,05 \div 0,3''$.

При передаче линейного размера при ПКИ линейному средству измерения ПИ увеличивается за счет несоблюдения принципа Аббе (несовпадения осей используемой эталонной меры и измерительного канала ПКИ МКСИ). ПИ Аббе первого, или второго рода проявляется, когда ось сферического отражателя ПКИ МКСИ смещена от оси эталонного жезла, а каретка перемещается по рельсам с угловыми отклонениями в вертикальной и горизонтальной плоскостях. ПИ Аббе может быть оценена по диаграмме [118].

Погрешность измерений из-за отклонений внешних условий

К внешним условиям измерений можно отнести следующие факторы: вибрации, отклонения температуры, влажности и давления. Указанные факторы

при определенных обстоятельствах могут носить как случайный, так и систематический характер. При отклонениях температуры из-за изменения показателя преломления среды изменяется длина волны лазерного излучения (рисунок 1.13).

ПИ из-за отклонений внешних условий вносят дополнительную ПИ при метрологическом обеспечении измерительных систем [60].

Исследования вибраций на изолированных фундаментах разных организаций, расположенных на территории г. Москвы (НПО “Геофизика”, НИИИЗмерения, на оптико-механическом компараторе МИИГАиК), с помощью чувствительной аппаратуры фирмы “Брюль Кьер”, проведенные автором диссертации, показали, что минимальная амплитуда вибраций в ночных условиях составляет порядка $1 \div 3$ мкм, днем амплитуда вибраций возрастает до $5 \div 10$ мкм на частотах 1 Гц и выше. При метрологическом обеспечении МКСИ в лабораторных условиях это может привести к ПИ порядка $\approx 0,05$ ”.

Температурные деформации линейных средств измерений (например, жезлов, штриховых мер длины и др.) можно рассчитать, зная температурные коэффициенты линейного расширения по формуле:

$$L_{\text{этал}} = L_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

t

Длина эталонного жезла, использовавшегося при выполнении экспериментов в данной работе, вычислялась по формуле (1.5), полученной ВНИИМ при калибровке жезла:

$$L_{\text{этал}} = 3\text{м}-76,3 \text{ мкм} + (5,386 \text{ мкм}/\text{t}^\circ\text{c} - \text{t}^\circ \times 0,0077 \text{ мкм}/\text{t}^{\circ 2}\text{c}) \times \text{t}^\circ\text{c} \quad (1.5)$$

Здесь t°c – температура жезла.

Для эталонного 3-х метрового жезла первого разряда отклонение длины его от температуры в настоящее время учитывается с температурным интервалом $0,1^\circ\text{C}$, что приводит к ПИ, равной $0,4$ мкм. На длине компаратора, равной 24-м метрам,

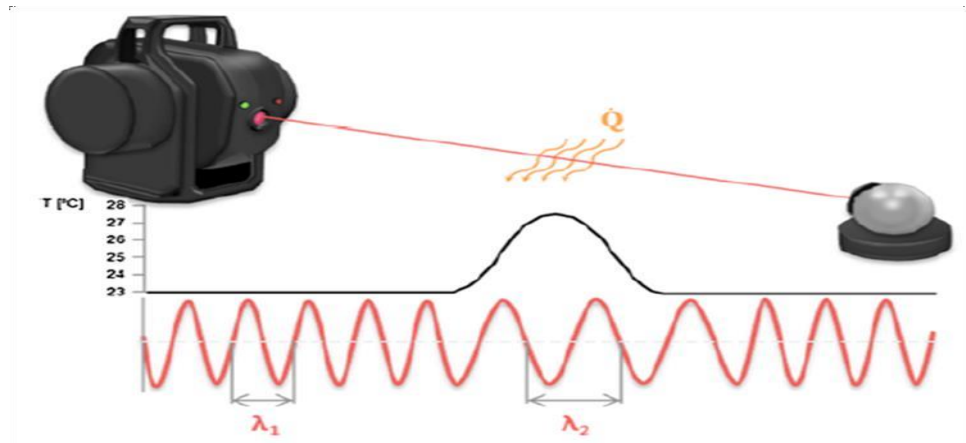


Рисунок 1.13 – Изменение длины волны лазерного излучения при увеличении температуры

это может привести к максимальной ПИ, равной 1,13 мкм. Расчет длины жезла по формуле (1.7) существенно снизит данный источник ПИ. ПИ изменения размера жезла исключается посредством введения поправки, вычисленной при известных отклонениях температуры в процессе измерений.

Систематический и случайный характер влияния на ПИ температурных деформаций современного 3D МКСИ, имеющего сложные кинематические схемы, можно выявить только по результатам его исследований в термостабилизированных лабораторных условиях.

Погрешность измерений при визировании на цель

Известны несколько методов визирования на цель [93, 90]:

1. Визирование на марку;
2. Визирование на уголкового отражатель;
3. Визирование на шкалу длиннофокусного коллиматора;
4. Наведение лазерного луча на разрезной фотодиод или ПЗС-матрицу;
5. На произвольно выбранную плоскость.

Выбор метода наведения зависит от конструкции МКСИ, расстояния до него и от требуемой точности измерений. При этом ПИ визирования может составлять порядка $0,1 \div 1,0$ угл. сек.

Известно [93], что при визуальном методе наведения зрительной трубы с использованием автоколлимационного метода погрешность визирования на цель

(наведения) может быть порядка $0,2''$, с использованием зонных пластинок и систем с аксиконами – $0,2 \div 0,5''$, системы с применением лазерных источников излучения имеют погрешность наведения за счет флуктуаций индикатрисы лазерного излучения порядка $0,5 \div 1,0''$. Наименьшую ПИ наведения можно получить интерференционными методами и фотоэлектрическим наведением – порядка $0,1''$.

Точность визирования МКСИ, имеющих зрительную трубу, зависит от разрешающей способности глаза, параметров зрительной трубы, формы марки, вида сетки нитей и яркости и цвета фона. Предварительный расчет искажения марки можно выполнить, исходя из условия Релея [68], однако, на практике при совмещении удаленных марок чаще для вычисления СКП визирования используют формулу [71].

Для МКСИ типа лазерного трекера или самонаводящегося электронного тахеометра при визировании на угловой отражатель в сферической оправе необходимо учитывать ПИ, вызванные центрированием вершины сферического отражателя, формированием двухгранного угла и поляризацию лазерного излучения, а также турбулентность воздушных масс и изменение температурного градиента также влияют на дисперсию лазерного луча. Известно, что изменение температурного градиента на 1°C приводит к ПИ от дисперсии света порядка $0,3''$.

Поэтому самые точные лазерные трекеры оснащаются метеостанциями, данные их измерений позволяют учитывать в дальнейшем поправки за изменение температуры, влажности и давления. При метрологических испытаниях необходимо учитывать и такие воздействующие факторы, как рециркуляция воздуха, вызванная работой кондиционеров и других источников обогрева.

Погрешность измерений при ориентировании МКСИ

Погрешность измерений углов

ПИ измерений углов влияет на абсолютную объемную ПИ МКСИ [158,162]. При заявленной ПИ, например, равной $(10+1L)$ мкм, на расстоянии отражателя до МКСИ, равном десяти метрам, угловая ПИ не должна превышать $0,5''$. Такую точность можно достичь только при использовании самых прецизионных направляющих, может быть на пневматических подшипниках, или при стационарном расположении марок-гнезд для отражателя МКСИ.

Погрешность измерений, вызванная отклонением от ортогональности осей и их эксцентриситетом

Указанные источники ПИ для теодолитов и электронных тахеометров хорошо изучены и устраняются выбором соответствующей методики измерений (например, влияние эксцентриситетов осей устраняется выбором четного количества приемов измерений), или введением поправок в результаты измерений [102]. Для лазерных трекеров известные методики указанный вид ПИ практически не исключают, так как работают в пределах горизонтального угла, меньшего 360° , а сами ЛТ не имеют центриров.

На рисунке 1.14 показана диаграмма распределения основных источников ПИ на оптико-механическом компараторе, здесь по оси ординат приведены значения методической ПИ в мкм, по оси абсцисс:

- 1 - значение ПИ Аббе при отклонениях осей, равных $0,2$ мм,
 - 2 – влияние ПИ эталонной призмы 1 разряда на расстоянии от МКСИ до измеряемой марки, равном 10 метрам,
 - 3– ПИ при горизонтировании МКСИ с ПИ уровня, равной $0,2''$, 4– погрешность за поправку в размер жезла на 24 -метрах,
 - 5– ПИ за установку с эксцентриситетом МКСИ над эталонной призмой, 6– влияние ПИ калибровки эталонной призмы.
- Из диаграммы, приведенной на рис. 1.14, видно, что основными

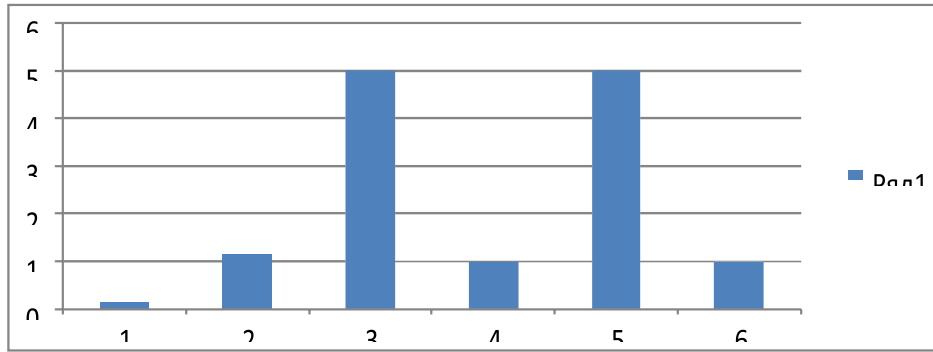


Рисунок 1.14 - Диаграмма распределения основных составляющих методической ПИ

источниками методической ПИ могут быть ПИ линейного эталонного СИ, углового эталона и эксцентриситет установки МКСИ средства измерений, влияние которого необходимо устранить.

Анализ источников методической погрешности измерений при использовании оптико-механического компаратора

Анализ известных в зарубежной и отечественной практике методов исследований современных МКСИ показывает, что в них, во-первых, используются ограниченное количество проверяемых отсчетов в диапазоне измерения, что не позволяет выявить короткопериодические детерминированные ПИ МКСИ, во-вторых, невозможность установки используемых артефактов в одно и то же положение вносит дополнительную ПИ при многократных измерениях, в-третьих, при изменениях положения эталонов может изменяться их длина.

Исходя из выше сказанного, в данной работе основной упор был сделан на обеспечение единой метрологической базы от начала и до конца исследований МКСИ. За основу взята схема известного 24-х метрового линейного оптико-механического компаратора МИИГАиК.

Исходными эталонами при использовании оптико-механического компаратора являются геодезический жезл 1 разряда и призма-многогранник 1 разряда.

Согласно ГОСТ 8.020-75 ПИ геодезического жезла 1 разряда длиной 3

метра составляет $\Delta(L)=(0,1+0,2L)$ мкм. Длина, имеющегося в распоряжении метрологической лаборатории МИИГАиК, жезла 1 разряда при отклонениях температуры в соответствии со свидетельством о его поверке вычисляется по формуле: $L=3\text{м}-76,3\text{ мкм}+(5,386-0,0077t)t$, что при температуре 20°C равно $3000,02834\text{ м}$.

Тогда при ПИ температуры, равной $0,5^{\circ}\text{C}$, ПИ составит $2,54\text{ мкм}$, а при ПИ температуры, равной $0,2^{\circ}\text{C}$, ПИ за отклонение температуры от нормальной составит $1,02\text{ мкм}$.

ПИ, связанная с выставлением измерительного канала МКСИ вдоль направления перемещения подвижной каретки, исходя из конструкции 24-х метрового компаратора, при визуальном определении отклонения пятна излучения лазера будет не более $0,05\text{ мкм}$.

Многочисленные экспериментальные исследования ПИ наведения микроскопами оптико-механического компаратора на штрих эталонного жезла показали, что она не превышает $\pm 2\text{ мкм}$.

Считая рассмотренные источники ПИ взаимно независимыми, при неизвестных отклонениях температуры не более $0,2^{\circ}\text{C}$ методическая ПИ не превысит $1,8\text{ мкм}$, дальнейшее уменьшение ее возможно методом, например, уравнивания результатов многократных измерений.

Основными источниками методической ПИ при использовании оптико-механического компаратора будут ПИ эталонного геодезического жезла 1-го разряда, связанные в основном с изменением внешних условий, призмы-многогранника, лазерного интерферометра и автоколлиматоров, ПИ из-за наведения на штрих меры, ПИ за несоблюдение принципа Аббе, отклонение от прямолинейности перемещения каретки с эталонным жезлом (ПИ при вычислении косинуса) и ПИ базирования МКСИ, при использовании в качестве эталона лазерного интерферометра возникает ПИ, при вычислении поправок в длину волны источника излучения.

1.5 Пути повышения точности координатных измерений

Проведенные обзор и анализ современных многофункциональных координатных оптико-электронных МКСИ и методов их исследований, испытаний, калибровки и поверки позволяет сделать *следующие выводы*:

1. Одним из необходимых требований является обеспечение измерения всех метрологических параметров с одной установки 3D МКСИ (обеспечить единую метрологическую базу),
2. С целью обеспечения единства измерений при исследованиях мобильных координатно-измерительных машин необходимо использовать прямые методы измерений (передачу размеров от вышестоящих эталонов),
3. Температурные условия не должны отличаться от нормальных более, чем на $0,2^\circ$, тогда, как видно из диаграммы, показанной на рис. 1.14 ПИ за изменение температуры эталонного жезла не будет превышать $0,8$ мкм,
4. Измерения должны быть выполнены во всем рабочем диапазоне,
5. Особое место уделить детерминированным внутришаговым (высоко-частотным) ПИ исследуемого МКСИ, связанным со старением его элементной базы (например, высокочастотным детерминированным ПИ - в дальномерных блоках, интерполяции и квантования – в угловых измерительных системах), определению поправок в измерительных системах для определения превышений и вертикальных размеров (цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки),
6. Уменьшение методической ПИ измерений возможно методом, например, создания многоугольников и уравнивания результатов многократных измерений их координат.

Выводы по Главе 1

Проведенный обзор и анализ известных современных координатных МКСИ и методов и средств их метрологического обеспечения позволяет сделать *следующие выводы*:

1. На отечественном и мировом рынках в области измерения больших размеров (более 1 метра) произошел коренной переход от оптических и механических СИ

к оптико-электронным, появилось значительное количество дорогостоящих широкодиапазонных многофункциональных координатных МКСИ, при этом структура погрешности измерений, которыми не выявляется известными зарубежными и отечественными методами и эталонными средствами,

2. Зарубежные фирмы практически не представляют вместе с МКСИ методик исследований и ПКИ, известны лишь весьма ограниченные сведения, в предлагаемых зарубежными фирмами и организациями методиках измерений имеются существенные различия, как в проведении измерений, так и при оценке их результатов,

3. Известные иностранные методики исследований координатных МКСИ подразумевают измерение длины одномерной меры длины, не предполагают выполнение измерений во всем рабочем диапазоне, в качестве эталонов используют в основном концевые меры длины, ступенчатые меры, артефакты и лазерные интерферометры, при этом практически отсутствует непосредственная привязка измеренных координат к первичным эталонам,

4. В структуре ПИ оптико-электронных МКСИ значительными составляющими являются внутришаговые детерминированные высокочастотные (коротко-периодические) ПИ (интерполяции, квантования и т.д.), на которые в известных методах ПКИ ранее не уделялось должного внимания, однако влияние некоторых из них, например, погрешности за эксцентриситеты осевых систем, можно выявлять и учитывать в дальнейшем,

5. Известные однокоординатные эталонные СИ в принципе не решают задачи метрологического обеспечения 3D МКСИ, идеология измерений должна подразумевать комплексную систему передачи единицы длины и угла в трехмерной декартовой системе координат,

6. Повышение точности измерений возможно за счет обеспечения единой метрологической базы (выполнение измерений с одной установки исследуемого МКСИ) при проверке всех метрологических параметров современных МКСИ, снижение методической ПИ возможно за счет более тщательного учета внешних условий в диапазоне измерения,

7. Действующая в отечественной практике методика поверки МИ 2569-99 предполагает поверку мобильных МКСИ только в диапазоне измерений до 2-х метров,
8. Методики исследований современных МКСИ для измерения вертикальных размеров и превышений не предполагают привязку результатов исследований к рабочим условиям их использования в реальном производстве,
9. Современные высокотехнологичные отрасли производства и повышенные требования к точности изготовления крупногабаритных деталей и изделий в целом с целью обеспечения единства измерений требуют необходимости создания специального эталонного СИ для передачи размеров в широких диапазонах измерений координат в пространстве,
10. Имеющийся до настоящего времени оптико-механический компаратор с перемещающимся под микроскопами инварным жезлом 1 разряда позволял выполнять только линейные измерения в диапазоне до 24-х метров, поэтому необходима была разработка методики измерений, позволяющей выполнять пространственные измерения в более широком диапазоне измерений длин,
11. Необходима доработка оптико-механического компаратора с целью проверки метрологических характеристик 3D координатных средств измерений в рабочих диапазонах измерения углов до 360° ,
12. Повышение точности измерений может быть получено за счет снижения методической ПИ измерений путем получения уравненных горизонтального и вертикального полигонов пространственного артефакта, внутри которого располагается исследуемое координатное средство измерений,
13. Повышение точности измерений может быть получено также за счет снижения методической ПИ, вызванной ПИ наведения на штрихи инварного жезла, учетом отклонений от прямолинейности перемещения подвижной каретки с эталонным жезлом, кроме того, использованием вместо инварного жезла аналогичных по точности мер с большим количеством точек отсчета (например, композитного жезла),
14. При исследованиях интерференционных средств измерений желательно

15. Использовать аналогичные по физическим свойствам средства измерений.

Проведенные обзор и анализ состояния метрологического обеспечения координатных измерений в широком диапазоне измерений координат показывают, что в настоящее время в отечественной практике отсутствует система метрологического обеспечения дорогостоящих широкодиапазонных координатных средств измерений, таких, как лазерные трекеры, интерферометры, измерительные системы с цифровыми нивелирами, электронные теодолиты и тахеометры, наземные сканеры и другие трехмерные координатные средства измерений.

Таким образом, в данной главе *доказано*, что, так как указанные выше координатные средства измерений используются в критических областях промышленности, должны обеспечивать не только производительность, но и безопасность производства, учитывая их высокую стоимость и большое количество используемых МКСИ, необходимо разработать новую научно-техническую базу, основанную на обоснованных методах, алгоритмах и средствах оценки их точности при исследованиях пространственных координат в любой точке заявленного пространства измерений (с учетом короткопериодических составляющих погрешностей измерений), как в лабораторных, так и в производственных условиях.

Глава 2. Разработка научно-технической основы оптико-электронного комплекса для исследований мобильных трехкоординатных средств измерений

2.1 Общие требования к разработке оптико-электронного комплекса для исследований мобильных координатных средств измерений

Исходя из проведенного в первой Главе анализа, вторая Глава диссертации посвящена разработке научно-технической основы для генерации 1D÷3D эталонных пространственных координат, прецизионных методов и средств выявления, исследования (испытаний, калибровки, поверки, передачи единицы длины МКСИ) и компенсации (уменьшения в 2÷3 раза) систематической объемной и минимизации случайной погрешностей МКСИ в сферической системе координат (L, β, γ) в любой точке пространства измерений, как в нормальных (лабораторных), так и рабочих (цеховых) условиях, повышения точности измерений при исследованиях 3D МКСИ, в том числе и на основе коренной модернизации 24-метрового линейного оптико-механического компаратора (ОМК), генерирующего (воспроизводящего) эталонную линейную координату L.

С целью выявления – какая из измерительных систем 24-метрового ОК интерференционная лазерная или измерительная система «перемещающийся инварный жезл+ микроскопы» имеет преимущества по точности, как в нормальных, так и в цеховых условиях (для которых внешние условия отличны от нормальных и оказывают существенное влияние на результат и точность измерений) были проведены теоретические исследования.

Дан сравнительный анализ математических моделей и погрешности измерений лазерным интерферометром и измерительной системой «перемещающийся инварный жезл+ микроскопы».

При измерении координатных перемещений в диапазоне до одного метра и более широкое распространение получили измерительные системы, в которых

используются линейные измерительные системы (интерференционные голографические, растровые, емкостные, индуктивные) [66,68,74,84,95,120]. При их исследованиях, испытаниях, поверках и калибровке наибольшая точность измерений достигается при использовании в качестве эталонов штриховых мер длины с температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), близким к стали (материал инвар-стабиль) [84]. При этом съем информации со штриховых мер длины осуществляется с помощью фотоэлектрических микроскопов (ФЭМ) [74]. На ПИ измерительной системы с ФЭМ оказывают влияние: а) дискретность отсчитывания, б) ПИ наведения на штрих меры, в) нарушение принципа Аббе и др. [121]. Дискретность отсчитывания в настоящее время может быть достигнута порядка 0,01 мкм, ПИ наведения составляет порядка 1 мкм, основной вклад вносит ПИ Аббе [10], вызванная в основном отклонением от прямолинейности направляющих перемещения подвижной каретки, а также температурными деформациями компаратора. Известно [71], что в современных компараторах и измерительных машинах ПИ углового отклонения при перемещении каретки достигает порядка $(1 \div 2)$ угл. сек, при этом она имеет, как систематический, так и случайный характер [15,16,47].

Особую сложность вызывают исследования голографических измерительных систем, которые в соответствии с ГОСТ 8.763-2011 являются эталонами 1-го и 2-го разрядов, ПИ составляет, соответственно, $\Delta(L)=(0,1+0,2L)$ мкм и $\Delta(L)=(0,2+0,5L)$ мкм.

Исходя из выше сказанного, при создании компаратора для прецизионных измерений в диапазонах более одного метра в первую очередь необходимо уделить внимание соблюдению принципа Аббе (оси исследуемого и эталонного средств измерений должны совпадать).

При исследованиях широкодиапазонных измерительных систем с диапазоном измерения порядка одного метра и более при последовательном расположении мер меры будут находиться в разных условиях по температуре, влажности и др., кроме того, температурные отклонения скажутся на деформациях самой из-

мерительной установки (ОМК). При создании исследовательского комплекса была разработана система термостатики, обеспечивающая температуру в метрологической лаборатории в пределах от $+15$ до $+27^{\circ}\text{C}$ (диапазон температур ограничен из-за использования оптических микроскопов с паутинками). В зоне измерений расположены 16 температурных электронных датчиков, кроме того, непосредственно с эталонным 3-х метровым жезлом расположены два ртутных термометра с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$. Результаты экспериментальных исследований градиента температуры при включенной и выключенной системе термостатики приведены на рисунке 2.1.

Результаты исследований доказывают, что при разных температурах градиент температуры остается постоянным и не превышает $0,2^{\circ}\text{C}$.

На основе известных математических моделей влияния внешних условий (в условиях реального производства) Эдлена и Сиддора-Хилла на метрологические характеристики исследуемого МКСИ, разработаны математические модели,

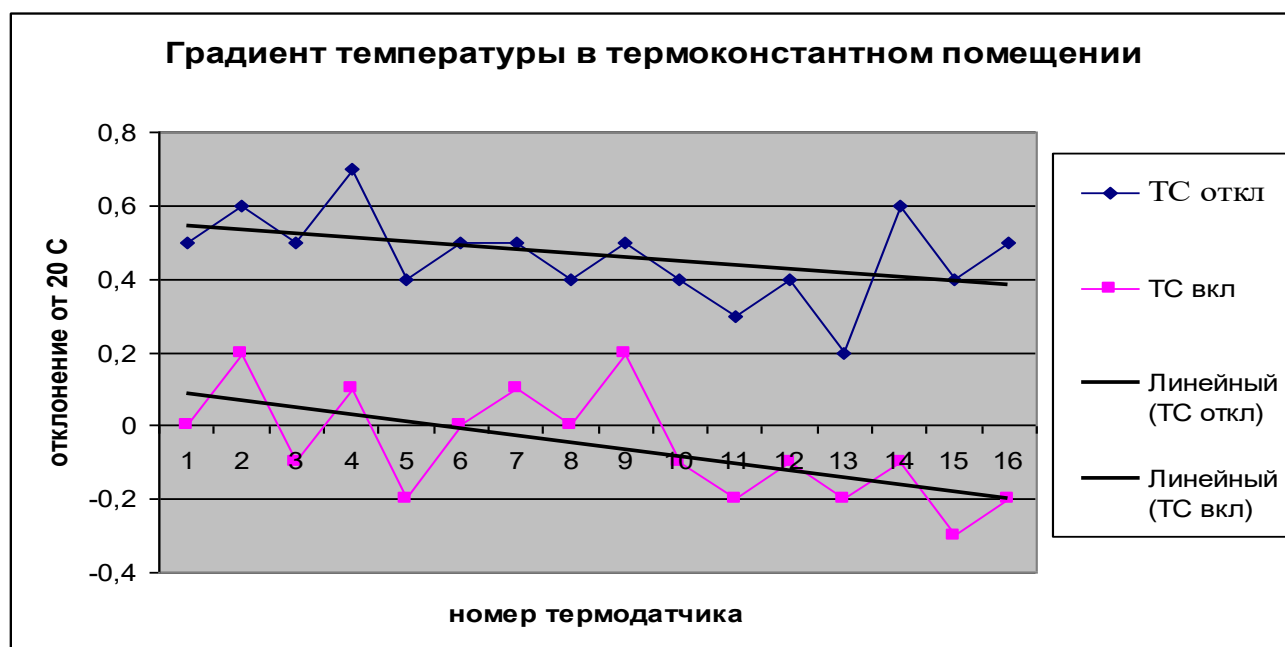


Рисунок 2.1 - Распределение градиента температуры в помещении метрологической лаборатории

представляющие из себя комплекс уравнений, для эталонов на базе материальных мер с оптическими и фотоэлектрическими микроскопами и лазерных интерферометров (линейный компаратор с эталонным инварным 3-х метровым жезлом 1-го разряда. Ниже теоретически обоснованы методы измерений с применением материальных эталонов и лазерных интерферометров при разных температурных градиентах в зоне измерений. Установлены области измеряемых длин и градиентов температуры, в которых точность измерений длин геодезическим жезлом в составе ОМК выше, чем лазерным интерферометром (ЛИ), при наличии температурного датчика ЛИ только в его метеостанции, расположенной в начале трассы измерения длины, (в то время, как градиент температур вдоль линии измерения- для геодезического жезла отслеживается 16-ю термодатчиками вдоль трассы измерения длины).

Для анализа влияния в бюджете ПИ изменения градиента температуры при использовании эталонов типа инварного жезла и лазерного интерферометра были использованы следующие математические модели:

1) Математическая модель длины используемого эталонного инварного жезла 1 разряда при изменении температуры жезла (из свидетельства при его калибровке на первичном эталоне длины (см. формулу 1.5 в Главе 1),

2) $\Delta(L) = (-0,361 \cdot \Delta P + 0,937 \Delta t + 0,054 \Delta f) \cdot L$ - математическая модель изменения длины из-за рефракции в измерительном канале лазерного интерферометра (формула Эдлена из ГОСТ 8.353-96), здесь P, t, F – давление, температура и влажность соответственно,

$$D(\lambda) = \sum_1^k n_{\text{норм.усл.}}(\lambda) dL,$$

3) где: $m_{\text{норм.усл.}}(\lambda) = N_{\text{норм.усл.}} \times 10^{-6} + 1$ - математическая

$$N_{\text{норм.усл.}} = N(\lambda) \times \frac{T_0 \Delta P}{P_0 \Delta T} - \left(17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \times \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

модель изменения длины из-за рефракции в измерительном канале лазерного интерферометра (формула Эдлена (формула Сиддора-Хилла). Здесь ΔH – изменение влажности, ΔT – градиент температуры, ΔP – изменение давления, λ - длина

волны лазерного излучения, N – количество длин волн.

Разработанная математическая модель измерений длины радиуса-вектора с помощью инварного 3-х метрового жезла в сферической системе координат имеет вид:

$$L_{i\text{ж}} = i \times L_{\text{жд}} + i \times \Delta_{\text{жд}} + \frac{i+1}{\sqrt{2}} \times \Delta_{\text{микр}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \times \Delta(L_{\text{ж}}(t^\circ)) + \Delta_{\text{cos}} + \Delta_{\text{Аббе}} \quad (2.1)$$

здесь: $L_{\text{жд}} = 3000,031266$ мм – номинальная длина инварного жезла при $t = 20^\circ\text{C}$,

$\Delta_{\text{жд}} = 0,02$ мкм – погрешность измерений при калибровке эталонного жезла (из сертификата калибровки эталона),

$\Delta_{\text{микр}} \leq 2$ мкм – погрешность измерений при визировании микроскопом, получена экспериментально,

$\Delta(L_{\text{ж}}(t^\circ)) = 1$ мкм - погрешность измерений при отклонении температуры от нормальной на $0,2^\circ\text{C}$,

Δ_{cos} - погрешность измерений при несовпадении направлений осей эталона и исследуемого МКСИ (косинусная составляющая ПИ), второго порядка малости.

$\Delta_{\text{Аббе}}$ - погрешность измерений при несовпадении осей (ПИ Аббе), исключается методически,

i – количество уложений инварного жезла.

Стандартная ПИ с помощью инварного жезла вычисляется как:

$$\Delta_{L_{i\text{ж}}} = \sqrt{(i \times \Delta_{L_{\text{жд}}})^2 + \left(\frac{i+1}{\sqrt{2}} \times \Delta_{\text{микр}}\right)^2 + \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \times \Delta_{L_{\text{ж}}(t^\circ)}\right)^2 + \Delta_{\text{cos}}^2 + \Delta_{\text{Аббе}}^2} \quad (2.2)$$

Подставив в формулу (2) реальные значения Δ_i при восьми уложениях жезла на длине 24 метра получим стандартную ПИ: $\Delta(L_{i\text{ж}}) = 14,0$ мкм.

Соответственно расширенная ПИ при коэффициенте запаса $k=2$ и вероятности 95% с применением инварного жезла равна 28 мкм на длине 24 метра.

Из приведенной формулы (2.2) видно, что основной вклад в ПИ вносят составляющие, связанные с отсчитыванием по оптическим микроскопам и измерением температуры инварного жезла. Использование отечественных фотоэлектрических микроскопов, например, ФЭМ-1Ц с ПИ, равной 0,5 мкм, и платиновых термометров с ПИ, равной 0,05°С, уменьшит стандартную ПИ оптико-механического компаратора с жезлом до 5,7 мкм (расширенная ПИ не более 11,4 мкм).

Выявим стандартную ПИ лазерным измерителем длины (например, интерферометром), которая выражается формулой: $L = N \frac{\lambda}{2} = N \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2n}$ (2.3)

Бюджет погрешности при интерференционных измерениях представляется в виде известной формулы:

$$\Delta_{\text{инт}} = (n_{\lambda} - n_{\text{вак}})L + \Delta n l_{\text{мх}} + \Delta_{\text{напр}} + \Delta_{\text{cos}} + \phi b \quad (2.4)$$

$$\text{Здесь: } n_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{кал}}}{\lambda_{\text{вак}}} - 1, \quad \lambda_{\text{вак}} = 632,9908 \text{ нм}$$

$\Delta_{\text{аббе}} = b \times \tan \varphi + \phi b$ - погрешность Аббе исключается методически путем юстировки одинакового расстояния прямого и обратного хода лучей интерферометра относительно оси жезла и исследуемого МКСИ,

$\Delta_{\text{напр}} = \sqrt{\frac{5}{12}} \frac{a^2}{L} = 0,0043 \text{ мкм}$ - погрешность из-за кривизны направляющих при отклонении от направления перемещения жезла $a=0,4 \text{ мм}$ и его длине $L=3 \text{ м}$, не учитывается,

$\Delta_{\text{cos}} = (\cos \theta - 1)L = -\frac{\theta^2}{2} L = 0,07 \text{ мкм}$ - погрешность при несовпадении направлений перемещения каретки и оси исследуемого МКСИ (погрешность косинуса) не более $c=0,4 \text{ мм}$ на длине $L=24 \text{ м}$ не учитывается.

Графически полученные значения точности измерений в зависимости от градиентов температуры на разных расстояниях с использованием в качестве эталонов лазерных средств измерений и инварного 3-х метрового жезла показаны на рисунках 2.2 и 2.3 (кривая 1 – используется формула Эдлена по ГОСТ 8.353-96 и оптический микроскоп, кривая 2 – используется формула Сиддора-Хилла и оптический микроскоп, кривая 3 – используется формула Эдлена за рубежом и оптический микроскоп, кривая 4 – используется формула Эдлена по ГОСТ 8-353 и фотоэлектрический микроскоп, кривая 5 – используется формула Сиддора-Хилла и фотоэлектрический микроскоп, 6 – используется формула Эдлена за рубежом и фотоэлектрический микроскоп). Из них видно, что в нижней зоне (под графиком) лазерным интерферометром при соответствующем градиенте температуры достигается точность измерений выше, чем на оптико-механическом компараторе, при увеличении расстояний точнее измерения будут на оптико-механическом компараторе с инварным жезлом (верхняя зона). Например, при реально достигнутом градиенте температуры в термоконстантном помещении за время измерений, равном $0,2^{\circ}\text{C}$, более точным будет метод измерений с использованием в качестве эталона лазерного интерферометра на расстояниях до 17,5 метров, при градиенте же температуры, равном $0,5^{\circ}\text{C}$, что ближе к реальным условиям производства, точность интерферометра и материального эталона одинаковы уже на расстоянии 10-ти метров (см. рисунок 2.4).

На рис 2.2 показаны диаграммы кривых - геометрического места точек, где точность лазерного интерферометра (при условиях, описанных выше) совпадает с точностью инварного 3-х метрового жезла в составе ОМК. Над кривыми диаграмм точность инварного жезла в составе ОМК выше точности лазерного интерферометра (при условиях, описанных выше).

При градиенте температуры, равном 1°C , погрешности с использованием интерферометра и оптико-механического компаратора с инварным жезлом в схеме с удвоением отсчета в МКСИ практически сравниваются на расстоянии 7 метров, т.е. при больших расстояниях оптико-механический компаратор

обеспечивает точность измерений выше. Результаты исследований приведены на рисунке 2.5

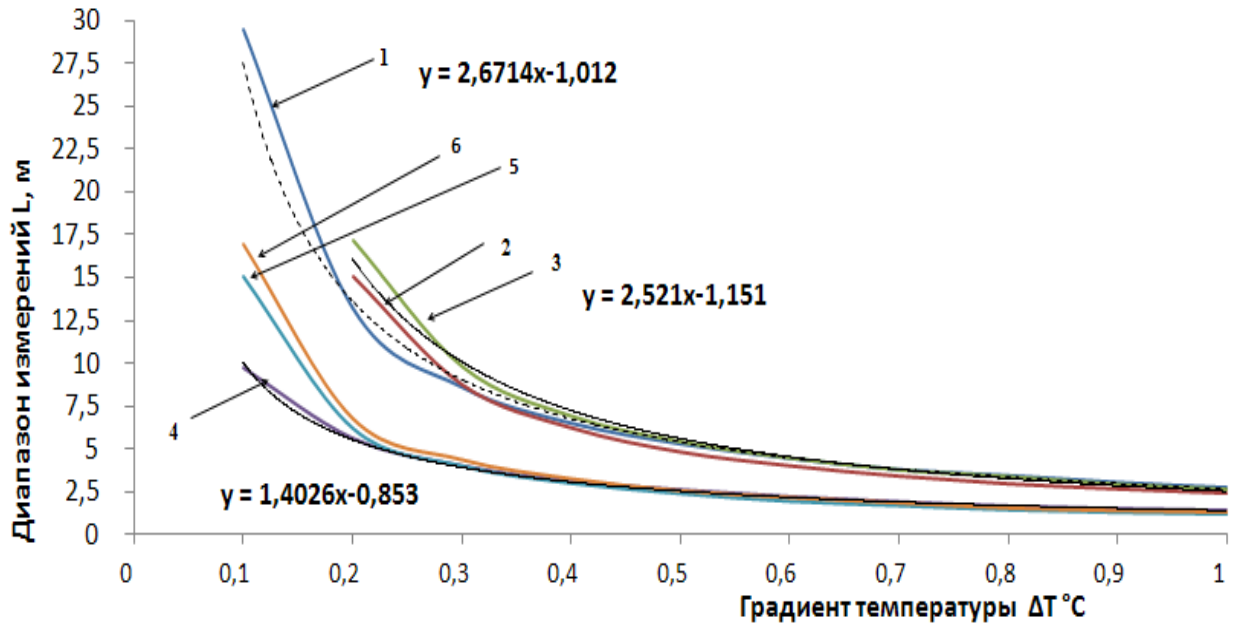


Рисунок 2.2 - Рисунок 2.2 Диаграммы сравнения точности линейных измерений лазерным интерферометром и на оптико-механическом компараторе при разных градиентах температуры



Рисунок 2.3 - Сравнение точности линейных измерений на оптико-механическом компараторе при использовании лазерного интерферометра или инварного жезла с оптическими микроскопами при градиенте температуры, равном $0,2^{\circ}\text{C}$

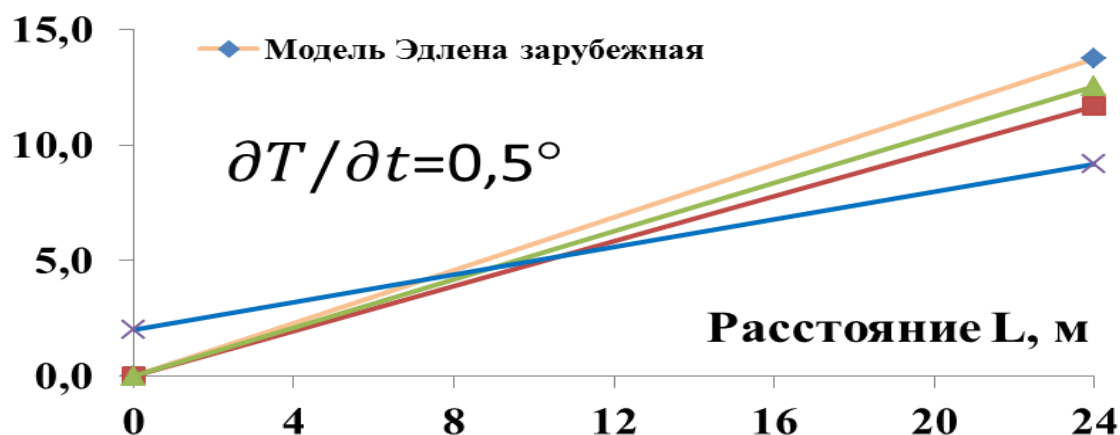
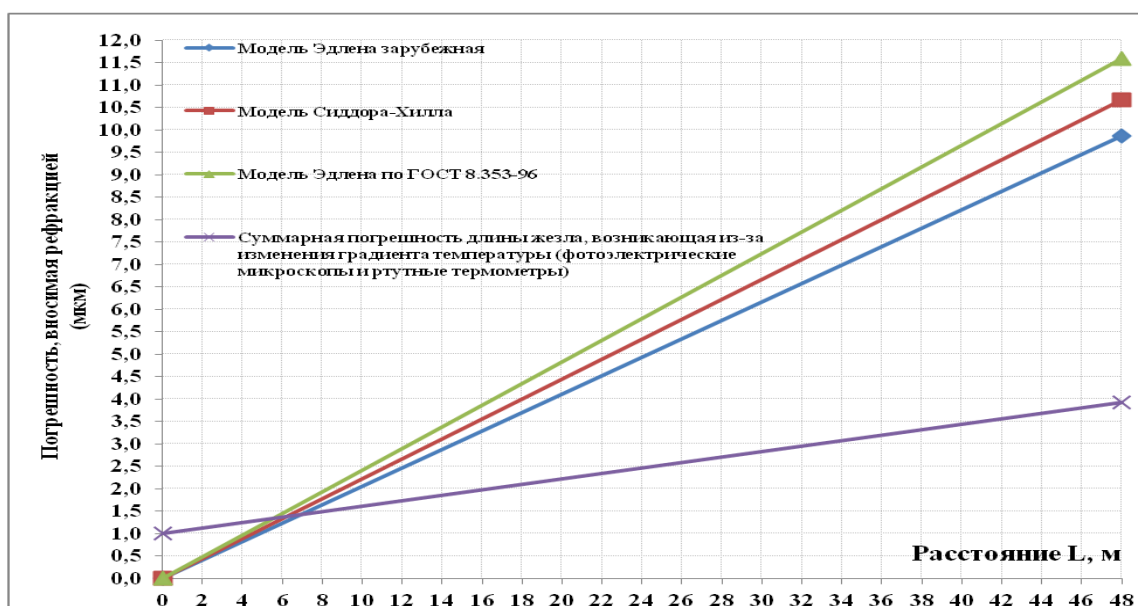


Рисунок 2.4 - Сравнение точности линейных измерений на оптико-механическом компараторе при использовании лазерного интерферометра или инварного жезла с оптическими микроскопами при градиенте температуры, равном $0,5^\circ\text{C}$



2.5 - Сравнение точности линейных измерений на оптико-механическом компараторе при использовании лазерного интерферометра или инварного жезла с оптическими микроскопами при градиенте температуры, равном 1°C

Из приведенных формул видно, что одной из существенных составляющих ПИ является изменение внешних условий, вызывающее рефракцию луча лазера в интервале измерений.

В работе экспериментально подтверждено, что температура в созданном термokonстантном помещении за время измерений изменяется не более, чем на $0,2^{\circ}\text{C}$. Для исследований МКСИ в условиях, приближенных к производственным, поэтому предусмотрена установка температуры в помещении лаборатории в пределах от $+15$ до $+27^{\circ}\text{C}$ с тем же градиентом температуры.

Таким образом, показано, (при выполнении указанных выше условий) преимущество в точности геодезического жезла в составе ОМК, по сравнению с лазерным интерферометром (вследствие меньшей зависимости от температуры удлинения материального эталона (жезла) по сравнению с коэффициентом рефракции при интерференционных измерениях).

2.2 Разработка линейного компаратора с двумя эталонными мерами, позволяющими исключить влияние отклонения от соблюдения принципа Аббе 1-го рода при параллельном расположении осей исследуемого и эталонных средств измерений (не в створе)

В данной диссертационной работе разработан и реализован на практике метод и устройство для его реализации для линейных МКСИ, позволяющие исключить влияние отклонения от соблюдения принципа Аббе 1-го рода при параллельном расположении исследуемого и эталонного средств измерений за счет добавления в схему измерений второго эталонного средства измерений, при этом оба эталона расположены параллельно на известных расстояниях от измерительной шкалы МКСИ [121,149]. Метод может быть использован и для мобильных ИС в широком диапазоне измерений.

Функциональная схема разработанного компаратора с двумя параллельными мерами показана на рисунке 2.6.

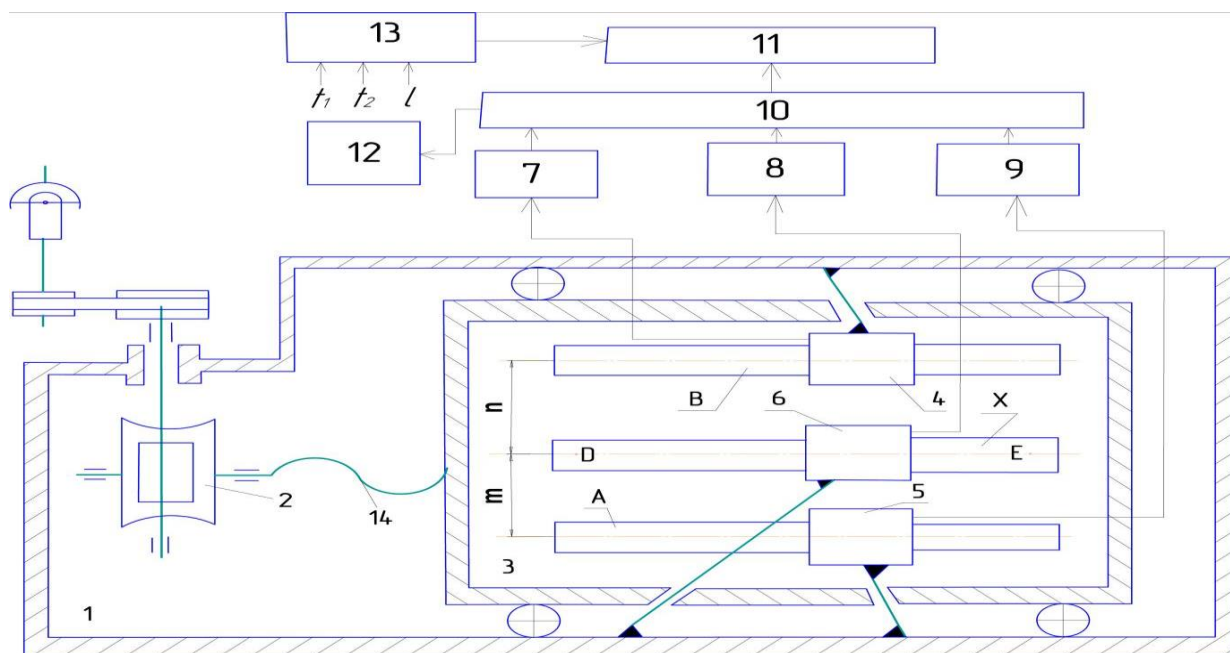


Рисунок 2.6 - Функциональная схема компаратора с двумя эталонными мерами: X – исследуемое СИ, A и B – эталонные меры, 1 – станина машины МС-42м, 2 – система передачи движения подвижной каретки 3 с жестко закрепленными мерами от двигателя к ходовому винту, 4 и 5 – фотоэлектрические микроскопы, 6- считывающее устройство поверяемого СИ, m и n – расстояния от поверяемого МКСИ до меры A и B соответственно, 7÷9 – цифровые счетчики перемещений, 10 и 11 – ЭВМ с интерфейсом, 12 – электропривод, 13 – температурные датчики

При выполнении измерений позиционирование может осуществляться по исследуемому МКСИ, а действительное значение перемещения каретки 3 вдоль оси X по линии DE определяется по отсчетам на мерах A и B.

При нулевом начальном отсчете математическая модель измерений имеет вид:

$$X_i = \frac{m \cdot X_B + n \cdot X_A}{m + n} \quad (2.5)$$

Здесь m и n – расстояния от калибруемой меры (измерительного канала МКСИ) до эталонных мер (измерительных каналов эталонов (интерферометров)), X_B и X_a - отсчеты по мерам.

При этом отклонение от прямолинейности перемещения каретки с мерами не увеличивает ПИ, так как выполняется пересчет значений, отсчитанных по эталонным мерам и приведение значений перемещений мер А и В на ось X испытуемого МКСИ.

С учетом поправок за компарирование эталонных штриховых мер А и В математическая модель измерений (2.5) имеет вид:

$$X_i = \frac{\{m[(x_{Bi} + \delta_{BEi}) - (x_{Bj} + \delta_{BDj})] + n[(x_{Ai} + \delta_{AEi}) - (x_{Aj} + \delta_{ADj})]\}}{m+n} \quad (2.6)$$

Здесь δ_{AEj} и δ_{ADj} – поправки за компарирование меры А в конечной точке диапазона измерений,

δ_{AEi} и δ_{ADi} - поправки за компарирование меры А в начальной точке диапазона измерений,

X_A и X_B – отсчеты по мерам.

Погрешность измерения перемещения вычисляется как:

$$\Delta X_i = X_i - X_{эм},$$

Считая поправки δ за компарирование штриховых мер длины известными, после дифференцирования формулы (2.6) по m и n получим формулы (2.7 и 2.8) для вычисления суммарной ПИ как суммы произведений частных производных по m и n на ПИ m и n . При обнулении счетчиков эталонных преобразователей в начальной точке измерения ($X_0 = X_a = 0$) частные производные имеют вид:

$$\frac{\partial x}{\partial m} = \frac{\delta_{BEj} - \delta_{BDj}}{m+n} - \frac{(\delta_{BEj} - \delta_{BDj})m + (\delta_{AEj} - \delta_{ADj})n}{(m+n)^2} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial x}{\partial n} = \frac{\delta_{AEj} - \delta_{ADj}}{m+n} - \frac{(\delta_{BEj} - \delta_{BDj})m + (\delta_{AEj} - \delta_{ADj})n}{(m+n)^2} \quad (2.8)$$

При экспериментах максимальные значения поправок за компарирование мер составили: $\delta_{ВДj} = -0,1$ мкм, $\delta_{АДj} = 0,2$ мкм, $\delta_{ВЕj} = -5,7$ мкм, $\delta_{АЕj} = -0,5$ мкм, а $n = 100$ мм, $m = 90$ мм.

При этих начальных условиях: $\frac{\partial X}{\partial m} = -0,000014828_{\text{мкм}}$, $\frac{\partial X}{\partial n} = 0,000012304_{\text{мкм}}$.

Тогда ПИ в точке Е вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\delta_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial m_i} * \frac{\partial x}{\partial m_i}\right) * (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial n_i} * \frac{\partial x}{\partial n_i}\right) * (\Delta n)^2} \quad (2.9)$$

При расстояниях между мерами, измеренных с ПИ $\Delta m = \Delta n = 1$ мм,

$$\Delta X_i = 0,193 \text{ мкм} \approx 0,2 \text{ мкм}.$$

При известных поправках за компарирование эталонных мер длины можно вычислить ПИ в каждой точке диапазона измерения. В работе автора данной диссертации [121] поправки были определены с интервалом 1 мм.

Конструкция измерительной установки, алгоритм работы и ее экспериментальные исследования приведены в работе автора данной диссертации [121]. Механическая часть измерительной установки выполнена на базе машины для контроля ходовых винтов МС-42м и была зарегистрирована в Реестре средств измерений как БВ-2035. Результаты экспериментальных исследований приведены в Главе 4.

С учетом ПИ наведения на штрих меры использованным в эксперименте фотоэлектрическим микроскопом предельная ПИ составила не более $\pm 0,4$ мкм.

2.3 Разработка комплекса для исследований мобильных 3D-координатных средств измерений

2.3.1 Разработка структурной схемы комплекса

Структурная схема разработанного комплекса опубликована в работе [38]. Схема показана на рисунке 2.7. Комплекс разработан на основе известного 24-х

метрового оптико-механического компаратора, ранее использовавшегося только для поверки инварных проволок и штриховых мер длины. В основе разработанного комплекса для обеспечения прослеживаемости результатов измерений от первичных эталонов длины и угла использованы 3-х метровый и метровый инварные геодезические жезлы 1-го разряда и призма 24-х гранник 1-го разряда, а также лазерные интерферометры XL-80. От них линейные размеры передаются на композитный жезл длиной 10 метров, эталонную инварную рейку, далее на исследуемое МКСИ, а угловые размеры, или напрямую, или через круговой преобразователь, или трилатерационным методом по откалиброванному по длине МКСИ передаются исследуемому МКСИ.

Отличительными особенностями разработанного комплекса являются ее многофункциональность, как для линейных, так и угловых средств измерений, возможность выполнения исследований с одной установки МКСИ (т.е. с сохранением единой метрологической базы), а также для исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами и штрих-кодowymi рейками.

Кроме того, здесь вдоль линии измерения установлены шестнадцать температурных датчиков, позволяющих более точно и оперативно реагировать на отклонения температуры в отдельных участках и компараторах эталонного оптико-электронного комплекса (ЭОЭК).

2.3.2 Разработка функциональной схемы комплекса для исследований трехкоординатных средств измерений

При разработке функциональной схемы эталонного комплекса необходимо было учитывать широкую гамму современных рабочих 1D÷3D оптико-электронных средств измерений в широких диапазонах измерений координат.

При этом должна быть обеспечена прослеживаемость результатов измерений к известным вышестоящим по точности линейным и угловым эталонам. В виду того, что современные МКСИ, как правило, многофункциональные, имеют

несколько измерительных систем, взаимно влияющих на суммарную ПИ, их исследования должны осуществляться при сохранении единой метрологической базы (с одной установки МКСИ) [38].

Функциональная схема разработанного компаратора показана на рисунке 2.8. Здесь передача размеров осуществляется от первичных эталонов ГЭТ 22-2014, ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 199-2012.

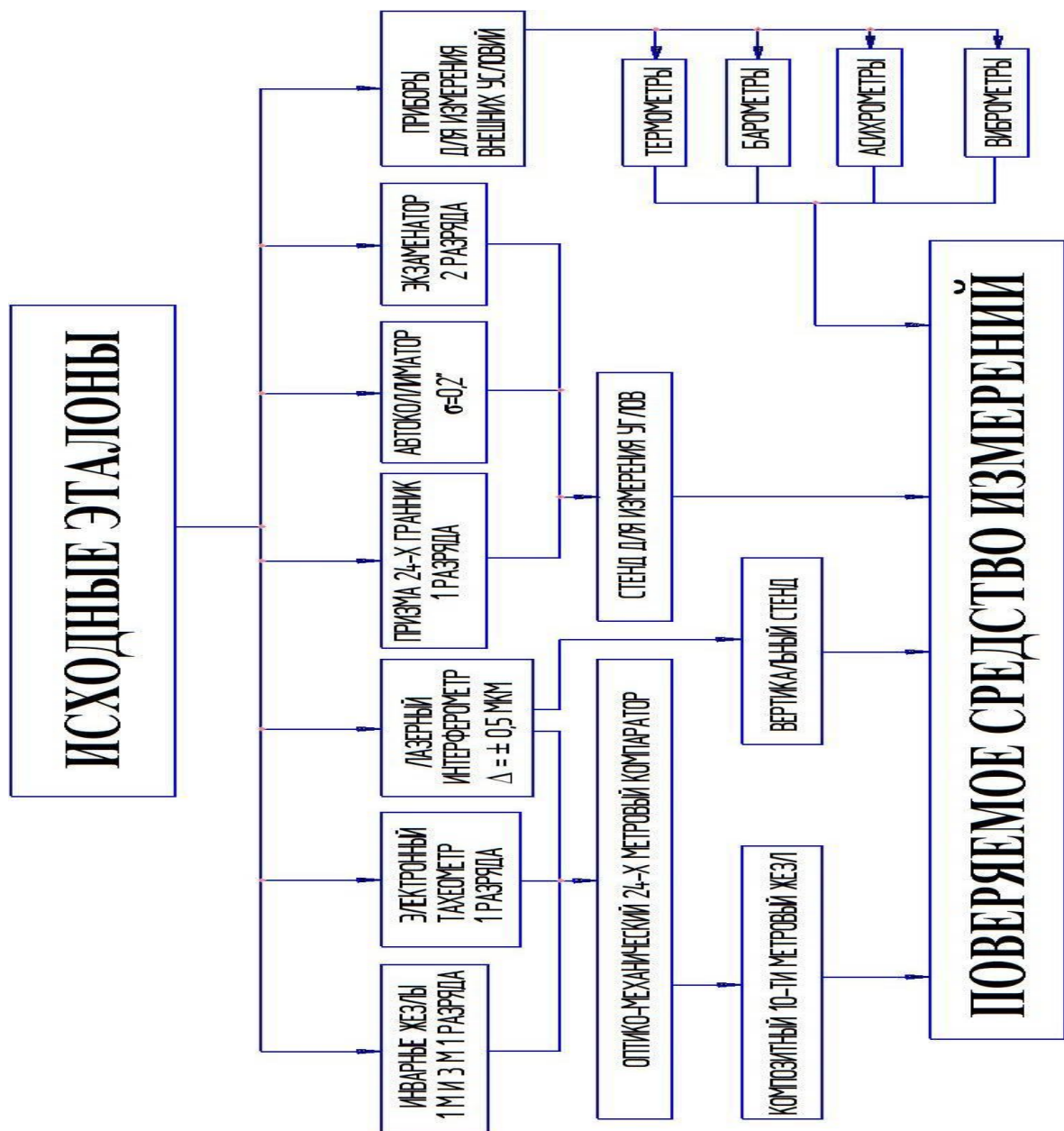


Рисунок 2.7 - Структурная схема комплекса

Функциональная схема комплекса содержит линейный оптико-механический компаратор с инварным жезлом и оптическими микроскопами, компараторы для исследований горизонтальных и вертикальных углов и блок термодатчиков. Исследуемое МКСИ устанавливается на горизонтальном угловом компараторе и соединено оптическими связями с линейным и вертикальным компараторами.

Схема расположения компараторов комплекса показана на рисунке 2.9.

В качестве исходных эталонов используются инварные 1÷3 – метровые жезлы 1 разряда, призма 24-х гранник 1 разряда и экзаменатор ЭО-1, а также может быть применена прецизионная стационарная КИМ.

В качестве рабочих эталонов используются лазерные интерферометры, композитные жезлы, экзаменаторы типа ЭО-1 или ЭГЕМ, электронный тахеометр с СКП 0,5'' (0,5 мм) и линейный базис 1 разряда ($S=0,5$ мм) длиной до 1000 м и более.

Разработанные схемы линейных и угловых компараторов опубликованы в работах автора данной диссертации [24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,36,39,40,41,43, 112,131].

2.3.3 Метод исследований дальномеров МКСИ в диапазоне измерений до 24-х метров

Методика измерений данным методом исследований состоит из калибровки длины компаратора (п.1) и исследования ПИ МКСИ в диапазоне измерений (п. 2):

1. Исследуемое МКСИ 13 устанавливается на поворотном столе кругового горизонтального компаратора ГУК так, что измерительная ось его через отражатель 11, установленный на каретке совпадает с осью эталонного инварного жезла 1 и осью измерительного канала лазерного интерферометра 6, а призма-многогранник сориентирована по первой и тринадцатой граням на автоколлиматоры 4 и 5, каретка с жезлом перемещается последовательно под микроскопами на всю длину,

проверяется длина компаратора, после чего каретка возвращается в начальное положение.

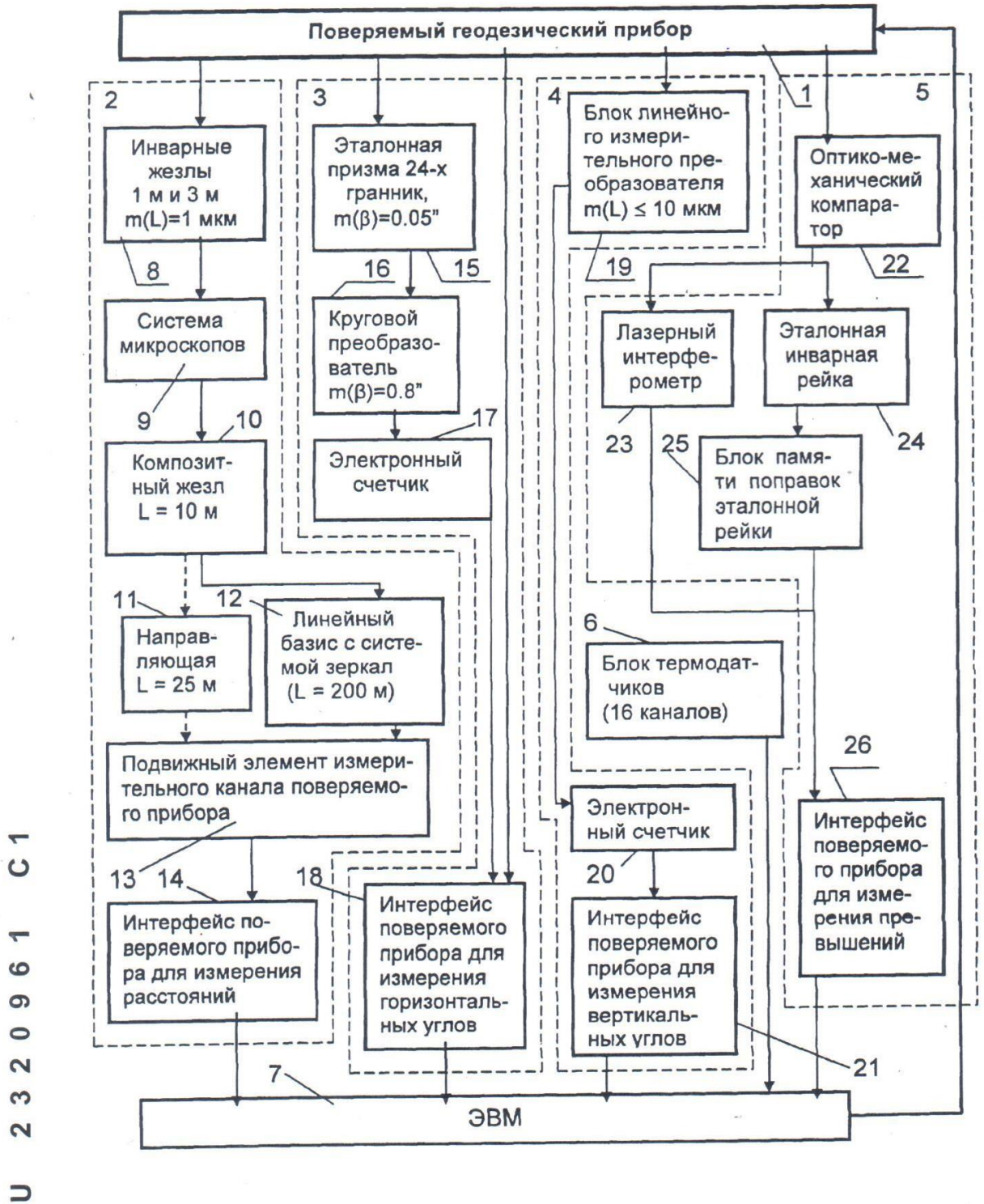


Рисунок 2.8 – Функциональная схема оптико-электронного комплекса

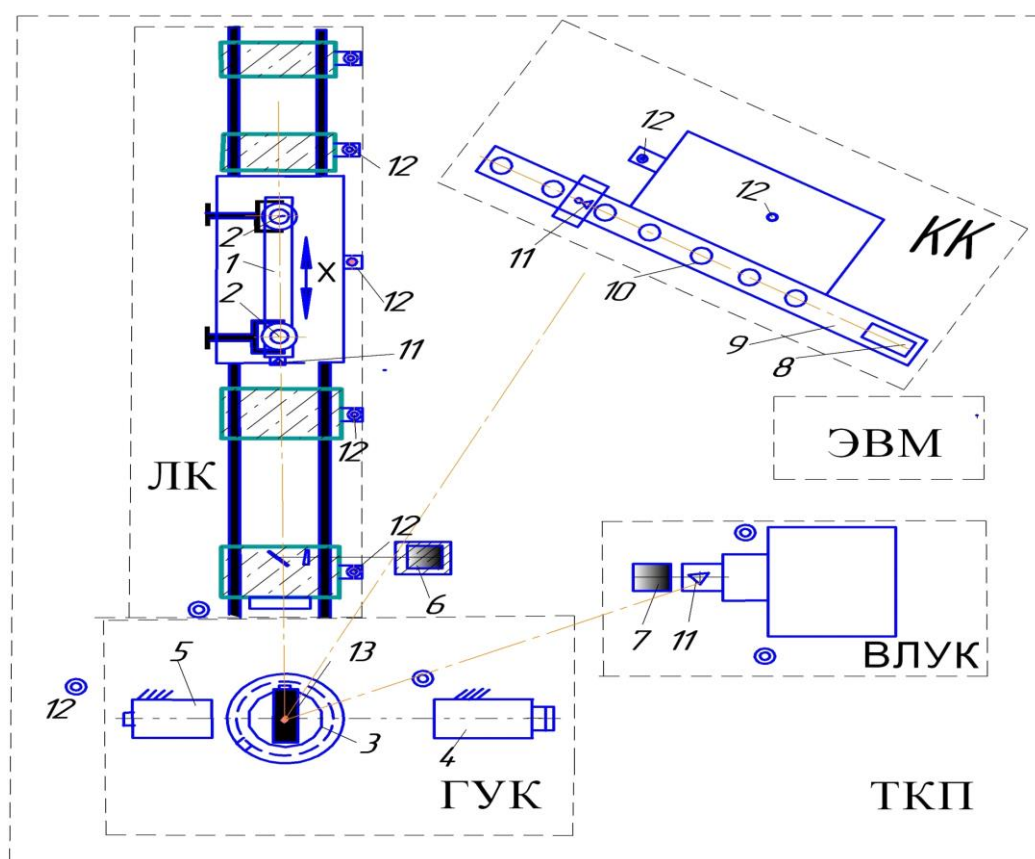


Рисунок 2.9 - Схема расположения компараторов 1D÷3D комплекса: ЛК – компаратор для линейных измерений, ГУК – горизонтальный компаратор для угловых измерений, ВЛУК – вертикальный компаратор для измерения вертикальных углов в заявленных диапазонах координат, выявления высокочастотной детерминированной ПИ вертикальных углов и исследований вертикальных размеров (превышений), КК – компаратор с лазерным интерферометром и композитным жезлом для выявления высокочастотной детерминированной ПИ горизонтальных углов, ТКП – термokonстантное помещение, 1 – эталонный инварный 3-х метровый жезл 1-го разряда, 2 – микроскопы, 3 – эталонная призма-многогранник 1-го разряда, 5 – автоколлиматоры, 6, 7 и 8 – эталонные лазерные интерферометры, 9 – композитный жезл, 10 – калиброванные отверстия композитного жезла, 11 – уголко-вые отражатели лазерных интерферометров, 12 – опорные марки-гнезда для установки отражателя исследуемого МКСИ 13

2. После калибровки длины компаратора выполняется следующая процедура:
- обнуляются показания лазерного интерферометра, и каретка быстро перемещается на 24 метра, калибруется лазерный интерферометр 6;
 - каретка с инварным жезлом устанавливается под первым, ближним к МКСИ микроскопом 2, при этом штрих микроскопа совпадает со штрихом жезла, считываются показания с МКСИ и лазерного интерферометра 6;
 - каретка последовательно перемещается на длину инварного жезла 1;
 - выполняются исследования МКСИ по инварному жезлу и лазерному интерферометру, при этом разность длин между жезлом и интерферометром при обработке результатов измерений исключается, как составляющая ПИ, вызванная рефракцией в среде.

В диссертационной работе в линейном компараторе (ЛК) разработана схема измерений (схема с общей оптикой и инварным жезлом), в которой оси исследуемого МКСИ, жезла и дополнительно введенного эталонного ЛИ 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 влияние рефракции из результатов измерений. Схема показана на рисунке 2.10. Математическая модель выявления погрешности измерений МКСИ в схеме с общей оптикой описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{МКСИ}} &= L_{\text{МКСИ}} - L_{\text{жезла}} - \Delta_{\text{рефр}} \\ \Delta_{\text{рефр}} &= L_{\text{инт}} - L_{\text{жезла}},\end{aligned}\tag{6}$$

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

Преимущества схемы с общей оптикой: возможность выявления короткопериодической ПИ, исключение рефракции, или ее выявление.

Для выявления детерминированной короткопериодической ПИ может быть использована как схема с общей оптикой, так и схема только с инварным жезлом,

у которого откалиброваны метровые интервалы.

В фазовых дальномерах, основанных на гетеродинном методе вычислений длины, основной источник ПИ расстояний связан с точностью определения

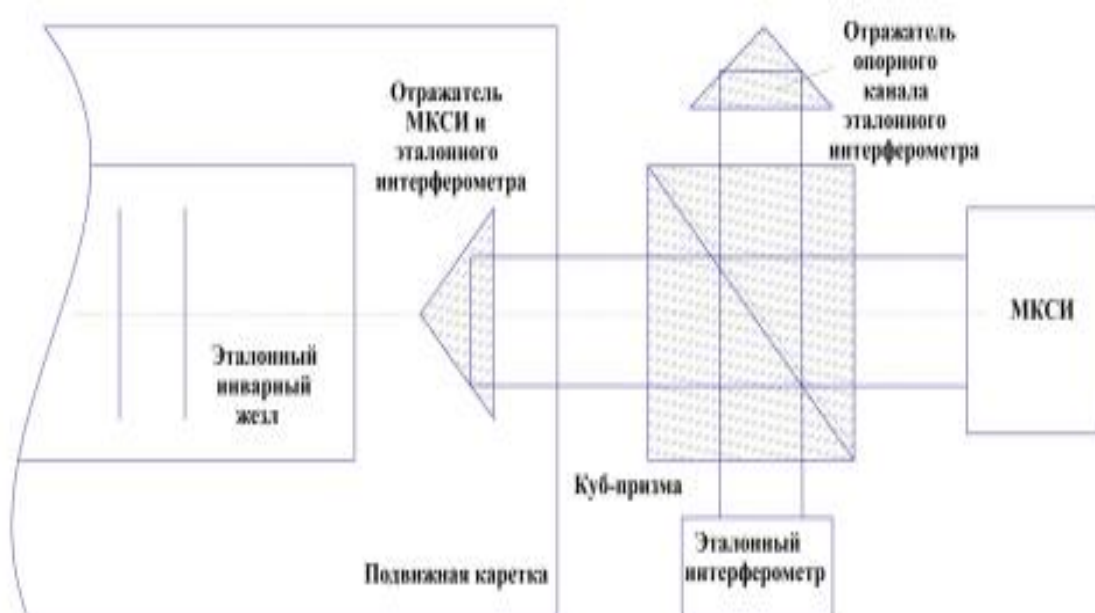


Рисунок 2.10 – Схема с общей оптикой и инварным жезлом

разности фаз опорной и измерительной длин волн. Современные фазовые дальномеры 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. Для выявления детерминированной короткопериодической ПИ может быть использована, как схема с общей оптикой, так и схема только с инварным жезлом, у которого откалиброваны метровые интервалы.

Разработанные модели и схемы измерений позволяют выявить практически все составляющие (систематические и случайные) суммарной ПИ дальномера, как в светодальномерном, так и интерференционном режимах измерений.

2.3.4 Метод исследований дальномеров в диапазоне длины до 48-ми метров

При создании пространственного компаратора принцип, описанный в разделе 2.2, был использован в дальнейшем и при измерениях на 24-х метровом компараторе в диапазоне измерений до 48 метров. Схема исследований МКСИ приведена на рисунке 2.11.

При равенстве расстояний лучей прямого и обратного хода от оси инварианного жезла математическая модель метода описывается выражением:

$$L_{48м} = 2 \cdot 8L_{\text{жезла}} \quad (X_{IM} = 2 \times X_{\text{инт}}), \quad (2.10)$$

Здесь $L_{\text{жезла}}$ – длина жезла, $X_{\text{инт}}$ – отсчет по интерферометру.

В диссертационной работе приведена разработанная схема с умножением расстояния до отражателя исследуемого МКСИ, при этом отражатель МКСИ предполагался неподвижно, а на каретке устанавливался уголкового отражатель.

Методика исследований дальномеров в диапазоне до 48-ми метров аналогична описанной выше методике измерений до 24-х метров.

2.3.5 Компаратор для исследований горизонтальных угловых измерительных систем МКСИ

Для передачи угловых размеров от исходных эталонов кроме описанных выше методов и средств известны отечественные методы и средства [90,169,170], где в качестве эталонов используются многогранные призмы.

Недостатками известных методов и средств измерений является то, что они требуют перестановки исследуемого МКСИ при контроле дальномерного и угловых (вертикальных и горизонтальных) преобразователей перемещений, ограниченное количество контролируемых точек в диапазоне измерения и, как следствие, невозможность выявления короткопериодических детерминированных ПИ, кроме того, в процессе измерений возникает необходимость установки МКСИ на место эталона, т.е. уход от прямого метода измерений. С целью устранения ука-

занных выше недостатков и повышения точности измерений в разработанной в диссертационной работе схеме исследований МКСИ установлена на поворотном столе эталонной установки соосно с призмой-многогранником 1 разряда и измерительным преобразователем, слежение за поворотом призмы осуществляется двумя автоколлиматорами, расположенными встречно за противоположными гранями призмы. При этом измерительная ось МКСИ может совпадать с осью ли-

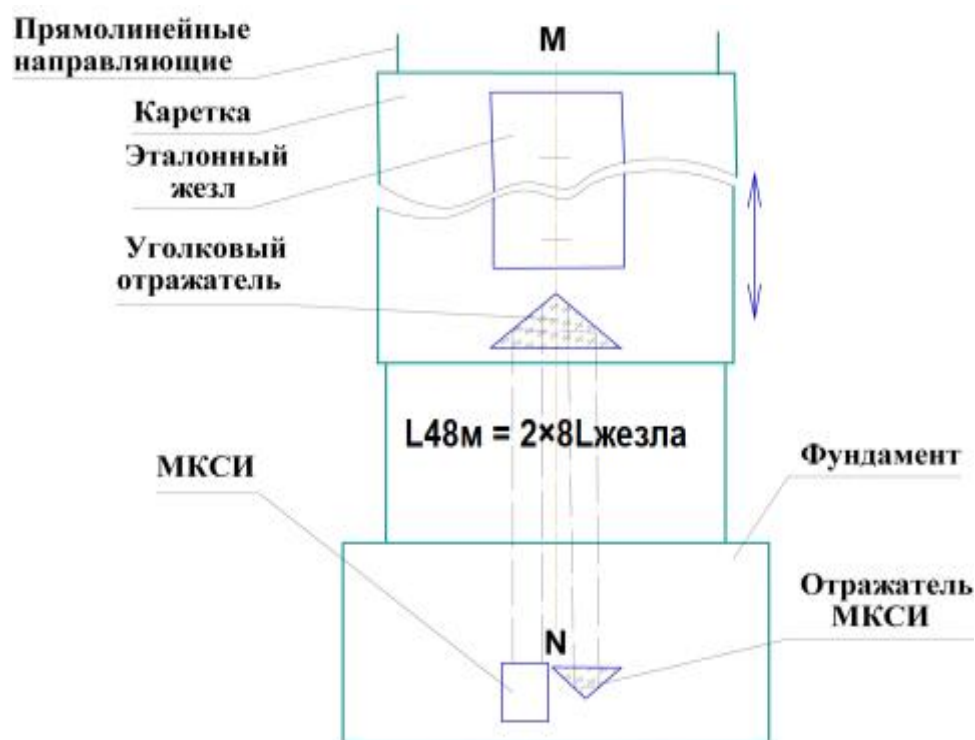


Рисунок 2.11 - Схема с удвоением измерений

нейного компаратора. Третий автоколлиматор отслеживает угол наклона призмы в вертикальной плоскости. Схемы разработанного горизонтального компаратора приведены на рисунках 2.12 и 2.13.

С целью устранения влияния эксцентриситета при определении ПИ горизонтальных углов МКСИ 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

границы измеряются координаты марок, после чего выполняется их приведение (поворот по углу β) в единую систему координат, совпадающую с измерениями по первой грани призмы (аффинные преобразования координат).

Разность между углами поворота горизонтальных углов β и соответствующими углами между гранями эталонной призмы свидетельствует о

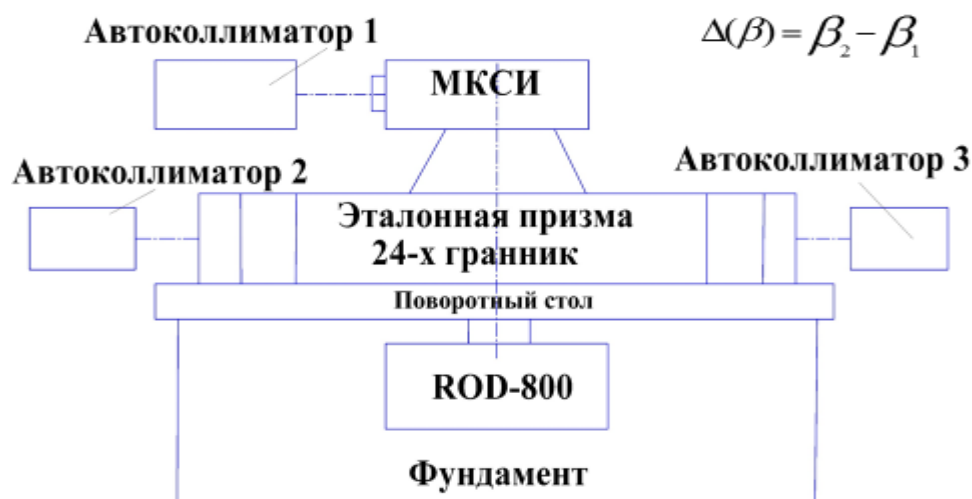


Рисунок 2.12 – Блок-схема горизонтального углового компаратора

погрешности угловой измерительной системы исследуемого МКСИ.

Схема поворота угла β в плоскости ХУ показана на рис. 2.14.

Вычисления выполняются по формулам:

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

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

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

$$z_i = (z'_i - z'_0) + z_0; L_i = ((x'_i - x_1)^2 + (y'_i - y_1)^2)^{1/2}; \quad (2.11)$$

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

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

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

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 2.14).

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.

В разработанной схеме для исключения эксцентриситета между осями призмы и исследуемого МКСИ используются опорные марки, горизонтальная и вертикальная проекции расположения опорных марок связаны с положениями перемещающегося на подвижной каретке инварного 3-х метрового жезла. С одной грани эталонной призмы 24-х гранника охватывается горизонтальный угол порядка $\beta=100^\circ$. Отличительными особенностями разработанной принципиальной схемы являются ее многофункциональность, как для линейных, так и угловых средств измерений, возможность выполнения калибровки с одной установки исследуемого МКСИ (т.е. с сохранением единой метрологической базы), возможность исследований на больших расстояниях, использование одного лазерного интерферометра для измерений по координатам X и Z, использование вспомогательного композитного жезла с большим количеством калиброванных отверстий, а также возможность исследований измерительных систем, основанных на разных физических принципах. В данной схеме имеется 28 равномерно расположенных в пределах горизонтального угла, равного 100° , марок, восемь из которых являются подвижными, расположены жестко в торце и на оси эталонного жезла, остальные марки являются неподвижными, расположены на изолированных фундаментах.

По высоте марки расположены в пределах $\pm 70^\circ$. На рисунках 2.15 и 2.16 показаны схемы горизонтальной и вертикальной проекций на плоскости прямоугольных координат. При первичной обработке использован известный метод

уравнивания замкнутых полигонов, отличием является то, что сначала по измеренным прямоугольным координатам вычисляются углы и длины полигонов, после контроля суммы углов замкнутого многоугольника и равномерного распределения допустимого отклонения суммы углов от теоретической измеренные длины

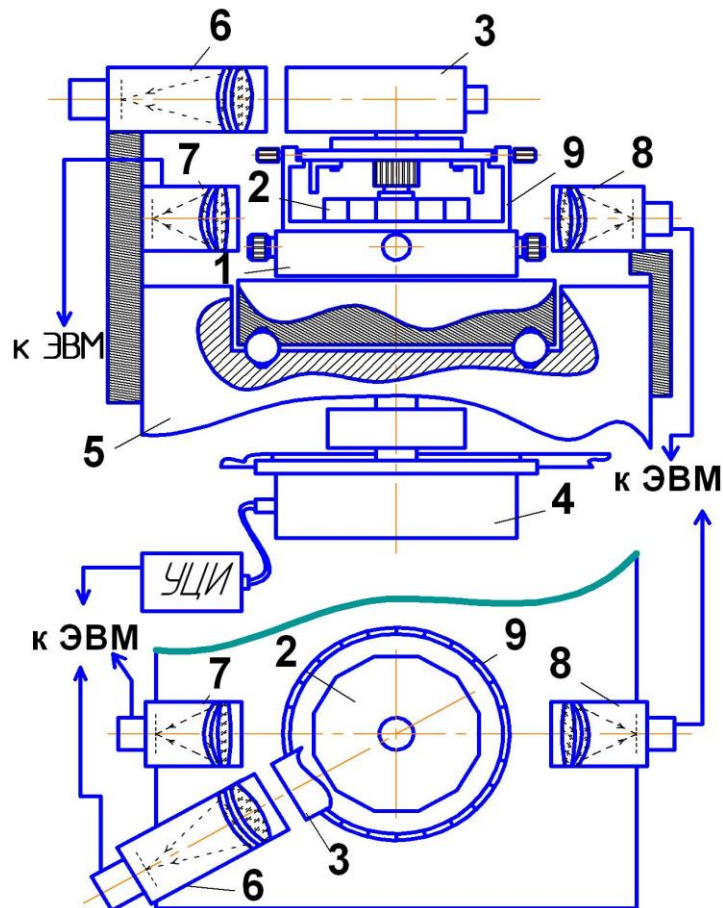


Рисунок 2.13 – Принципиальная схема горизонтального углового компаратора (ГУК): 1 – поворотный стол, 2 – эталонная призма-многогранник, 3 – исследуемое МКСИ, 4 – прецизионный измерительный преобразователь ROD-800, 5 – станина, 6 – длиннофокусный коллиматор, 7 и 8 – автоколлиматоры, 9 – оправа эталонной призмы

сторон заменяются на эталонные, вновь выполняется уравнивание и распределяются новые поправки, после чего вычисляются прямоугольные координаты XU и YZ . Длины между измеренными и скорректированными координатами всех точек,

расположенных на известном расстоянии от испытуемого МКСИ, сравниваются с допустимыми значениями.

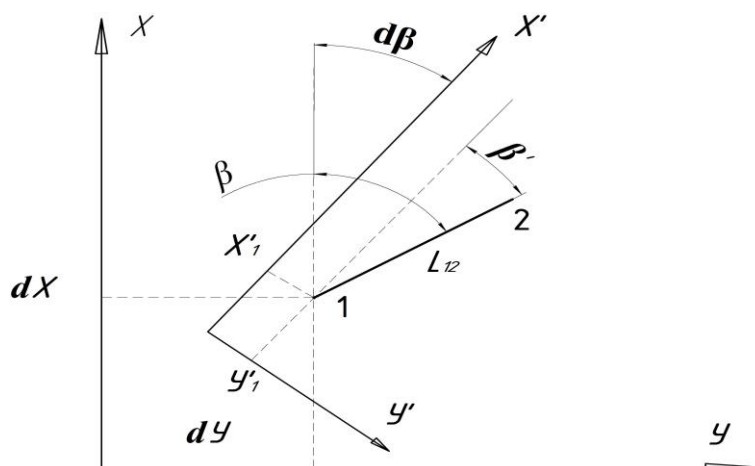


Рисунок 2.14 - Схема поворота системы координат в плоскости XY

Обработка результатов измерений выполняется в соответствии с разработанным алгоритмом. Алгоритм вычислений основан на уравнивании внутренних углов полигонов в каждом полуприеме измерений, после чего вместо вычисленных расстояний подставляются эталонные длины (длина жезла и реальные расстояния между марками) и вычисляются эталонные координаты опорных пунктов. Расстояния между одноименными измеренными и эталонными координатами служат контролем при определении линейной ПИ испытуемого МКСИ. ПИ горизонтальных углов вычисляется после приведения (доворота) результатов измерений по разным граням призмы-многогранника на линию, лежащую параллельно перемещающемуся эталонному жезлу, и сравнения угла доворота с соответствующим углом призмы.

В разработанной принципиальной схеме горизонтального углового компаратора (ГУК) для выявления ПИ горизонтальных угловых преобразователей перемещений МКСИ, показанной на рисунке 2.14 при исследованиях горизонтальных углов в диапазоне измерений $0 \div 360^\circ$ математическая модель имеет вид:

$$\Delta(\beta) = \beta_{\text{МКСИ}} - \beta_{\text{ЭТАЛ}} \quad (2.12)$$

Одна из основных проблем, возникающих при исследованиях горизонтальных углов МКСИ, состоит в исключении эксцентриситета вертикальных осей

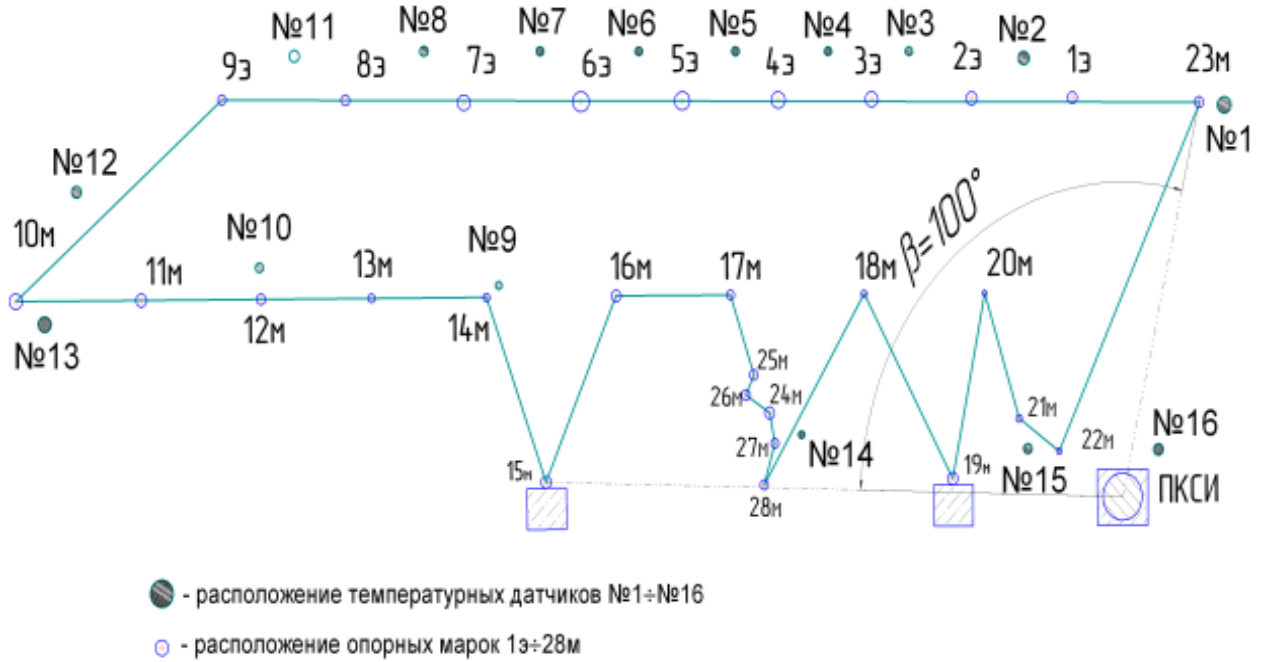


Рисунок 2.15 - Схема расположения марок-гнезд в горизонтальной плоскости

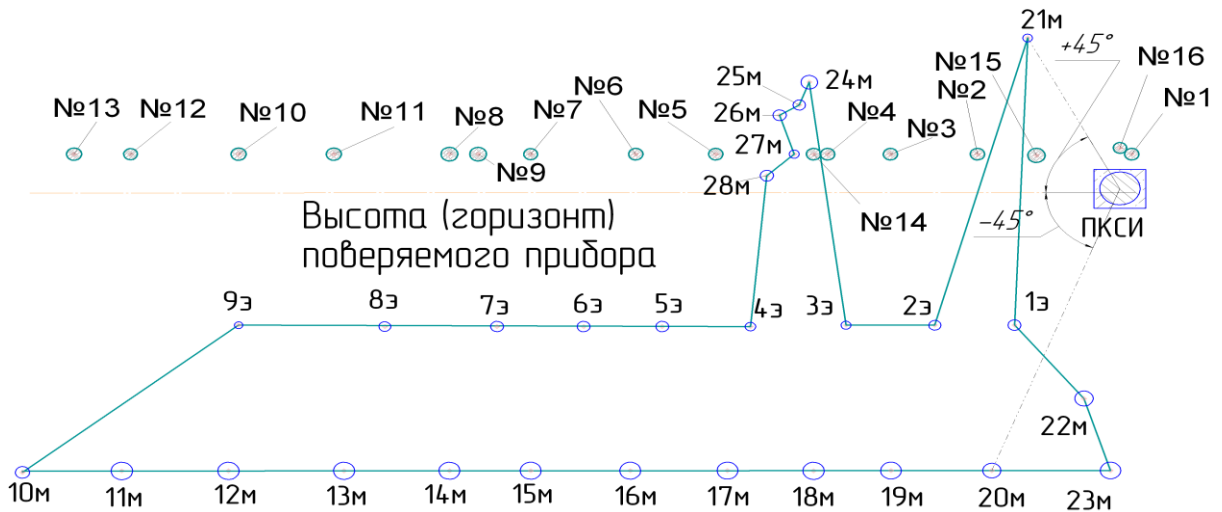


Рисунок 2.16 - Схема вертикальной проекции YZ замкнутого полигона

МКСИ и углового компаратора. В настоящее время известны методы аппроксимации погрешности измерений с помощью линейной регрессии и гармонического анализа с использованием преобразований Фурье. Кроме того, в данной работе

был разработан ранее неизвестный в метрологии алгоритм исключения эксцентриситета построением искусственной нейронной сети с гиперболическим тангенсом, позволивший выполнить более плавную интерполяцию и точную аппроксимацию полученных результатов измерений.

Для выявления короткопериодических ПИ по осям Y и Z может быть использован компаратор (рисунок 2.17). Здесь используется дополнительный лазерный интерферометр 24, который отслеживает перемещение кареток одновременно по двум осям Y и Z . При выявлении короткопериодических ПИ угловых измерительных систем привязка может быть осуществлена как в ранее заданной системе координат, так и в самостоятельно заданной (в зависимости от задачи исследования). Привязка осуществляется с помощью марок 12 и уголкового отражателя испытуемого МКСИ, установленного в магнитном 30 гнезде компаратора КП.

Начальное положение каретки 30 может быть выбрано произвольно, например, в правом нижнем углу. Преимуществом здесь является то, что при ПКИ по двум координатам используется один лазерный интерферометр 24. При перемещении каретки 53 влево с помощью винта 32 двигателем 36 изменяется координата Y , увеличивая длину измерительного канала лазерного интерферометра 24 по горизонтали, после останова каретки 53 подается команда на двигатель 37, который винтом 41 перемещает каретку 30 по оси Z , при этом увеличивается длина того же измерительного канала лазерного интерферометра, но только вдоль оси Z . Шаг перемещения кареток зависит от наперед заданной дискретности снятия отсчетов при выявлении короткопериодических ПИ вспомогательного МКСИ.

При измерениях по полигонам выполняются три полных приема в прямом и обратном направлении перемещения подвижной каретки с эталонным жезлом (п.1э÷9э) и отражателем ПКИ МКСИ, а также переносе отражателя по неподвижным маркам (п.10м÷28м).

Методика измерений и обработки результатов измерений основана на многократных измерениях координат пунктов замкнутых многоугольников (полигонов), построенных в соответствии с разработанной выше принципиальной схемой

расположения пунктов. При этом в горизонтальной плоскости каждая из проекций сетей на одной установке по эталонной призме, имеющей 24 грани охватывает угол, равный примерно 100 градусов, при ориентировании на разные грани призмы имеется возможность измерений в пределах 360 градусов с дискретностью установки 15 градусов. В вертикальной плоскости угол охвата составляет ± 60 градусов.

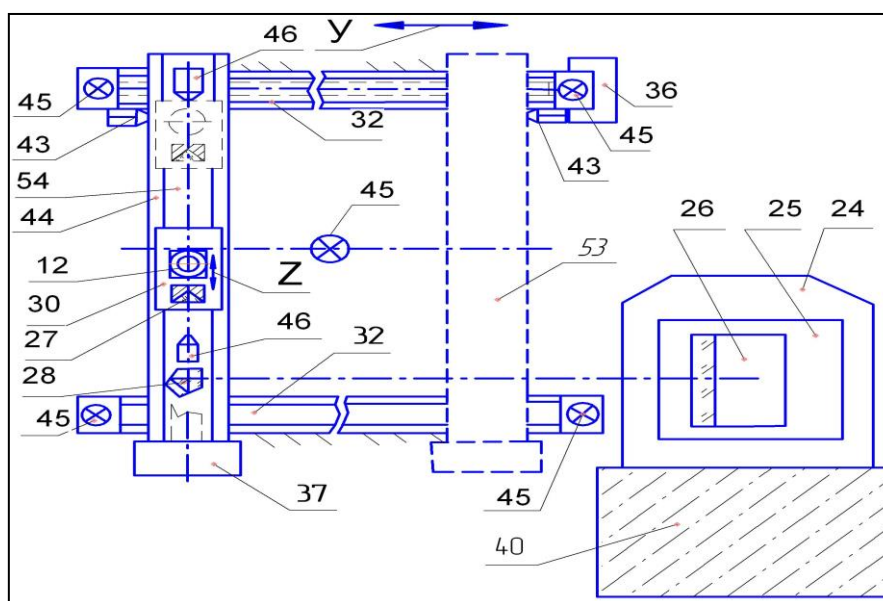


Рисунок 2.17 - Принципиальная схема компаратора

В полигонах по координатам UX и YZ из 28 проекций линий восемь имеют непосредственную привязку к длине эталонного 3-х метрового жезла, остальные длины линий вычислены по результатам многочисленных измерений в процессе поверки МКСИ разных модификаций.

При обработке ведомостей координат сначала записывают измеренные МКСИ соответствующие выбранной плоскости координаты (например, в горизонтальной плоскости XU), по ним вычисляют приращения координат ΔX и ΔU . По вычисленным ΔX и ΔU вычисляют длины линий L , дирекционные углы α и углы β между смежными сторонами. Сумма углов $\Sigma\beta$ замкнутого полигона должна равняться:

$$\Sigma\beta = 180^\circ(n-2), \quad (2.13)$$

где n – количество сторон замкнутого полигона, для разработанной проекции $n = 28$. Тогда теоретически $\Sigma\beta = 4680^\circ$, что является контролем вычислений. При отличии $\Sigma\beta$ за счет округлений или других ошибок от теоретического значения в пределах до $\Delta_{\text{пред}} = 0,3''$ разность делится на 28 одинаковых частей (так как длины сторон примерно одинаковы) и прибавляется с учетом знака к каждому из углов (допустимый угол $0,3''$ (зависит от точности прибора, вычислено, исходя из допустимого значения ПИ на коротком расстоянии отражателя от МКСИ, равном 3 метра, и допустимой ПИ координат для данного расстояния, равной 3 мкм). Если $\Delta_{\text{пред}} > 0,3''$, вычисления повторяют с большим количеством знаков после запятой, иначе измерения повторяются.

После подстановки в ведомость координат вычисленных значений углов β' , эталонных длин жезла $1\text{э} \div 9\text{э}$ и известных длин между марками $10\text{м} \div 28\text{м}$ снова вычисляются координаты полигона $X_i Y_i$.

Приращения длин между измеренными и перевычисленными координатами $X_i Y_i$ и XU на соответствующем расстоянии отражателя от испытуемого МКСИ служат окончательным контролем допустимой ПИ координат МКСИ.

Для обеспечения измерений в рабочем диапазоне углов 360° измерения выполняются при ориентировании МКСИ на разные грани призмы-многогранника, после чего выполняется преобразование координат с приведением их к первой грани призмы.

2.3.6 Компаратор для исследований вертикальных угловых измерительных систем МКСИ

Для выявления погрешности измерений вертикальных углов (координата Z) разработан вертикальный компаратор с лазерным интерферометром, принципиальная схема компаратора показана на рисунке 2.18. Здесь в качестве эталона пе-

ремещения каретки в вертикальной плоскости использован лазерный интерферометр. Угол в вертикальной плоскости вычисляется косвенно по теореме косинусов через измеренные исследованным МКСИ расстояния до отражателя и эталонное перемещение каретки с отражателями исследуемого МКСИ и ЛИ.

Математическая модель измерений выражается методом трилатерации из известных сторон треугольника по теореме косинусов:

$$\gamma = \arccos \frac{AB^2 + AC^2 - BC_i^2}{2 \cdot AB \cdot AC}, \quad (2.14)$$

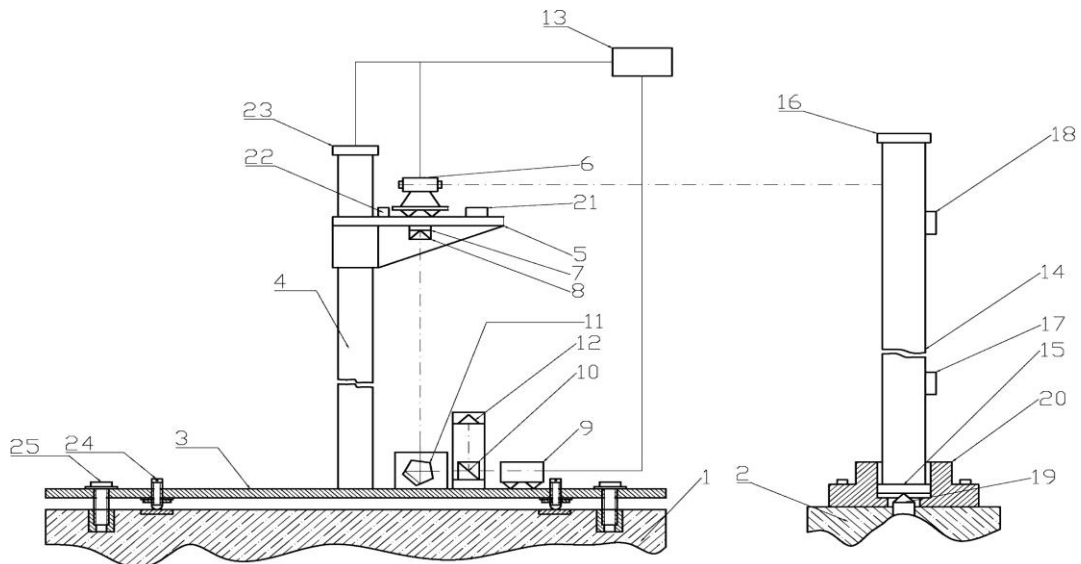


Рисунок 2.18 - Принципиальная схема вертикального компаратора для исследований вертикальных углов 3D координатных средств измерений и измерительных систем с цифровыми нивелирами: 1 и 2 – фундаменты, 3 - регулировочная плита, 4 – стойка с направляющей прямолинейной, 5 – перемещающаяся каретка с отражателем 21 (при исследованиях 3D МКСИ отражатель ставится на место нивелира 6) исследуемого МКСИ или цифрового нивелира 6, 7÷12 – эталонный лазерный интерферометр, 13 – система управления перемещением каретки 5, 16 – штрих-кодовая рейка ИСЦН

здесь: АВ и АС – расстояния, вычисленные по измеренным координатам наперед откалиброванным по длине 3D координатным средством измерений, ВС – расстояние, измеренное эталонным лазерным интерферометром.

Погрешность измерений вертикального угла вычисляется по формуле:

$$\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1, \quad (2.15)$$

здесь γ_1 – вертикальный угол, вычисленный по линейному перемещению лазерного интерферометра, γ_2 – вертикальный угол, вычисленный по координатам исследуемого МКСИ. Так как вертикальность компаратора проверяется по лазерному трекеру, то ее отклонение можно не учитывать в виду малости.

2.3.7 Алгоритмы вычислений при исследованиях МКСИ

Схема алгоритма обработки результатов приведена ниже на рисунке 2.19.

В соответствии с приведенным алгоритмом разработана программа на ЭВМ [152].

Алгоритм вычислений предполагает контроль линейной и угловых (вертикальных и горизонтальных) ПИ исследуемого МКСИ. С этой целью измеренные многократно с ориентацией на разные грани эталонной призмы координаты замкнутого полигона перевычисляются после замены измеренных расстояний между опорными пунктами на эталонные расстояния (в т.ч. на длину эталонного инварного жезла 1 разряда. После сравнения координат пунктов, измеренных и скорректированных, определяется линейная ПИ.

Приведение систем координат, полученных при измерениях с ориентацией на разные грани призмы, дает возможность оценить ПИ горизонтальных углов путем сравнения углов призмы по сертификату ее калибровки с углами доворота систем измеренных координат. Приведение систем координат осуществляется на длинную линию m11m18, которая построена параллельной направлению перемещения инварного жезла.

2.3.8 Оценка точности результатов измерений

Известно [13], что повышение точности измерительных преобразователей перемещений возможно двумя путями:

- 1) на основе методов предотвращения возникновения ПИ: конструктивно-технологических и защитно-предохранительных;
- 2) на основе методов снижения уровня существующих погрешностей: коррекции и статистической минимизации ПИ.

Первый путь реализуется при проектировании и изготовлении МКСИ предприятием-изготовителем.

Пользователем, при практическом применении измерительных систем, повышение точности измерений возможно только при реализации методов коррекции и статистической минимизации ПИ.

Коррекция, или функциональная минимизация, ПИ измерительных систем заключается в снижении их уровня после экспериментального выявления ПИ (в процессе исследований с помощью эталонного СИ) и введения поправки в результат измерений. Метод коррекции применяется для уменьшения детерминированной ПИ.

В разработанном угловом горизонтальном компараторе параллельно применяются два эталонных СИ: в качестве первого используется 24-гранная призма с ПИ не более $(0,05 \div 0,1)$ угл. сек, в качестве второго используется преобразователь фирмы «Хайденхайн» ROD-800 с ПИ не более $\Delta_{\text{и}} = 0,43$ угл.сек.

Весь диапазон 360 угл. град. с помощью призмы разбивается на ряд поддиапазонов $n = 360/N$, где $N=24$ – число граней. С помощью призмы определяется ПИ ROD-800 в 24-х точках, которая в виде поправки X_{0i} вводится в память компьютера и ее значения учитываются в процессе обработки результатов измерений.

Применение ROD-800 с интерполятором позволяет уменьшить шаг квантования до 1 угл. сек и при этом автоматизировать процесс измерения.

В этом случае требуется коэффициент интерполяции $K_{ин} = \frac{T_x}{h_x} = 36$,

где T_x – период растрового сопряжения, h_x – шаг квантования [130]. С помощью

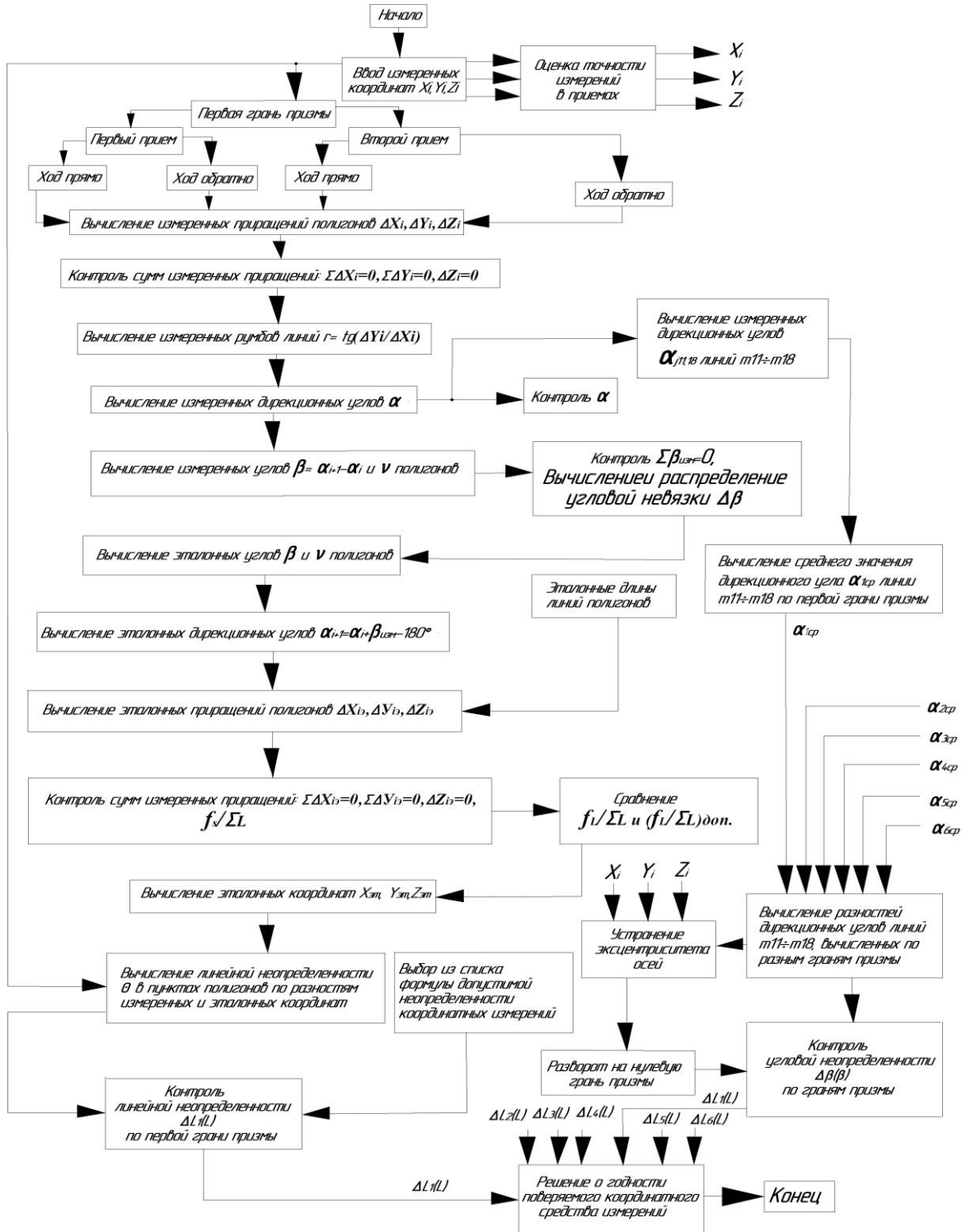


Рисунок 2.19 - Блок-схема алгоритма измерений и вычислений

квадратурной логики шаг квантования уменьшается в четыре раза, а с помощью дополнительного штатного интерполятора уменьшается еще в девять раз. Таким образом, при количестве штрихов растрового сопряжения $N = 36000$ период растрового сопряжения $T_x = \frac{360^\circ}{N} = 36''$, а шаг квантования $h_x = \frac{T_x}{K_{ин}} = 1''$.

Результирующая ПИ при применении ROD-800 с интерполятором в статическом режиме не превысит значения, равного

$$\Delta_{PEЗ} = 3\sqrt{\sigma_{ROD}^2 + \sigma_{ин}^2 + \sigma_{KB}^2 + \sigma_{доп}^2}, \quad (2.16)$$

Здесь $\sigma_{ROD} = \frac{\Delta_{ROD}}{3}$ – среднее квадратическое значение (СКЗ) инструментальной погрешности ROD-800 при доверительной вероятности $P = 0,997$,

$$\sigma_{ин} = \frac{\Delta_{ин}}{3} \text{ – СКЗ погрешности интерполятора,}$$

$$\sigma_{KB} = \frac{h_x}{2\sqrt{3}} \text{ – СКЗ погрешности квантования,}$$

$$\sigma_{доп} = \frac{\Delta_{доп}}{3} \approx \frac{0,5}{3} \text{ – СКЗ суммы дополнительных неучтенных погрешностей.}$$

Известно [2], что $\sigma_{ин} = \frac{\Delta_{ин}}{3} \leq 0,1h_x$, откуда $\sigma_{ин} \leq \frac{h_x}{30}$.

Тогда, без коррекции результирующая ПИ равна:

$$\Delta_{PEЗ} = 3\sqrt{\left(\frac{0,43''}{3}\right)^2 + \left(\frac{1''}{30}\right)^2 + \left(\frac{1''}{3,46}\right)^2 + \left(\frac{0,5''}{3}\right)^2} = 1,1''$$

А с учетом коррекции на ЭВМ путем введения поправки за компарирование ROD-800 результирующая ПИ равна $\Delta_{PEЗ} = 0,97''$.

2.4 Метод повышения точности наведения визирной оси МКСИ на отражатель с использованием преобразователя перемещений на основе координатно-чувствительного приемника излучения

Одной из составляющих погрешности измерений углов является погрешность, связанная с ориентированием МКСИ на его отражатель. Для уменьшения ее в диссертационной работе ориентирование осуществлялось визированием на координатно-чувствительный приемник излучения.

Разработанный метод основан на определении пространственного положения энергетического центра пучка лазерного излучения при помощи преобразователя перемещений на основе координатно-чувствительного приемника излучения (разрезного фотодиода). Координатный приемник излучения при соответствующей обработке сигналов одновременно выполняет две функции – приемника излучения и анализатора изображения. Источником излучения в таком устройстве является полупроводниковый лазер, установленный внутри большинства современных средств измерений и предназначенный для наведения на объект.

В качестве приёмника излучения используется четырёхквadrантный фотодиод, сигнал на выходе которого зависит от координат облучаемого участка чувствительной площадки. Конструктивно, к каждой чувствительной площадке подведены токосъёмные контакты (рисунок 2.20), с помощью которых разрезной фотодиод подключается к предварительным усилителям.

Выходные токи (рисунок 2.21) от площадок разрезного фотодиода (VD1÷VD4) преобразуются с помощью предварительных усилителей A1÷A4 в соответствующие напряжения $U_1÷U_4$, которые могут быть измерены, например, при помощи цифровых вольтметров.

Если на VD1÷VD4 попадает световая марка с равномерной освещённостью E_0 , то выходные сигналы $U_1÷U_4$ операционных усилителей A1÷A4 будут зависеть от выходных токов фотодиодов, т.е.:

$$U_1 = -I_1 \cdot R_{o.c.}; \quad U_2 = -I_2 \cdot R_{o.c.} \quad (2.17)$$

$$U_3 = -I_3 * R_{o.c.}; \quad U_4 = -I_4 * R_{o.c.} \quad (2.18)$$

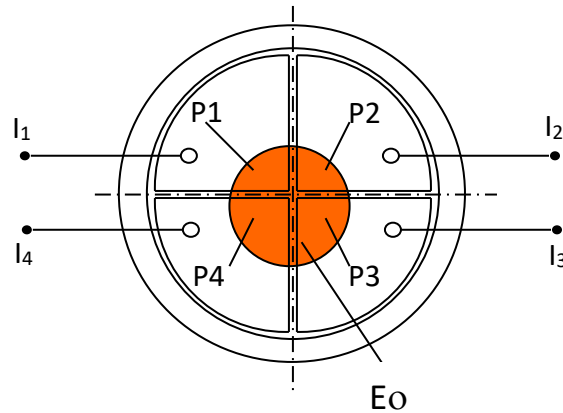


Рисунок 2.20 - Положение световой марки на чувствительных площадках четырехквadrантного фотодиода

Знак “ – “ определяется инвертирующим включением усилителей А1÷А4. Токи фотодиодов VD1÷VD4 зависят от освещённости E_o , их интегральной чувствительности S_i (полагаем, что $S_{i(VD1)} = S_{i(VD2)} = S_{i(VD3)} = S_{i(VD4)} = S_i$) и частей P1, P2, P3, и P4 площади светового пятна, разделённого прорезью, как:

$$I_1 = S_i * E_o * P1; \quad I_2 = S_i * E_o * P2 \quad (2.19)$$

$$I_3 = S_i * E_o * P3; \quad I_4 = S_i * E_o * P4 \quad (2.20)$$

При этом сигналы А1÷А4 можно определить как:

$$U_1 = -S_i * E_o * R_{o.c.} * P1; \quad U_2 = -S_i * E_o * R_{o.c.} * P2 \quad (2.21)$$

$$U_3 = -S_i * E_o * R_{o.c.} * P3; \quad U_4 = -S_i * E_o * R_{o.c.} * P4 \quad (2.22)$$

Для преобразователя перемещений на основе разрезного фотодиода применяют понятие статической характеристики преобразования, её крутизны, дрейфа нуля и т. д. Для определения перемещения световой марки по оси X необходимо найти:

$$\Delta U_x = f(x) = (U_1 + U_4) - (U_2 + U_3) = -S_i * E_o * R_{o.c.} * (P1 + P4 - P2 - P3) \quad (2.23)$$

Для перемещения световой марки по оси Y статическая характеристика преобразования будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta U_y = f(y) = (U_1 + U_2) - (U_3 + U_4) = -S_i * E_o * R_{o.c.} * (P_1 + P_2 - P_3 - P_4) \quad (2.24)$$

Как видно из этих выражений, крутизна статической характеристики преобразования будет зависеть от произведения $S_i * E_o * R_{o.c.}$, которое может изменяться, например, из-за нестабильности излучения лазера (изменение E_o), старения или нагрева элементов (изменение S_i и $R_{o.c.}$). В преобразователе перемещений на основе разрезного фотодиода изменение крутизны статической характеристики преобразования приводит к мультипликативной НИ, а дрейф нуля – к аддитивной ПИ.

На рисунке 2.22 приведена принципиальная схема преобразующего тракта на операционных усилителях, реализующая рассмотренные алгоритмы.

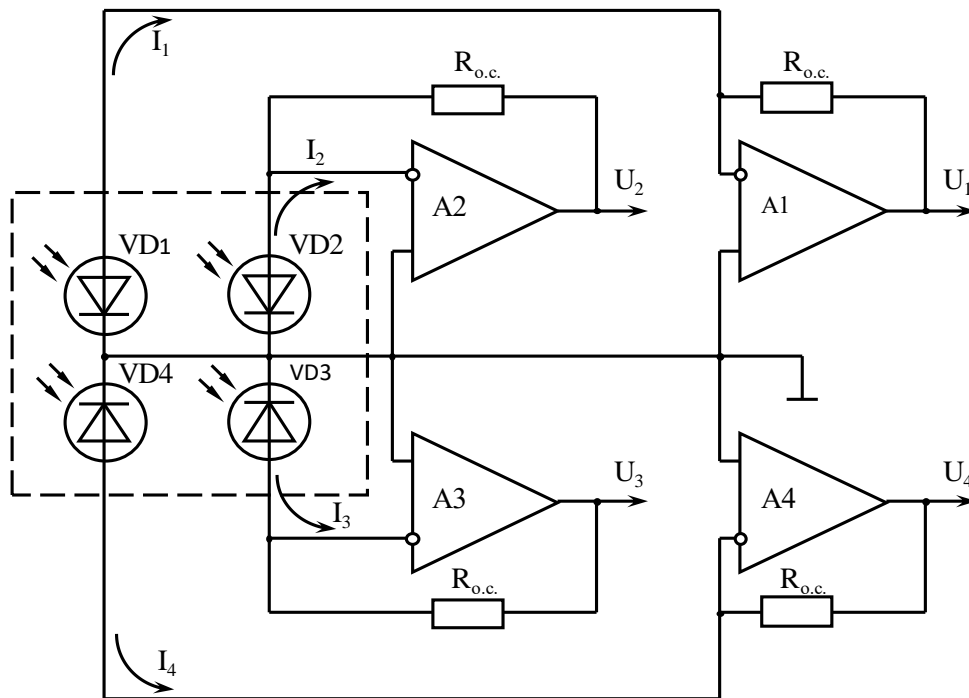


Рисунок 2.21 - Схема фотоприемного устройства с четырехквadrантным фотодиодом

Рассмотренные выше алгоритмы преобразования сигналов можно применить в преобразователе перемещений (положения световой марки), выполненном на основе компенсационного метода. В этом случае отсчёт по эталонным СИ компаратора снимается после механической компенсации измеряемого

перемещения, т. е. когда рабочая точка преобразователя находится в нуле статической характеристики преобразования, одновременно по оси X и оси Y.

При этом, на основе разрезного фотодиода реализуется преобразователь положения энергетического «центра тяжести» световой марки.

Предварительное наведение осуществляется по положению луча на экране двухлучевого осциллографа С1-83 при изображении функциональных зависимостей между двумя сигналами в режиме X-Y, один канал которого подключён к выходу «ΔX» преобразующего тракта на операционных усилителях, а другой – к выходу «ΔY». В данном случае имеется возможность ступенчатого изменения

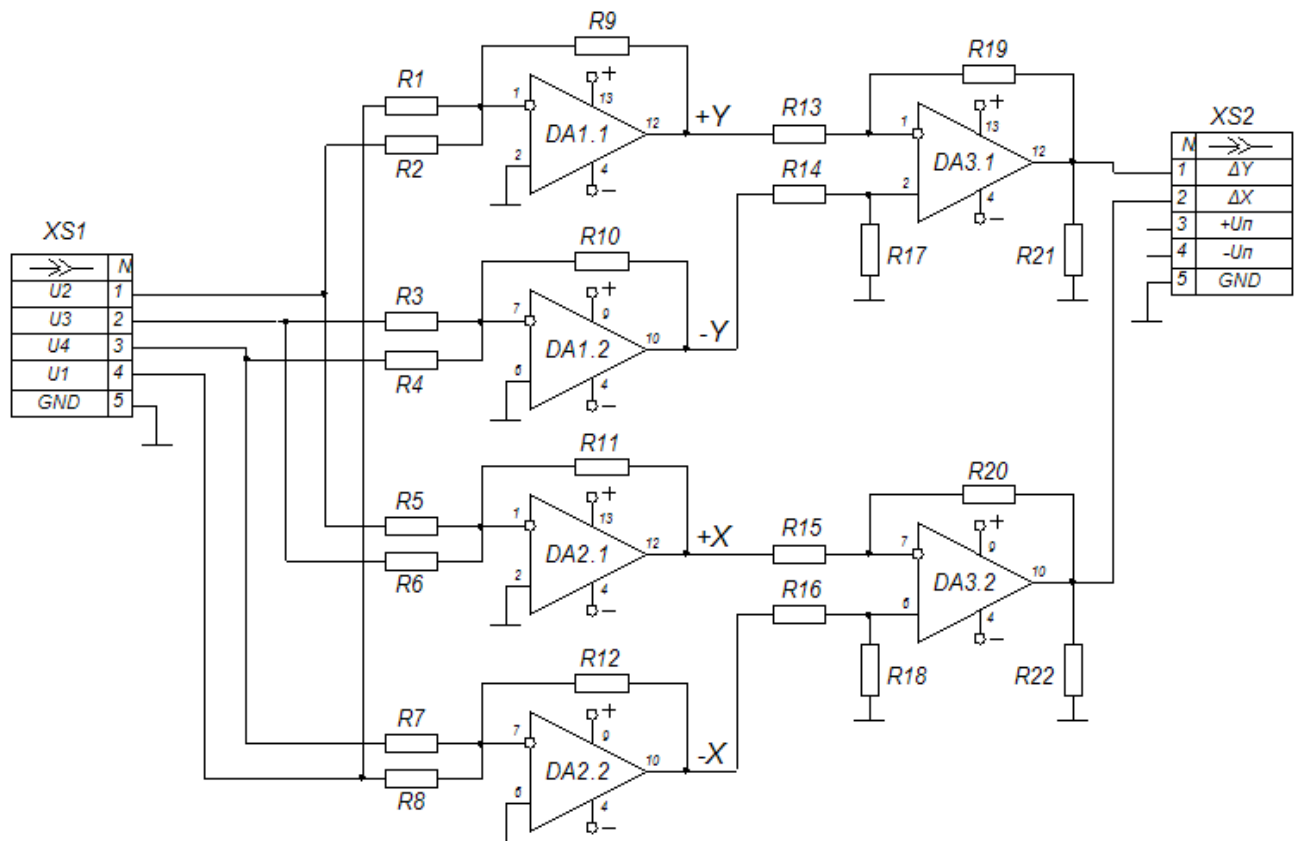


Рисунок 2.22 - Схема усилительно-преобразующего тракта

коэффициента усиления по каждому из каналов. При равенстве коэффициентов преобразования каналов, задача наведения визирной оси МКСИ на отражатель, в данном случае, заключается в перемещении световой марки в центр чувствитель-

ных площадок четырехквadrантного фотодиода, то есть перемещения луча в центр экрана осциллографа.

При измерении перемещений « ΔX » и « ΔY » в пределах диаметра световой марки для устранения влияния мультипликативной погрешности требуется применение логометрического метода. При этом алгоритм преобразования сигналов следующий:

$$\begin{aligned} Z_x &= (U_1 + U_4) - (U_2 + U_3) / (U_1 + U_4) + (U_2 + U_3) = \\ &= [S_i * E_o * R_{o.c.} * (P_1 + P_4 - P_2 - P_3)] / [S_i * E_o * R_{o.c.} * (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)] = \\ &= (P_1 + P_4 - P_2 - P_3) / (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} Z_y &= (U_1 + U_2) - (U_3 + U_4) / (U_1 + U_2) + (U_3 + U_4) = \\ &= [S_i * E_o * R_{o.c.} * (P_1 + P_2 - P_3 - P_4)] / [S_i * E_o * R_{o.c.} * (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)] = \\ &= (P_1 + P_2 - P_3 - P_4) / (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Как видно из полученных выражений для идеальных условий (при которых интегральная чувствительность всех площадок приемника равна и равномерна по всей площади, $E_o = \text{const}$, $R_{o.c.} = \text{const}$) при реализации логометрического метода устраняется влияние произведения $S_i * E_o * R_{o.c.}$.

Статическая характеристика в этом случае имеет вид, показанный на рисунке 2.23.

Аппаратный способ характеризуется относительно низкой точностью (примерно 3÷5% от диапазона работы), но высоким быстродействием (доли мксек) и простотой схемы.

Для нахождения Z может быть применён либо аппаратный, либо программный способ обработки информации.

При программном способе обработки, сигналы $U_1 \div U_4$ должны быть преобразованы в код с помощью аналого-цифровых преобразователей за тем, чтобы ввести их в компьютер, который и вычисляет Z .

Программный способ (Рисунок 2.24) характеризуется высокой точностью

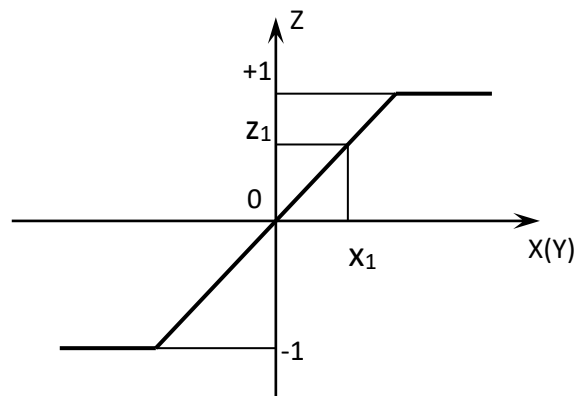


Рисунок 2.23 - Статическая характеристика преобразования с учетом применения логометрического метода повышения точности

при сравнительно низком быстродействии. В этом случае выходные сигналы $U_1 \div U_4$ фотоприёмного устройства подаются на входы аналогового коммутатора АК, который по команде микропроцессорного комплекта МК подключает их поочередно к входу АЦП. После аналого-цифрового преобразования АЦП

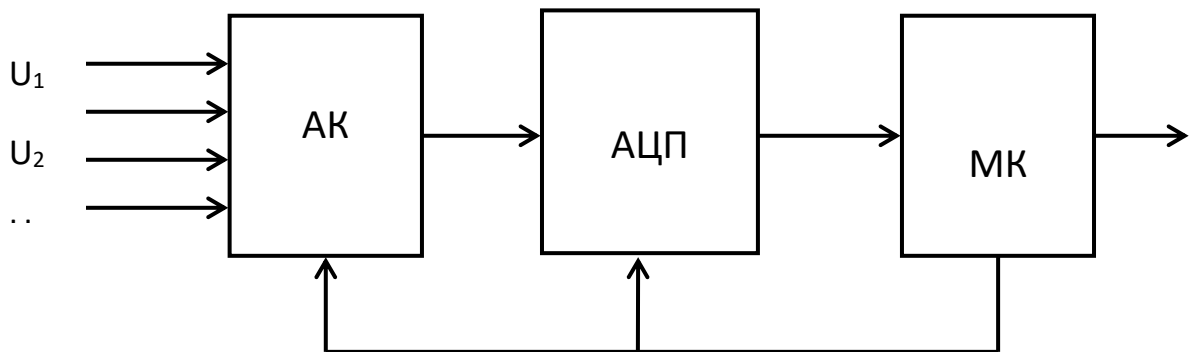


Рисунок 2.24 - Структурная схема соединений звеньев усилительно-преобразующего тракта при программной реализации логометрического метода

сигналы записываются в соответствующие ячейки памяти МК. Их значения затем используются для расчета Z_x и Z_y по приведенным выше алгоритмам.

Для экспериментальных исследований в диссертационной работе для контроля смещения лазерного пучка от исследуемого МКСИ использовалась схема

преобразователя с разрезным фотодиодом ФДК-142, установленным на каретке линейной измерительной системы LID-300. Измерение смещения выполнялось в диапазоне ± 2 мм. В этом случае относительная погрешность преобразования перемещения пучка не превысит $\Delta = \Delta x/x \cdot 100 \% = 1 \%$. При этом абсолютная погрешность определения центра пучка равна $\Delta x = x \cdot \Delta / 100 \% = \pm 2 \text{ мм} \cdot 1 \% / 100 \% = \pm 0,02 \text{ мм}$. При удалении фотодиода от МКСИ на расстоянии, равном 10-ти метрам погрешность ориентирования на фотодиод составила $\Delta\beta = 0,4$ угл. сек., при расстоянии до МКСИ, равном 24 метра, ПИ не превысит 0,1 угл. сек. [26-28,32].

В рассмотренном случае линейное перемещение пучка лазера, установленного на объекте равнялось линейному перемещению пятна относительно центра разрезного фотодиода.

2.5 Метод исследований дальномерных измерительных систем с помощью композитного жезла

Одной из основных составляющих суммарной ПИ современных светодальномеров, используемых в координатных средствах измерений, является высокочастотная детерминированная ПИ, которая связана со старением элементной базы оптико-электронного СИ. Разработанная в данной работе методика измерений предполагает выполнение измерений на разных участках измерительного плеча в диапазоне до 150 метров. Измерения выполняются с использованием в качестве эталона композитного жезла с калиброванными отверстиями и согласования с ними отражателя измерительного канала МКСИ, при этом направление перемещения отражателя совпадает с осью композитного жезла.

Методика предполагает выполнение следующих действий:

- 1) калибровку лазерного интерферометра по 3-х метровому инварному жезлу 1 разряда;
- 2) калибровку расположения отверстий метровых звеньев 10-ти метрового композитного жезла;

- 3) установку 10-ти метрового композитного жезла в направляющую с диапазоном перемещения жезла в пределах до 25-ти метров;
- 4) юстировку с помощью соответствующих интерференционных зеркал измерительного канала исследуемого МКСИ соосно с осью композитного жезла;
- 5) перемещение отражателя поверяемого жезла по калиброванным отверстиям композитного жезла;
- 6) сравнение полученных результатов исследуемым МКСИ с длиной интервалов композитного жезла.

Измерения выполняются в разных интервалах расстояний (например, $1 \div 21$ м, $40 \div 50$ м, $140 \div 150$ м). Техническая реализация разработанного компаратора показан на рисунках 4.3 и 4.4.

При измерениях ось исследуемого МКСИ выставляется так, чтобы при перемещении подвижной каретки с инварным жезлом вдоль оси Y отсутствовали приращения координат по осям X и Z .

2.6 Методы обработки результатов измерений

При обработке результатов измерений погрешности в метрологии часто используют метод аппроксимации погрешности измерений линией регрессии, полученной по методу наименьших квадратов. При исследованиях современных МКСИ на разработанном угловом горизонтальном компараторе этот метод может быть использован, например, в стандартной программе Excel подбором линии тренда, если полученная ПИ находится в допуске и при этом не требуется дополнительных исследований по выявлению источников ПИ.

Так как практически сложно установить МКСИ на поворотном столе с призмой, без эксцентриситета осей, и эта методическая составляющая ПИ будет отнесена в итоге к погрешности МКСИ, что недопустимо. Поэтому в данной работе для анализа результатов измерений кроме описанного выше метода аффинных преобразований, позволяющего исключить влияние эксцентриситета установки

МКСИ, разработаны алгоритмы обработки результатов измерений с использованием дискретного преобразования Фурье (позволяет проанализировать весь спектр гармонических составляющих ПИ) и построением искусственной нейросети (ИНС – позволяет исключить грубые ошибки из результатов измерений и сгладить аппроксимирующую кривую ПИ для дальнейшего использования при расчете координат измеряемых точек) [39]. На рисунке 2.25 приведен алгоритм измерений, в соответствии с которым метролог выбирает способ обработки результатов измерений (дискретное преобразование Фурье или ИНС).

2.6.1 Метод обработки результатов исследований с использованием дискретного преобразования Фурье

В работе исследован метод оценки и устранения влияния методической погрешности, вызванной эксцентриситетом установки электронного тахеометра (ЭТ) на компараторе при исследованиях его горизонтальной угловой измерительной системы (ИС). Метод основан на введении поправки в результат измерений, определенной с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) периодической функции погрешности преобразователя. Поправка, состоящая из суммы постоянной составляющей и 1-й гармоники функции погрешности ИС, вычитается из результата измерений [20].

На рисунке 2.25 показан состав стенда для исследования точности МКСИ, алгоритм предварительной подготовки и выбора методики выявления систематической и случайной ПИ по результатам измерений.

В качестве примера в работе использованы результаты исследований электронного тахеометра в пределах полного оборота.

При измерениях использовался компаратор в составе поворотного стола, с установленной на нем 24-гранной эталонной призмой 1-го разряда, автоколлиматора АК-0,2 и коллиматора от оптической скамьи ОСК-2 с фокусным расстоянием

1600 мм. Исследуемый ЭТ устанавливался на поворотном столе над многогранной призмой и его корпус был на ней соответственно закреплен. После ориентирования по АК-0,2 призмы на ее первую грань оптическая ось зрительной трубы совмещалась с оптической осью коллиматора (нулевое положение).



Рисунок 2.25 – Алгоритм измерений

Снимался отсчет с ЭТ и угла призмы (с учетом поправки из ее аттестата). В результате определялась погрешность измерения угла ЭТ, в которой присутствовала методическая составляющая погрешности из-за эксцентриситета установки ЭТ на компараторе, не относящаяся к ЭТ, для каждой грани 24-гранной призмы $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2 \dots \Delta\beta_N$, то есть дискретная функция $\Delta\beta(k)$, где $k = 1, 2, 3 \dots N$ – порядковый номер грани, $N=24$ – общее четное количество граней. Погрешность измерения определялась как $\Delta\beta(k) = \beta_{knp} - \beta_{kэм}$, где β_{knp} – показания ИС ЭТ для k -й грани призмы, $\beta_{kэм}$ – угол для k -й грани призмы из ее аттестата. Результаты вычислений приведены на рис.2.26.

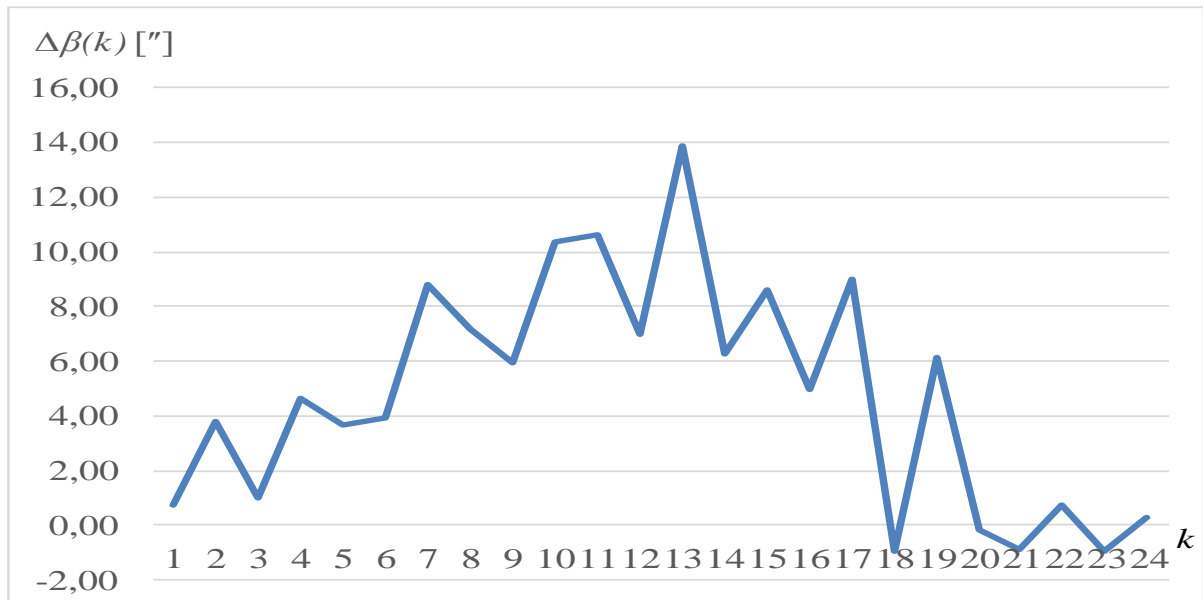


Рисунок 2.26 – Значения погрешности исследуемого ЭТ при задании углов эталонной многогранной призмой с числом граней $N = 24$

При дискретном преобразовании Фурье погрешность измерений имеет вид:

$$\Delta\beta(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{n=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (2.26)$$

при этом коэффициенты ряда Фурье определяются формулами:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\beta(k), \quad a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N a_{nk}, \quad b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N b_{nk}, \quad (2.27)$$

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

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 (2.26) 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:

$$\Delta\beta_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{n=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (2.28)$$

Скорректированные значения погрешностей измерений для углов, определяемых гранями призмы, при введении поправок, в соответствии с (2.28), будут, соответственно, равны:

$$\Delta\beta(k)_{ск} = \Delta\beta(k) - \Delta\beta_k ["]. \quad (2.29)$$

Скорректированные значения погрешности измерений исследуемой ИС ЭТ при задании углов эталонной многогранной призмой с числом граней $N = 24$ при введении поправок с учетом рассчитанных значений постоянной составляющей $\frac{a_0}{2}, a_{nk}, b_{nk}, a_n, b_n$ для 1-ой гармоники ($n=1$) приведены на рисунке 2.27.

Приведенные на рисунке 2.27 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.

2.6.2 Метод обработки результатов измерений с использованием искусственной нейронной сети

Кроме того, для аттестации горизонтального углового компаратора был разработан алгоритм с использованием искусственной нейросети (ИНС), позволяющий выбрать метод обработки результатов измерений (рисунок 2.28, исключить систематическую составляющую погрешности компаратора, выявить случайную погрешность измерений (СПИ) и более плавно интерполировать и аппроксимировать ПИ МКСИ. Методика обработки результатов измерений состоит из четырех этапов (см. рисунок 2.29).

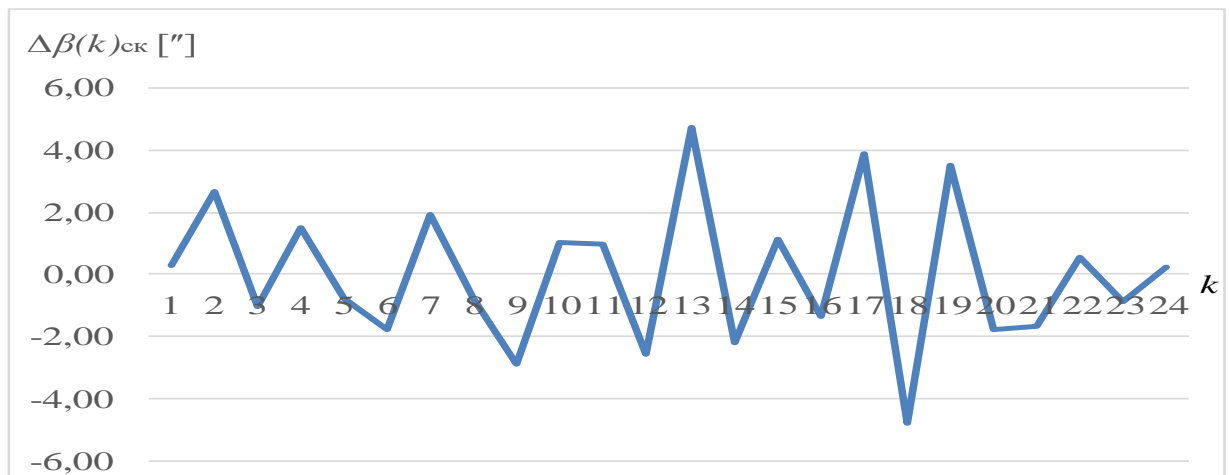


Рисунок 2.27 – Скорректированные значения погрешности исследуемой измерительной системы электронного тахеометра

Процедура оптимизации выполнялась с применением настройки Excel-Поиск решения. Разработанный алгоритм вычислений можно представить в виде блок-схемы, представленной на рисунке 2.30 [4,18].

После решения оптимизационной задачи- подбора весовых коэффициентов и порогов сети, приводящего к минимуму целевой функции G , были получены ре-

результаты аппроксимации систематической погрешности нейросетью для системы «ROD- 800 – призма», представленные в таблице:

Число нейронов	Sw	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vs		-13,208	-65,633	-40,821	33,662	57,820	41,847	-1,216	-2,960	34,973	29,727
Vc		24,134	52,505	98,608	33,865	8,123	-52,968	58,736	24,388	13,181	6,991
Sv	-8,2693	-7,470	-67,676	-84,634	-13,331	14,666	-25,159	0,425	-2,349	0,628	1,450
W		5,455	4,298	6,451	-2,970	3,810	-2,840	16,284	-18,449	1,876	-2,716

Для системы «TPS System 1000-призма» при обучении этой же сетью получены коэффициенты сети, представленные в таблице:

Число нейронов	Sw	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vs		-7,980	-53,68	-49,46	34,351	57,782	41,304	-1,038	-3,632	34,148	27,134
Vc		29,402	58,223	95,0851	31,561	8,184	-50,961	58,736	28,995	8,994	7,439
Sv	-0,448	-7,429	-77,093	-84,571	-19,364	14,742	-30,167	3,843	-3,861	-8,051	-0,467
W		2,371	0,888	0,0678	-0,567	1,779	-1,643	1,162	-3,884	4,544	-4,725

Результаты экспериментальных исследований представлены в Главе 4.

Сравнивая методы обработки результатов измерений, можно сделать вывод о том, что дискретные преобразования Фурье и ИНС, могут повысить точность исследований за счет автоматического устранения грубых ошибок из спектра ПИ и более плавной аппроксимации по сравнению с линейной в любой точке диапазона измерений.

Выводы по Главе 2

Проведенные в данной главе исследования и разработки позволяют сформулировать общие требования к научно-технической базе создания пространственного компаратора для исследований (поверки, калибровки и испытаний с целью утверждения типа МКСИ) координатных средств измерений, работающих в сферической системе координат:

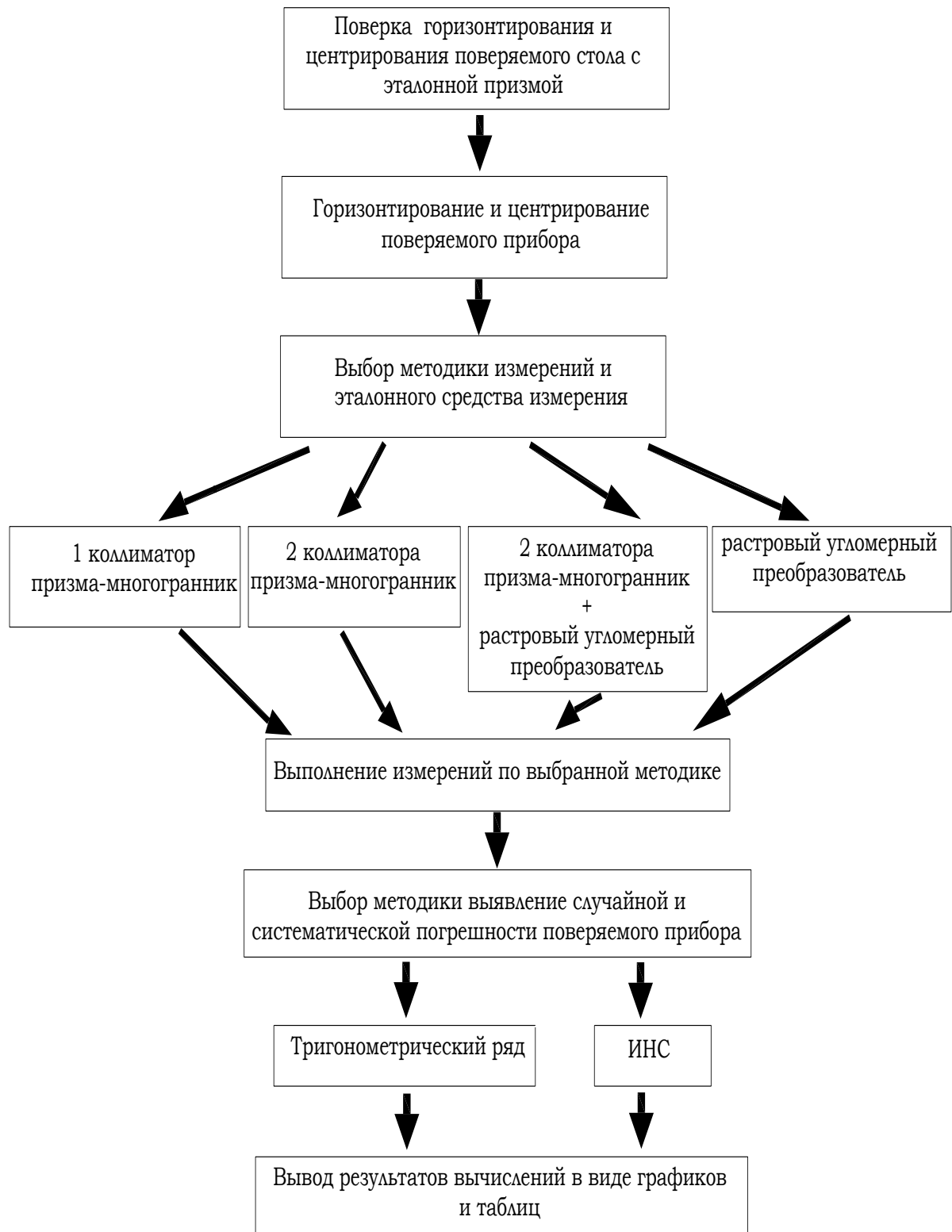


Рисунок 2.28 – Выбор метода измерений обработки результатов

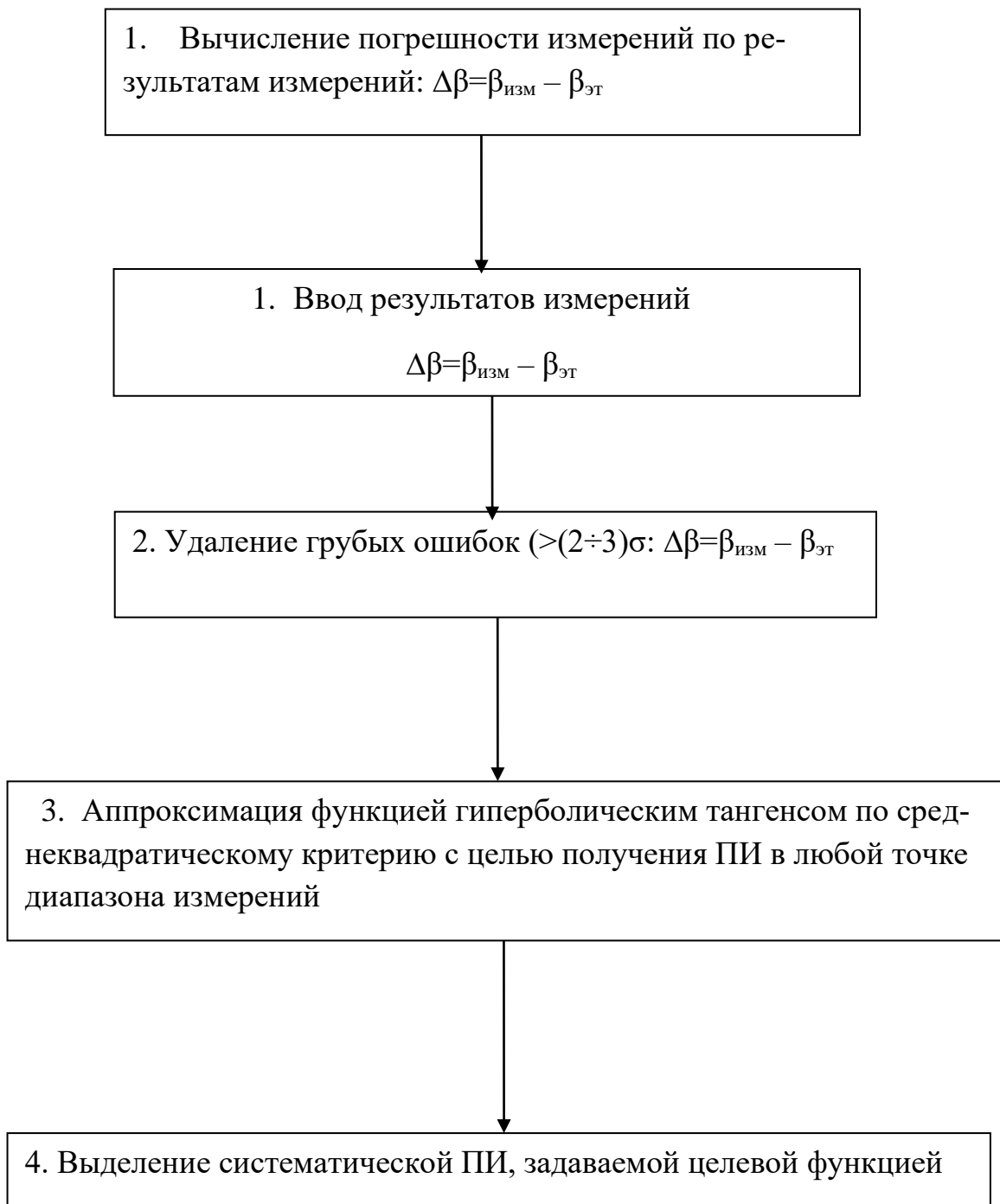


Рисунок 2.29 - Процедура обработки результатов измерений ИНС

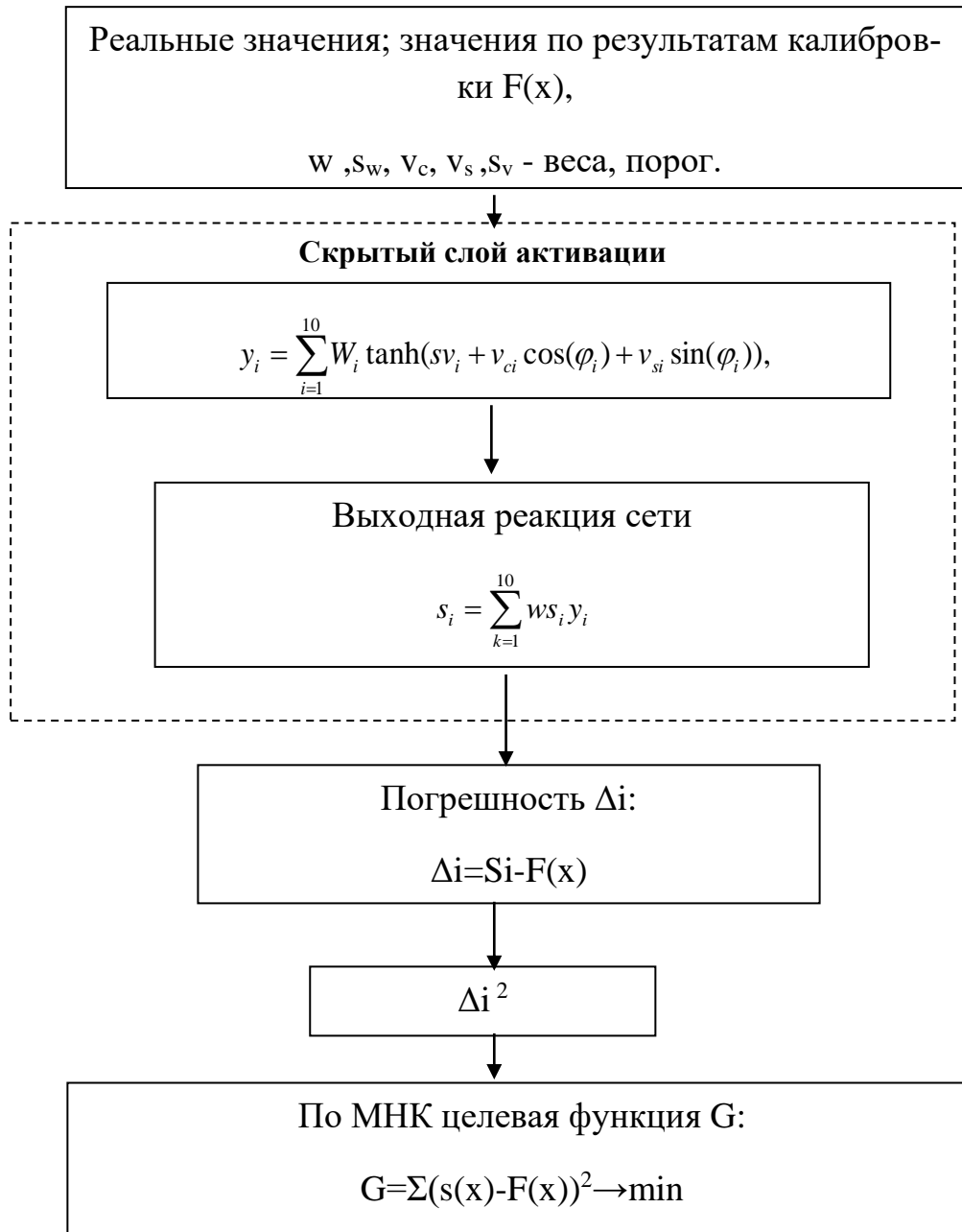


Рисунок 2.30 – Алгоритм вычислений и оптимизации результатов измерений

1. Для повышения точности исследований необходимо создание эталонной системы координат, единой с исследуемым МКСИ,
2. На основе математических моделей влияния внешних условий (в реальных условиях производства) на метрологические характеристики эталонов, осуществляющих исследования, **выявлены диапазоны отклонений внешних усло-**

вий, при которых применение материальных эталонов с оптическими или фотоэлектрическими микроскопами обеспечивает более высокую точность измерений, чем лазерные интерферометры перемещений, работающие по схеме Майкельсона, 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,

3. Разработанные методы исследований МКСИ с соблюдением единой метрологической базы обеспечивают исследования сферических координат:

- радиуса-вектора в широком диапазоне измерений длин с ПИ линейных размеров $\Delta(L) \leq (0,33 \div 0,66L \text{ мкм/м}) \text{ мкм}$ (при коэффициенте охвата $k=2$),
- с ПИ горизонтального угла в пределах $0 \div 360^\circ$ $\Delta(\beta) \leq 1''$,
- с ПИ вертикального угла в пределах $+70/-50^\circ$ $\Delta(\gamma) \leq 1''$,
- каждая из которых обеспечивает свою долю ПИ в суммарной погрешности исследований, как сферических, так и прямоугольных координат.

Доказательство утверждения суммарной погрешности исследований линейных размеров обосновано рядом научных Положений, реализующих ряд усовершенствований:

3.1 Разработанный *Метод исследований длины радиуса-вектора, измеренной МКСИ, с двумя эталонными мерами* (жезлами или лазерными интерферометрами), оси которых расположены на известных расстояниях от измерительной оси ПКИ МКСИ (для средств измерений, ось которых невозможно установить с осью эталона), и фотоэлектрическими микроскопами обеспечивает ПИ за счет устранения влияний отклонений от прямолинейности перемещения, соблюдения принципа Аббе и внешних условий не более 1 мкм/м,

3.2 Разработанный *Метод исследований длины радиуса-вектора с удвоением длины перемещения отражателя исследуемого МКСИ* с помощью инварного жезла или лазерного интерферометра, оси которых совмещены с измерительной осью испытуемого МКСИ обеспечивает расширение диапазона исследований и повышение точности измерений координаты радиуса-вектора за счет уменьшения длины перемещения, устранения влияния отклонений от прямолинейности

направляющих и внешних условий с ПИ не более 10 мкм в широком диапазоне длин в неограниченном количестве исследуемых линейных координат,

3.3 Разработанный *метод исследований МКСИ с эталонным инварным жезлом и эталонным лазерным интерферометром*, оси которых совмещены с осью исследуемого МКСИ, позволяет за счет использования материального инварного эталона *в реальных производственных условиях* устранить влияние рефракции на погрешность измерений, при этом оказывает влияние ПИ температуры жезла, что на длине, равной 24-м метрам при восьми уложениях 3-х метрового жезла, не более ПИ $\Delta(L) \leq (2+0,32 \text{ мкм/м}) \text{ мкм}$,

3.4 Разработанный *Трилатерационный метод исследований вертикальных угловых* измерительных систем по предварительно откалиброванному по длине МКСИ позволяет выявить короткопериодическую (циклическую) составляющую ПИ вертикальных углов в заявленных производителем пределах измерений $+77^\circ/-52^\circ$ со стандартной ПИ не более $1''$ (*с перестановкой калибруемого МКСИ в пределах измерений $\gamma = 15^\circ - \Delta(\gamma) \leq 0,5''$, в пределах измерений $\gamma = \pm 4^\circ - \Delta(\gamma)$ может быть не более $0,1''$*),

3.5 Разработанный на основе эталонной 24-х гранной призмы-многогранника 1-го разряда и лазерного интерферометра метод исследований горизонтальных измерительных систем обеспечивает измерение горизонтального угла в пределах 360° с расширенной ПИ не более $1''$, что в два раза превышает заявленную 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. Разработанная научно-техническая база на основе пространственного оптико-электронного комплекса по техническим характеристикам не противоречит известным международным стандартам.

Глава 3. Разработка научно-технической основы для исследований измерительных систем для измерений превышений

В диссертационной работе созданы и экспериментально опробованы методы и средства выявления ПИ современных 1D оптико-электронных средств измерений для измерения вертикальных размеров и превышений при их исследованиях (измерительных систем с цифровыми нивелирами (ИСЦН)).

3.1 Методы исследований измерительных систем «Цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка»

Повышение точности измерений ИСЦН при выполнении высокоточного нивелирования соответствующего класса возможно при: тщательном метрологическом обеспечении и выполнении поверок и калибровки измерительной системы «цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки» в целом, разработке надлежащей методики измерений на станции и стратегии проложения нивелирных ходов, позволяющей компенсировать или существенно ослабить влияние систематических составляющих ПИ.

Необходимо отметить тот факт, что метрологическое обеспечение должно быть тесно связано с условиями работы ИСЦН при производственных измерениях, так как точность измерений зависит от таких технических характеристик средства измерений, как, например, увеличение оптической системы, отношение сигнал/шум в электрическом тракте и др.

В данной работе разработаны и проверены экспериментально следующие методы метрологического обеспечения измерительных систем с цифровыми нивелирами и штрих-кодовыми рейками [23]:

- 1) Метод исследований ИСЦН с вертикальным расположением рейки,
- 2) Метод исследований ИСЦН с вертикальным расположением рейки,

- 3). Метод исследований ИСЦН с использованием концевых мер длины,
 - 4). Метод с использованием инварной штриховой меры и лазерного интерферометра,
 - 5). Метод с использованием инварной штриховой меры, эталонной и поверяемой реек,
 - 6) Метод определения размера от пятки штрих-кодовой рейки до заданного отсчета по рейке,
 - 7). Метод калибровки положения штрихов штрих-кодовой рейки,
 - 8). Метод введения и учета поправок за компарирование ИСЦН в результаты полевых измерений,
 - 9). Метод исследований влияний температурных отклонений на ПИ
- Кроме того, разработан метод высокоточного нивелирования с использованием штрих-кодовой рейки с двумя пятками и контролем размера штрих-кодовой рейки между пятками [129].

3.1.1 Методика исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами на вертикальном компараторе

В работе описана принципиальная схема компаратора и приведены результаты наблюдений и исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами, как в нормальных условиях, так и при изменении температуры в пределах +15/+27°C в течение нескольких лет. Из них виден нелинейный характер калибровочной характеристики, который изменяется с течением времени. При этом обеспечивалась высокая сходимость результатов измерений при исследованиях.

Принципиальная схема вертикального компаратора приведена в Главе 2 на рисунке 2.18, расположение компаратора в составе оптико-электронного комплекса показано на рисунке 2.9 (ВЛУК).

Математическая модель измерений описывается выражением:

$$\Delta(h)=h_{Н} - L_{инт.}, \quad (3.1)$$

здесь: h_H – превышение по цифровому нивелиру,

$L_{\text{ИНТ}}$ – перемещение отражателя лазерного интерферометра.

Преимуществом разработанной схемы является то, что здесь рейка устанавливается в ее рабочем вертикальном положении и в процессе измерений остается неподвижной (как в Инструкции по нивелированию), что снижает риск влияния дополнительных деформаций шкалы рейки, а также на рабочем удалении от цифрового нивелира.

Методика выполнения измерений предполагает выполнение следующих действий:

- при исследованиях измерительной системы «цифровой нивелир+штрих-кодовая рейка» рейка с предварительно поверенным уровнем устанавливается на требуемых расстояниях от вертикального компаратора (нивелира) в ее рабочем вертикальном положении на репере,

- ЦН устанавливается и горизонтируется на подвижной каретке так, что его вертикальная ось вращения соосна с измерительным плечом лазерного интерферометра,

- выбирается программа измерений (определение ПИ в диапазоне измерений или определение ПИ в точке),

- в системе управления шаговым двигателем задаются поверителем дискретность и диапазон измерений при перемещении столика с цифровым нивелиром (например, через 100 мм в диапазоне 500÷2600 мм), направление перемещения и количество приемов измерений,

- режим работы (статический – с заданными временными остановками для считывания, динамический – непрерывное перемещение со снижением скорости при подходе к точке отсчета),

- ПИ вычисляется как разность между отсчетами по цифровому нивелиру и эталонному лазерному интерферометру.

Аттестация вертикального компаратора выполняется с помощью лазерного трессера так же, как и горизонтального линейного компаратора.

3.1.2 Методика исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами на горизонтальном компараторе

Недостатком разработанной принципиальной схемы компаратора с вертикальным расположением рейки является то, что здесь практически невозможно определить расстояние от штрих-кодовой шкалы до пятки рейки.

Поэтому в данной работе разработана и практически опробована принципиальная схема исследований ИСЦН с горизонтальным расположением штрих-кодowych реек, которая дополняет при исследованиях схему с вертикальной рейкой и может использоваться самостоятельно. Разработанная схема опубликована в работах автора [23,30,34,35,37,40,42,44]. Схема показана на рисунке 3.1.

При исследованиях ИСЦН в рабочем диапазоне рейки ПИ вычисляется по разности отсчетов между ЦН и лазерным интерферометром

Для определения размеров от пятки рейки до требуемого отсчета по штрих-кодовой шкале разработанная *математическая модель* измерений и вычислений при калибровке и привязке штрих-кодowych шкал к пяткам (основаниям) реек измерительных систем с горизонтальными штрих-кодowymi рейками описывается следующими функциональными зависимостями [42]:

$$П_{эм} = \frac{D - L - d}{2} + d . \quad (3.2)$$

Размер до основания исследуемой рейки равен:

$$П_{кал} = П_{эм} - d \quad (3.3)$$

контроль измерений выполняется по формуле:

$$П_{кал} + П_{эм} + L = D \quad (3.4)$$

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 пяток реек от заданного отсчета по рейкам,

d – разность пяток реек.

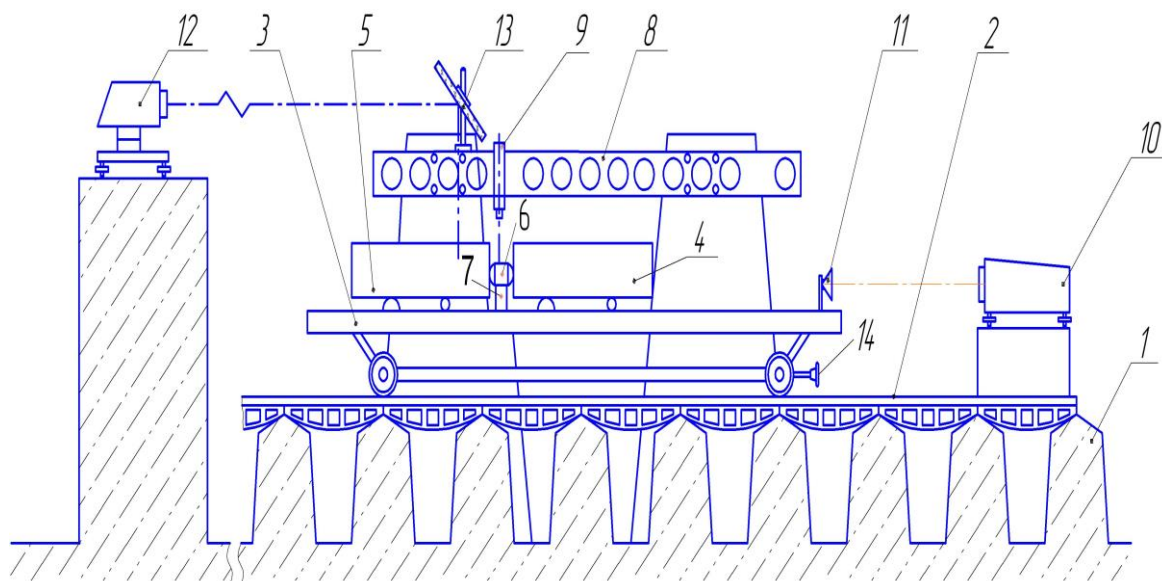


Рисунок 3.1 – Горизонтальный компаратор для исследований ИСЦН: 1 – фундаменты, 2 – направляющие рельсы, 3 – подвижная каретка, 4 – штрих-кодовая рейка исследуемой измерительной системы, 5 – эталонная штрих-кодовая рейка, 6 – штриховая мера, 7 – база, 8 – направляющие, 9 – микроскоп, 10 – лазерный интерферометр, 11 – отражатель, 12 - эталонный цифровой нивелир, 13 – поворотное зеркало, 14 – винт для микрометрического перемещения

Эталонная 2 и исследуемая 4 рейки через сферическую меру (притертый к их пяткам в середине блок концевых мер) 6 жестко соединяются между собой и устанавливаются на подвижной каретке 1 соосно с измерительным каналом лазерного интерферометра 11, подвижная каретка перемещается так, чтобы в поле

зрения цифрового нивелира 8 появилась шкала калибруемой штрих-кодовой рейки 4, с помощью винта микроперемещения 13 добиваются необходимого отсчета на дисплее цифрового нивелира (например, 500 мм), в этот момент обнуляются показания на цифровом блоке лазерного интерферометра; каретка перемещается так, чтобы в поле зрения цифрового нивелира попала кодовая шкала эталонной рейки 2, при этом отсчет на дисплее нивелира должен быть равен отсчету по эталонной рейке (те же 500 мм), в этот момент считывается значение перемещения D на цифровом табло лазерного интерферометра 11.

Далее каретка 1 снова возвращается на отсчет по эталонной рейке, равный 500 мм, проверяется нулевой отсчет по лазерному интерферометру, после чего на грань концевых мер длины 14 и 15 фокусируется микроскоп 5 в центре его сетки нитей. После этого, если требуется сразу определить пятку калибруемой рейки, то рейки разъединяются и на место калибруемой рейки 4 устанавливается эталонная рейка 2 с концевой мерой 16, по ней выставляется отсчет на дисплее цифрового нивелира, равный 500 мм, и обнуляются показания лазерного интерферометра. Далее каретка 1 перемещается до совпадения грани концевой меры 16 с центром сетки нитей микроскоп-микрометра 5, записывается отсчет d по лазерному интерферометру 11. Штриховая мера 6 показана на рисунке 3.2.

3.1.3 Метод определения погрешности нанесения штрих-кода на инварной рейке

Пример выполнения измерений приведен в разработанной с участием автора диссертации и утвержденной методике измерений [139].

При выявлении ПИ нанесения отдельных штрихов шкалы рейки рейка располагается горизонтально на подвижной каретке, соосно с ней устанавливается измерительный канал эталонного лазерного интерферометра. Над шкалой рейки перпендикулярно располагается микроскоп, резкость которого юстируется на края штрихов.

На рейке видны штрихи, кратные интервалу 100 мм. Перемещая каретку с рейкой, выставляют микроскоп на край первого узванного штриха рейки и обнуляют показания лазерного интерферометра. Затем каретку перемещают так, чтобы под микроскопом находился второй край того же штриха и отсчитывают по интерферометру. Разность двух отсчетов, деленная на два, составит начало измерений. Перемещение каретки в прямом и обратном ходе во всем диапазоне шкалы рейки составит один прием измерений.

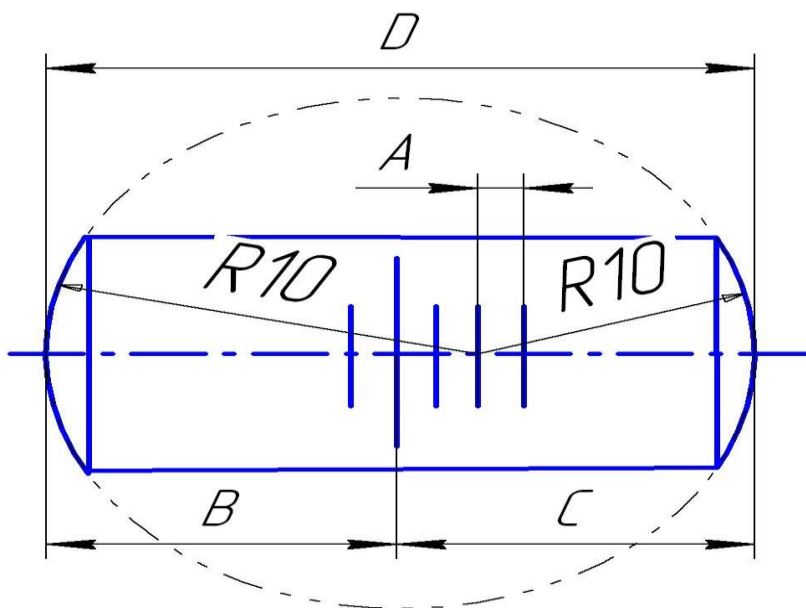


Рисунок 3.2 - Принципиальная схема штриховой меры

Считая ПИ жезла, интерферометра, наведения на микроскоп и влияние температурных отклонений взаимно независимыми, методическую ПИ измерения можно вычислить по формуле:

$$\Delta_{мет} = \sqrt{\Delta_{жезла}^2 + \Delta_{инт}^2 + \Delta_{микр}^2 + \Delta_{темп}^2} \quad (2.28)$$

При отклонениях температуры в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$ предельная методическая ПИ: $\Delta_{мет} = 3\Delta_{мет} = 3\sqrt{0,07^2 + 0,4^2 + 1^2 + 0,3^2} = 1,3\text{мкм}$

При неровных краях штрихов рейки на практике ПИ увеличивается примерно в десять раз. Однако, так как считывание цифровым нивелиром происходит с большого участка рейки (не менее 300 мм), то вычисленная ПИ расположения штрихов находится в допуске.

3.1.4 Метод учета поправок за компарирование измерительных систем с цифровыми нивелирами в результаты производственных измерений

Одной из основных составляющих суммарной ПИ ИСЦН является систематическая детерминированная ПИ, накопленная в диапазоне измерений. Учет ее возможен двумя методами: с помощью формулы, полученной по результатам регрессионного анализа (как правило линия регрессии), либо из таблицы поправок, полученной в процессе калибровки ИСЦН.

Данные поправки необходимо вводить в отсчеты при выполнении нивелирования пропорционально размеру от отсчета 500 мм, или с учетом размера от пятки рейки.

На данное устройство и метод измерений автором получен патент РФ на изобретение [174], кроме того, фирмой «Кредо-Диалог» разработана программа учета поправок, основанная на результатах исследований по разработанной методике измерений.

3.1.5 Методика учета результатов исследований в производственных условиях

Одним из существенных недостатков известных ИСЦН является отсутствие возможности контроля результатов полевых измерений. Для устранения указанного недостатка разработана конструкция рейки с двумя основаниями. Размер

между основаниями (пятками) определяется при исследованиях описанным выше методом для каждой пятки.

Процедура измерений в производственных условиях состоит из следующих действий:

1. Нивелир устанавливают между рейками,
2. Берут отсчеты a – по задней рейке, b – по передней,
3. Переворачивают обе рейки на 180° на те же точки, берут инверсные отсчеты a^* и b^* , получают $L_{\text{задизм}} = a + a^*$, $L_{\text{перизм}} = b + b^*$,

4. Вычисляются и распределяются пропорционально отсчетам поправки за температуру инвара каждой рейки: $\delta_{\text{задн}} = L_{\text{нормзадн}} - L_{\text{задизм}}$ и

$$\delta_{\text{пер}} = L_{\text{нормпер}} - L_{\text{перизм}}$$

Проведенные исследования **доказывают** повышение точности за счет калибровки (исследований) ИСЦН и контроля производственных измерений по результатам метрологических исследований.

Выводы по Главе 3

Проведенные в данной главе исследования и разработки позволяют сформулировать общие требования к исследованиям измерительных систем с цифровыми нивелирами:

1. Для выполнения нивелирования 1 и 11 классов необходимо введение поправок в результаты измерений по результатам исследований, шаг исследований может быть выбран, например, 100 мм (исходя из того, что наименьшее поле рейки, видимое нивелиром, не менее 300 мм), между интервалами возможна интерполяция погрешности исследований между соседними исследованными отсчетами по рейке,
2. Для учета поправок за результаты исследований ИСЦН необходима привязка шкалы рейки к ее основанию (пятке),

3. Определение поправок во всем диапазоне исследований необходимо выполнять на расстояниях от нивелира до рейки, используемых в производстве.

Разработанные в данной работе методы исследований измерительных систем с цифровыми нивелирами с привязкой штрих-кодовой шкалы к основанию (пятке) рейки позволят уменьшить погрешность измерений за счет введения поправок в результаты производственных измерений с погрешностью измерений превышений $\Delta(H) \leq 20$ мкм,

Разработанная методика исследований измерительных систем с цифровым нивелиром и двухпяточными рейками позволит учитывать по контролю длины между пятками результаты калибровки в реальных условиях эксплуатации с ПИ не более $\Delta(H) \leq 20$ мкм.

Глава 4. Механическая реализация и экспериментальные исследования разработанной научно-технической основы для генерации эталонной системы пространственных 3D÷1D координат для исследований мобильных координатных средств измерений

4.1 Экспериментальные исследования распределения температуры в термоконстантном помещении при отклонениях внешних условий

Экспериментальные исследования градиента температуры в помещении метрологической лаборатории проводились в течение пяти часов, при этом выявлено, что температура в термоконстантном помещении за время измерений изменяется при отключенной системе термостатики не более, чем на 0,2°C. График отклонений температуры приведен в Главе 2 на рисунке 2.1.

При калибровке температурных датчиков прибора ИРТ-4 датчики вместе с эталонным термометром с ценой деления 0,1°C были помещены и выдержаны в течение суток в деревянной герметичной таре. Поправки вычислены по формуле:

$$\delta = T_{\text{эт}} - T_{\text{ИРТ-4}} \quad (4.1)$$

Поправки за калибровку термодатчиков и исследования распределения температурного режима в зоне измерений при отключенной и включенной системе термостатики приведены в таблице 4.1.

После калибровки шестнадцать термодатчиков прибора ИРТ-4 расположены вдоль термоконстантного помещения вблизи направления измерительного канала, ориентированного на соответствующие марки-гнезда разработанной сети измерений.

Результаты исследований градиента температуры ΔT показывают, что в течение пяти часов испытаний и по площади помещения он изменяется не более, чем

$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, что соответствует теоретическим исследованиям, выполненным в Главе 2.

Таблица 4.1

№ термодатчика	Поправка за калибровку $\delta (^{\circ}\text{C})$	Система термостатики отключена		Система термостатики включена	
		Отсчеты по ТД $t^{\circ}\text{C}$	$t^{\circ}\text{C}$	Отсчеты по ТД $t^{\circ}\text{C}$	$t^{\circ}\text{C}$
1□	-0,1	20,6	20,5	20,1	20,0
2□	0,3	20,1	20,6	19,7	20,0
3□	0	20,5	20,5	19,9	19,9
4□	0,3	20,4	20,7	19,7	20,0
5□	0,5	19,9	20,4	19,3	19,8
6□	0,2	20,3	20,5	19,8	20,0
7□	0,8	19,7	20,5	19,2	20,0
8□	0	20,4	20,4	20,1	20,1
9	0,5	20,0	20,5	19,5	20,0
10	0,2	20,2	20,4	19,7	19,9
11□	-0,1	20,8	20,7	19,8	19,7
12	0,3	20,1	20,4	19,6	19,9
13	-0,2	20,5	20,3	20,0	19,8
14	0,3	20,3	20,6	19,6	19,9
15	-0,2	20,5	20,3	20,1	19,9
16	1,0	19,5	20,5	18,8	19,8

$t^{\circ}\text{C}$			20,5		19,9
Размах R_{max}			$\pm 0,2$		$\pm 0,2$
СКО σ			0,1		0,1

4.2 Экспериментальные исследования линейного оптико-механического компаратора

4.2.1 Исследование отклонений от прямолинейности перемещения каретки с эталонным жезлом

Экспериментальные исследования выполнены с использованием лазерного трекера FARO ION. Результаты измерений приведены на рисунках 4.1 и 4.2. Из них видно, что максимальное отклонение от прямолинейности перемещения каретки с жезлом по координатам Y и Z не превышает 0,4 мм. Суммарное влияние этих величин приводит к ПИ, равной 0,07 мкм и его можно при калибровке 3D МКСИ, измеряющих в следящем режиме за отражателем, не учитывать. При калибровке, например, лазерных интерферометров при диаметре светового пятна, равном 5 мм, смещение отражателя на 0,4 мм уменьшит зону перекрытия опорного и измерительного каналов интерферометра на 8% (допускается 20%), таким образом имеется запас более, чем в два раза.

При измерениях отклонение от прямолинейности направляющих устраняется юстировкой по лазерному трекеру с погрешностью юстировки $\pm 0,2$ мм в точках отсчитывания по оптическим микроскопам.

4.2.2 Исследование погрешности измерений при визировании на оптические микроскопы

Исследования выполнены с использованием лазерного интерферометра. При этом визуальное наведение штриха жезла на сетки микроскопов выполнялось путем перемещения каретки с жезлом с двух сторон, при каждом наведении выполнялись три отсчета. Результаты измерений приведены в таблице 4.2. Из них видно, что ПИ при наведении на оптические микроскопы при перемещении каретки с жезлом в прямом и обратном перемещениях является величиной случайной и не превышает ± 2 мкм.

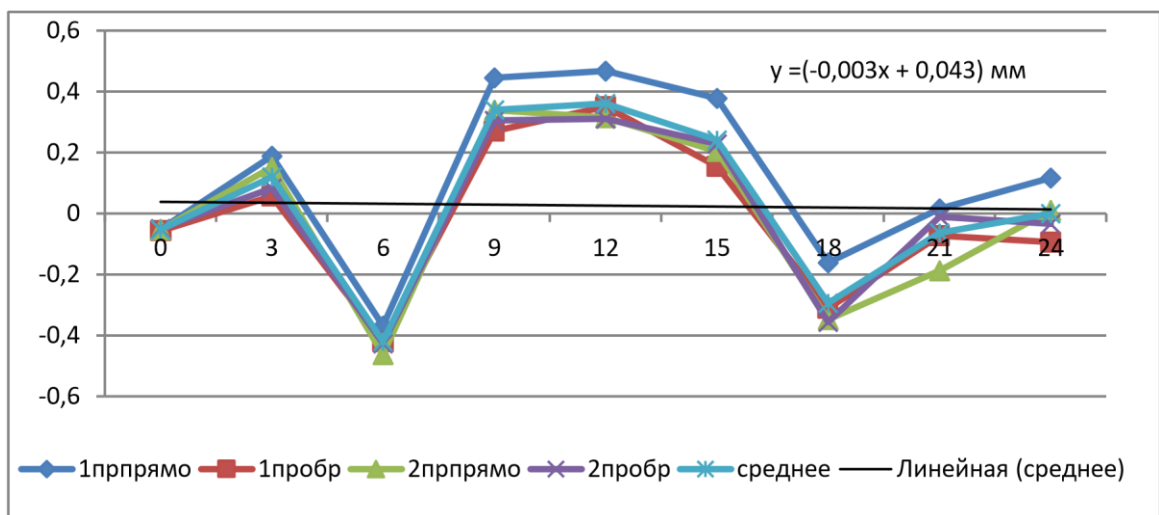


Рисунок 4.1 - Отклонение от прямолинейности по оси ХУ

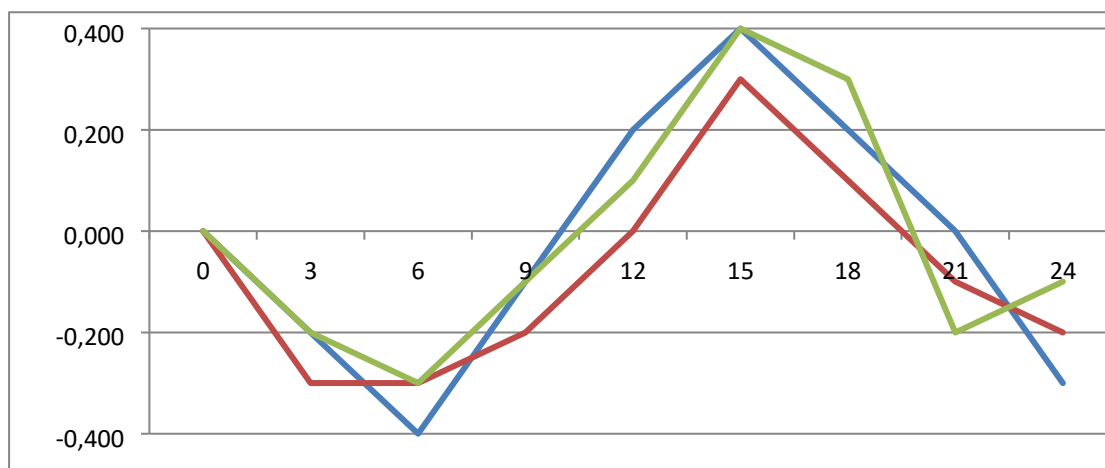


Рисунок 4.2 - Отклонение от прямолинейности по оси XZ

Исследования ПИ наведения при использовании ФЭМ, выполненные в работах автора [67,156], показывают, что ПИ наведения (ПИ определения центра штриха)

может быть не более 0,5 мкм.

Таблица 4.2

№ п/п	Отсчет по интерферометру при перемещении каретки справа (мм)			Отсчет по интерферометру при перемещении каретки слева (мм)		
	№ отсч.	Первый микроскоп	Второй микроскоп	№ отсч.	Первый микроскоп	Второй микроскоп
1	1	0,6544	3000,6814	1	0,6509	3000,6825
	2	0,6528	3000,6830	2	0,6510	3000,6807
	3	0,6537	3000,6819	3	0,6512	3000,6798
2	1	0,6525	3000,6838	1	0,6512	3000,6827
	2	0,6532	3000,6834	2	0,6518	3000,6808
	3	0,6518	3000,6802	3	0,6527	3000,6814

3	1	0,6529	3000,6833	1	0,6509	3000,6809
	2	0,6501	3000,6807	2	0,6527	3000,6802
	3	0,6508	3000,6804	3	0,6532	3000,6813
4	1	0,6544	3000,6832	1	0,6524	3000,6824
	2	0,6518	3000,6828	2	0,6534	3000,6806
	3	0,6521	3000,6841	3	0,6547	3000,6813
5	1	0,6507	3000,6823	1	0,6502	3000,6836
	2	0,6497	3000,6833	2	0,6498	3000,6831
	3	0,6530	3000,6829	3	0,6523	3000,6838

4.2.3 Исследование погрешности измерений десятиметрового

компози́тного жезла

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунках 4.3 и 4.4. Результаты испытаний компози́тного жезла показаны на рисунке 4.5. Для сравнения на рисунке 4.5 приведены значения калибровки немецкой фирмой-изготовителем, здесь отличие результатов доходило до 100 мкм.

На первом этапе измерений выполнялась калибровка лазерного интерферометра. При этом использовались два инварных жезла, по которым при размахе показаний, не превышающем 20 мкм, вычислялись значения интервалов компози́тного жезла. Так как сходимость результатов измерений по инварным жезлам выше и было выполнено большое количество измерений, то в дальнейших исследованиях испытуемых МКСИ будут использованы значения интервалов, полученных в при измерениях в условиях разработанного комплекса.

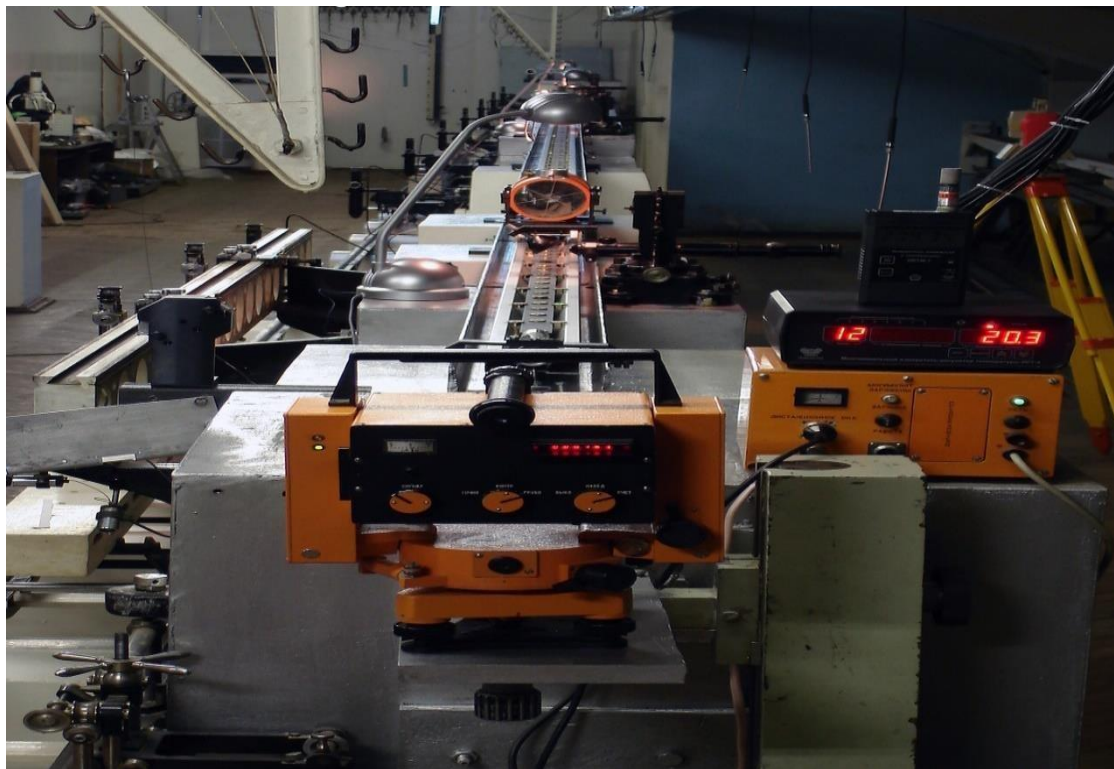


Рисунок 4.3 – Компаратор с 10-ти метровым композитным жезлом

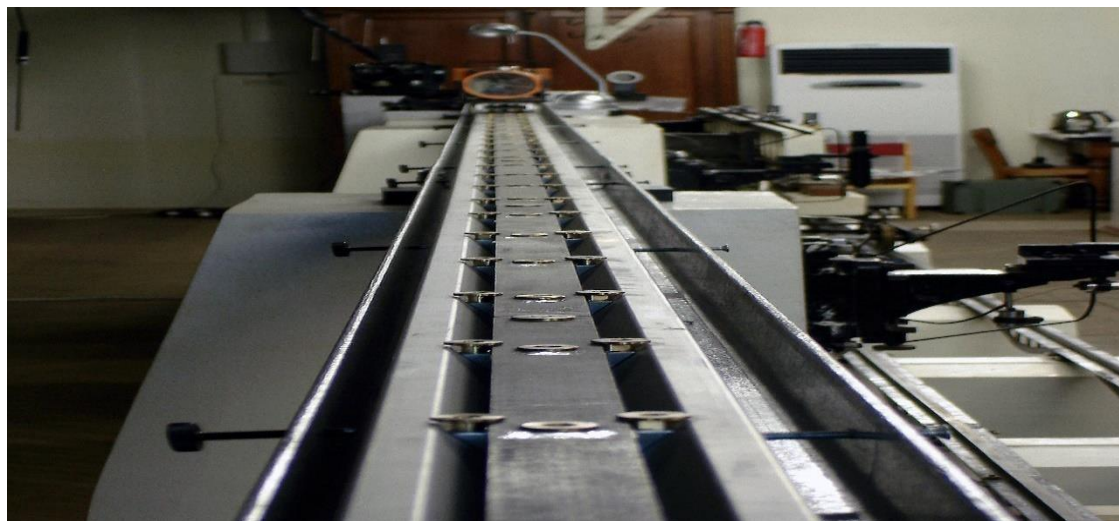


Рисунок 4.4 – Компаратор с 10-ти метровым композитным жезлом

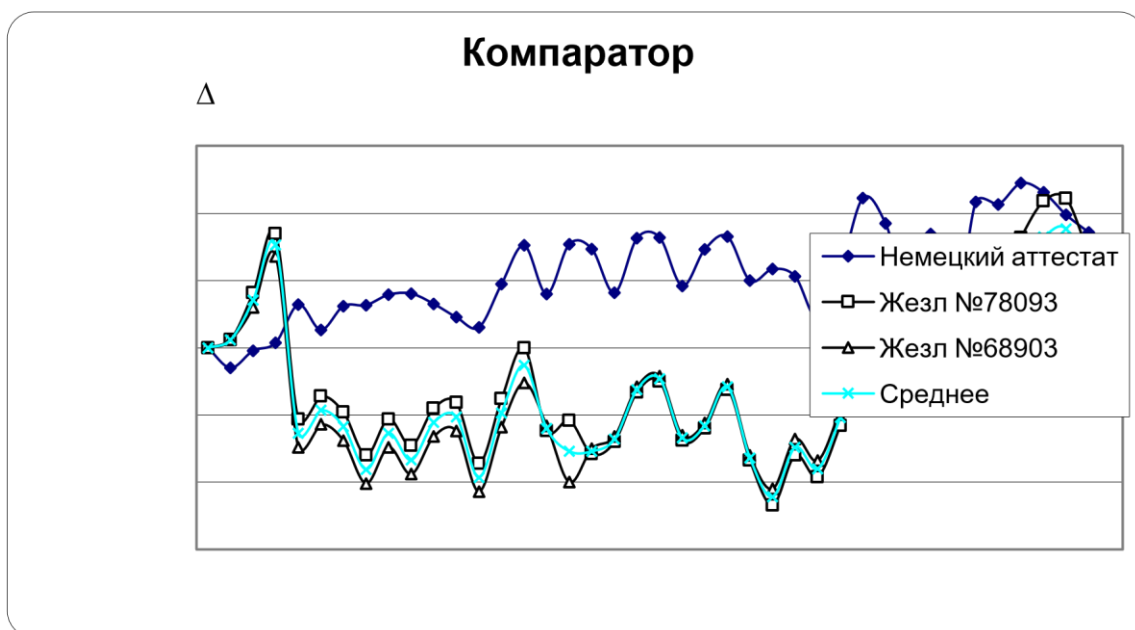


Рисунок 4.5 – Результаты исследований ПИ композитного жезла

4.2.4 Исследование погрешности измерений длины радиуса-вектора в диапазоне длин до 48-ми метров

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунке 4.6.

В соответствии с математической моделью, разработанной в Главе 2, на 24-х метровом компараторе была выполнена калибровка лазерного трекера в диапазоне измерений до 48-ми метров. Результаты исследований приведены на рисунке 4.7.

Из них видно, что погрешность измерений в схеме с удвоенным перемещением в измерительном канале испытуемого МКСИ по сравнению с эталонным жезлом практически не увеличивается, что доказывает меньшее влияние рефракции на результаты измерений.



Рисунок 4.6 - Механическая реализация метода измерений до 48-ми метров

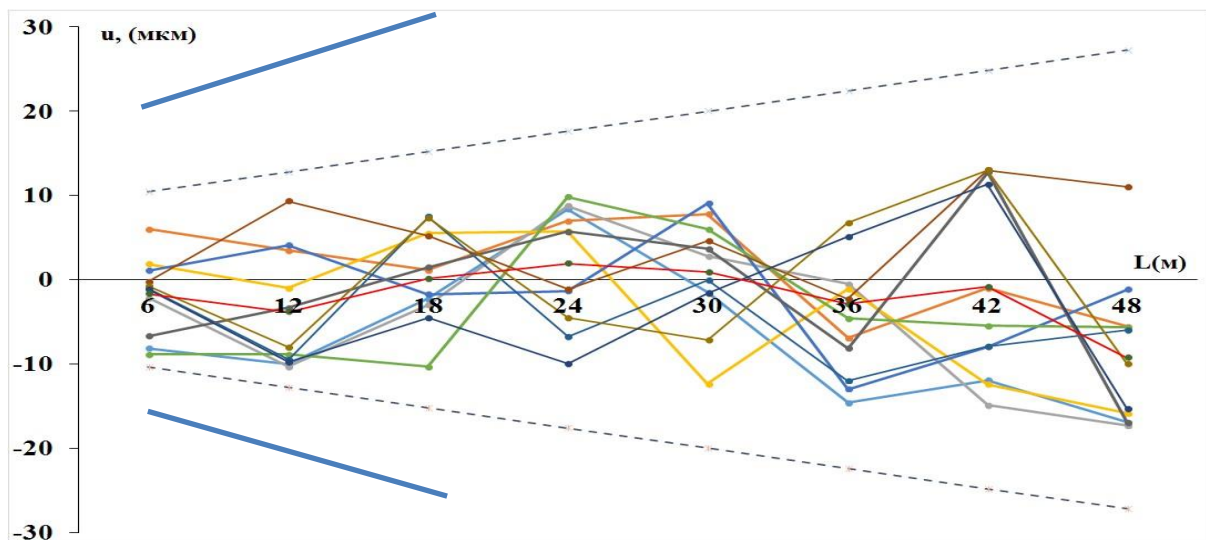


Рисунок 4.7 - Графики зависимости ПИ лазерного трекера «FARO Laser tracker Vantage» в диапазоне измерений до 48 – ми метров

4.2.5 Исследование погрешности измерений при совмещении осей исследуемого МКСИ и эталонного лазерного интерферометра

Выявить и исключить влияние рефракции на ПИ позволяет разработанный в Главе 2 метод калибровки с эталонным инварным жезлом, лазерным интерферометром и калибруемым МКСИ, оси которых совмещены.

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунке 4.8.

В этом методе измерений измерительные каналы двух интерферометров находятся в одинаковых условиях, лучи проходят один и тот же путь. Разность показаний между эталонным интерферометром и инварным жезлом можно отнести к рефракции, а разность показаний между калибруемым МКСИ и эталонным интерферометром свидетельствует о ПИ МКСИ. Результаты измерений двумя интерферометрами приведены ниже на рисунке 4.9. Из них видно, что ПИ исследуемого МКСИ при исключении влияния рефракции не превышает 0,2 мкм



Рисунок 4.8 – Механическая реализация измерений при совмещении осей

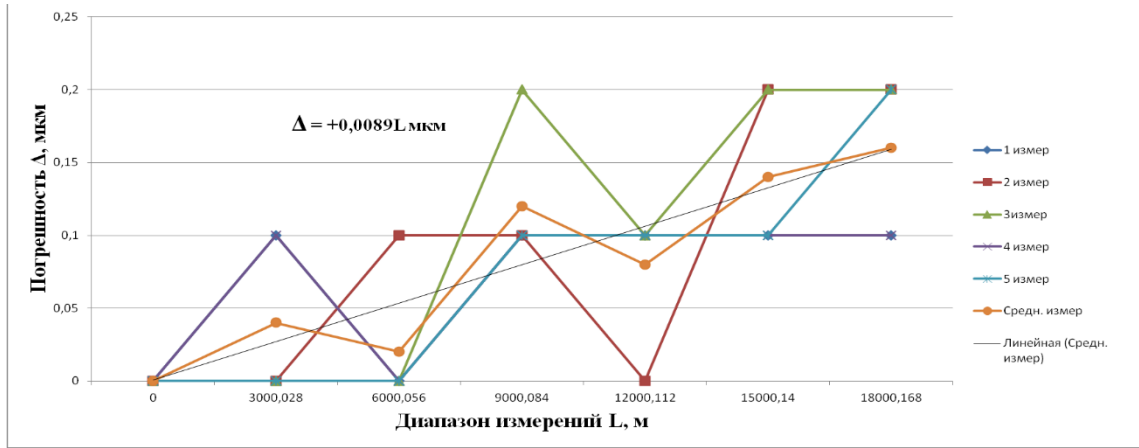


Рисунок 4.9 - Погрешность измерений дальномером при совмещении осей

4.2.6 Исследование погрешности измерений оптико-механического компаратора лазерным трессером

Исследования линейного оптико-механического компаратора осуществлялись сравнением его результатов измерений с измерениями первичным линейным эталоном, в качестве которого выступал лазерный трессер.

ПИ оптико-механического компаратора показана на рисунке 4.10. Из

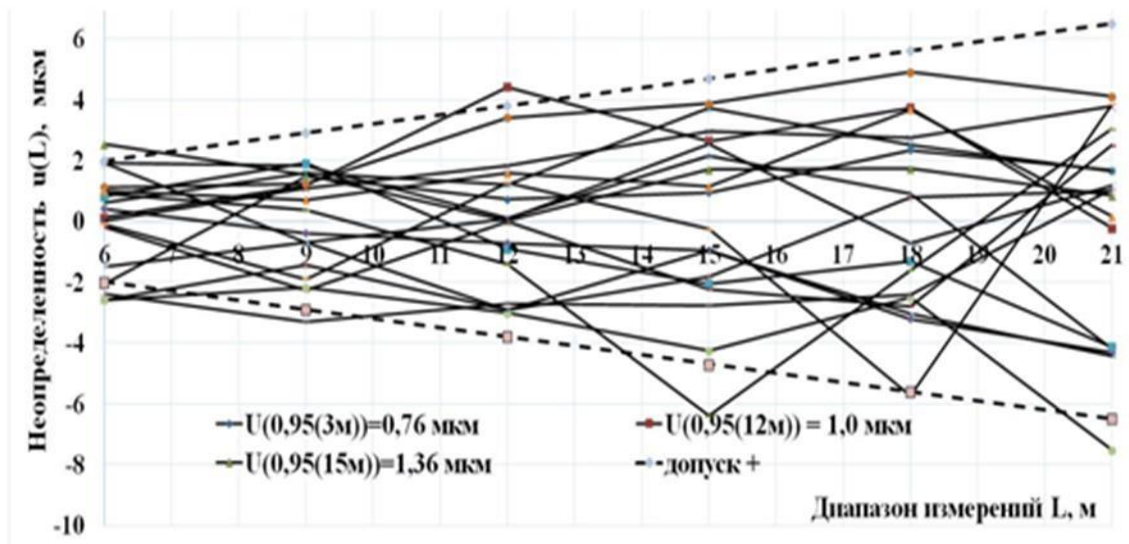


Рисунок 4.10 - Погрешность измерения длины оптико-механического компаратора лазерным трессером

приведенных графиков видно, что ПИ практически отсутствует, а разброс показаний на расстояниях более 12-ти метров может свидетельствовать о том, что в них присутствует влияние рефракции на лазерный трессер, кроме того, производитель лазерного трессера согласно нормативной документации на него гарантирует точность измерений только в диапазоне до 15-ти метров.

4.2.7 Исследование измерительного преобразователя перемещений с голографическими дифракционными решетками

Экспериментальные исследования выполнены на компараторе БВ-2035 по методике, разработанной в Главе 2, с применением двух эталонных жезлов, расположенных на известных расстояниях от оси калибруемого преобразователя.

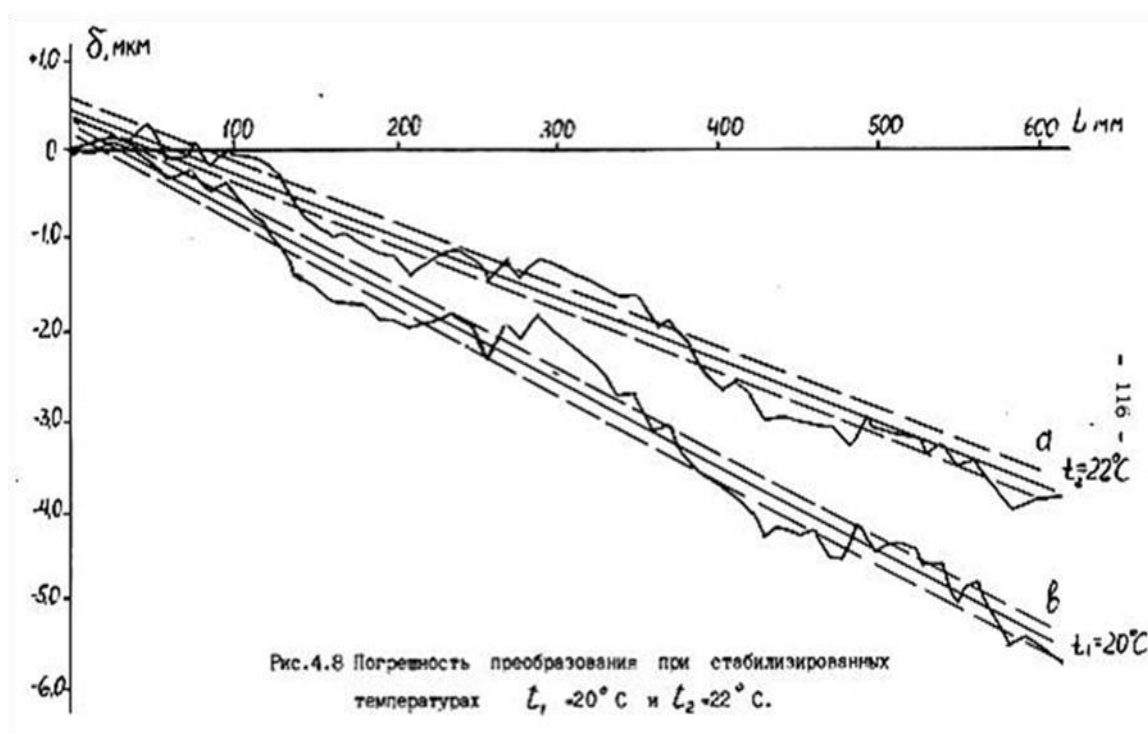


Рисунок 4.11 - Результаты экспериментальных исследований измерительных преобразователей перемещений с голографическими дифракционными решетками

Результаты исследований при разных температурах подробно описаны в кандидатской диссертации автора, средние из многократных измерений значения ПИ приведены на рисунке 4.11. Результаты измерений доказывают, что при использовании двух материальных эталонов, оси которых расположены на известном расстоянии от оси исследуемого МКСИ, полностью исключается ПИ, связанная с отклонением от прямолинейности направляющих и погрешности Аббе первого рода.

4.2.8 Исследование детерминированной короткопериодической погрешности измерений светодальномером

Для проведения исследований был выбран новый, хорошо себя зарекомендовавший на отечественном рынке, лазерный трекер FARO Laser Tracker Vantage S.

Результаты исследований ПИ с шагом 1 метр показаны на рисунке 4.12.

Из графиков видно, что циклическая ПИ соизмерима с предельно допустимой ПИ, изменяется с периодом 4 метра, что соответствует длине волны опорного

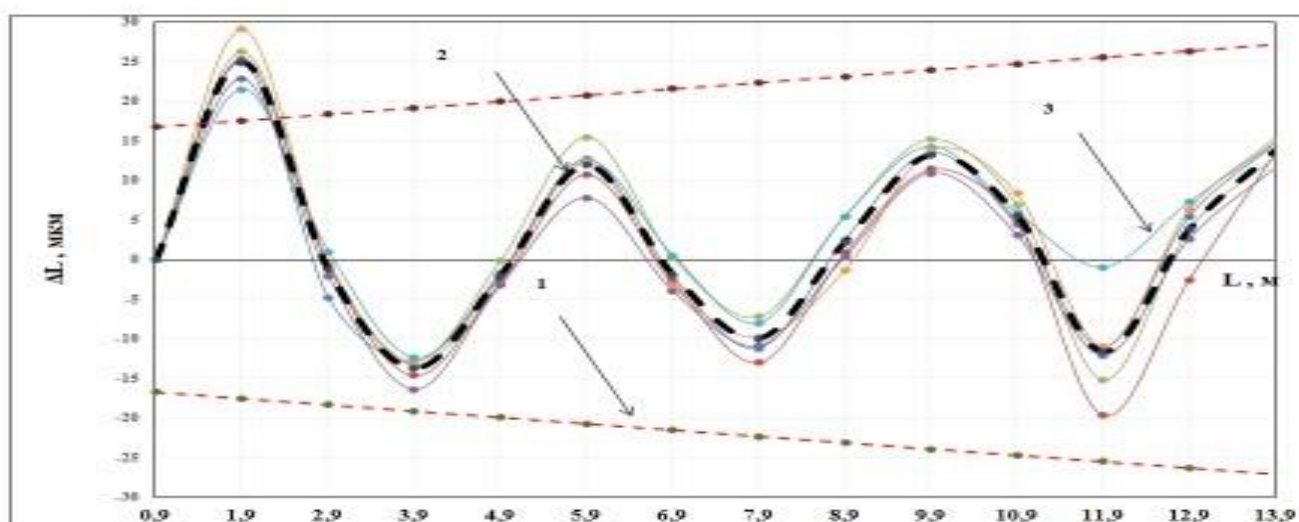


Рисунок 4.12 - Графики зависимости циклической погрешности измерений расстояний лазерного трекера FARO Laser Tracker Vantage S

канала гетеродина, на длине в 1 метр превышает допуск (незадекларированное расстояние от трекера).

4.3 Исследование погрешности измерений компаратора для исследований горизонтальных угловых измерительных систем

4.3.1 Определение погрешности измерений растрового измерительного преобразователя угловых перемещений

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунках 4.13 и 4.14.

При экспериментальных исследованиях необходимо определить цену деления измерительного преобразователя, установленного соосно с призмой-многогранником и выявить влияние эксцентриситета при установке испытуемого средства измерения на угловом компараторе.

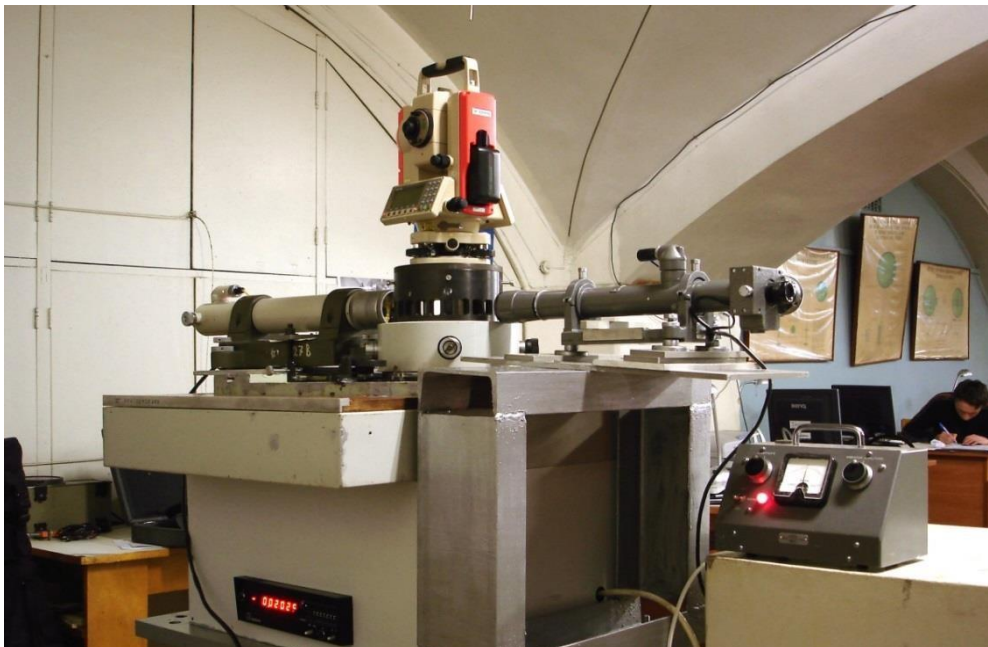


Рисунок 4.13 – Горизонтальный угловой компаратор



Рисунок 4.14 – Горизонтальный угловой компаратор

Определение цены деления преобразователя:

- при измерениях выполняется несколько приемов с замыканием полного оборота поворотного стола через 360° , цена деления преобразователя рассчитана по формуле: $360^\circ \times 60' \times 60'' / 1440000 = 1296000 / 1440000 = 0,9''$.

На рисунке 4.15 показаны результаты многократных измерений горизонтальных углов при поверке электронного тахеометра, установленного на компараторе.

На графиках видно, что эксцентриситет расположения тахеометра относительно призмы достигает значения порядка шести секунд, при этом при повторной установке его амплитуда и фаза меняются, это говорит о том, данная составляющая ПИ относится только к установке МКСИ на компараторе и не

связана с ПИ МКСИ. ПИ за счет несовпадения осей устраняется методом быстрого преобразования Фурье исключением первой гармоники из спектра ПИ.

На графиках виден эксцентриситет осей призмы и ROD-800, амплитуда ПИ достигает значения одной угловой секунды, при повторной установке МКСИ на компараторе его амплитуда и фаза относительно призмы не меняется. Постоянство эксцентриситета ROD -800 позволяет сделать вывод о том, что его при испытаниях МКСИ можно исключать. В работе [24] устранение эксцентриситета выполнено обучающимися методами нейропрограммирования. Может также быть использовано быстрое преобразование Фурье.

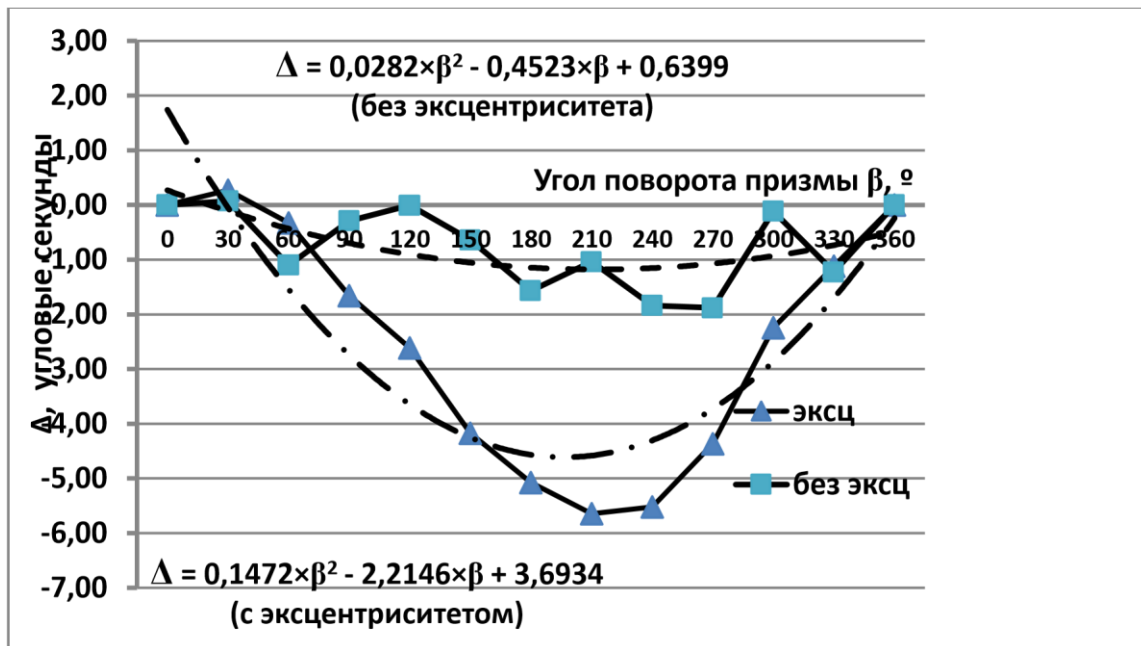


Рисунок 4.15 – Определение эксцентриситета преобразователя ROD-800 относительно эталонной призмы-многогранника

4.3.2 Экспериментальные исследования по выявлению влияния

эксцентриситета установки исследуемого МКСИ на горизонтальном угловом компараторе с вычислением с помощью дискретного преобразования Фурье

Измерения выполнялись в соответствии с алгоритмом и программой, разработанными в Главе 2, в качестве эталона использовался электронный тахеометр ТС-2003 1-го разряда. Результаты измерений показаны на рисунке 4.16.

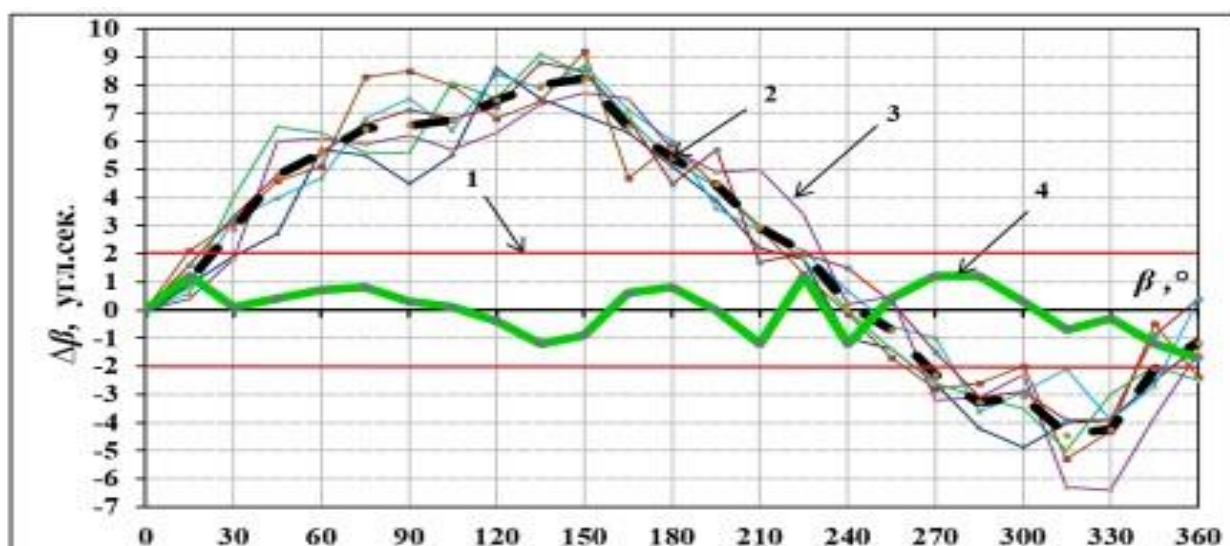


Рисунок 4.16 - Графики зависимости погрешности измерений при аттестации углового компаратора с помощью эталонного тахеометра Leica TC-2003

Устранение эксцентриситетов поворотного стола, расположения на нем эталонной призмы и исследуемого средства измерений повышает точность измерений более, чем в пять раз, при этом остается остаточное влияние, связанное непосредственно с эксцентриситетом расположения измерительной системы самого МКСИ относительно его осевой системы. Из результатов испытаний по

электронному тахеометру, имеющему ПИ угла $\Delta(\beta) \leq 0,5''$. видно, что $\Delta(\beta) \leq 1''$, кривая 4 после устранения эксцентриситетов осей тахеометра и компаратора.

4.3.3 Экспериментальные исследования по выявлению влияния

эксцентриситета установки исследуемого МКСИ на круговом компараторе с вычислением с помощью ИНС

Измерения выполнялись с теми же эталонными СИ (Призма + тахеометр ТС-2003 1-го разряда) в соответствии с алгоритмом и программой, разработанными в Главе 2, результаты измерений приведены на рисунке 4.17 и 4.18.



Рисунок 4.17 – Систематическая ПИ углового компаратора



Рисунок 4.18 – Случайная ПИ углового компаратора

Допустимые границы для случайной погрешности значением $\pm 3\sigma$ в данном случае соответствуют значению $\pm 0,90''$. Это и будет характеристикой погрешности преобразования системы «TPS System 1000-призма» при условии выполнения 9-ти серий измерений.

График усреднения случайной составляющей погрешности представлен на рисунке 4.19. Близость графика к нулю показывает достаточно высокое качество устранения систематической компоненты.



Рисунок 4.19 - График усреднения случайной составляющей ПИ

Результаты, полученные при обработке измерений классическим методом - тригонометрическим рядом - и нейросетью сопоставимы по точности, из чего следует, что разработанный нейросетевой алгоритм может быть применен для решения конкретных метрологических задач, в частности для задач исследований (поверки, калибровки и испытаний с целью утверждения типа средства измерений).

4.3.4 Экспериментальные исследования по выявлению влияния эксцентриситетов установки исследуемого МКСИ на горизонтальном угловом компараторе с вычислением с помощью аффинных преобразований

Результаты исследований до исключения эксцентриситета установки МКСИ на компараторе приведены на рисунке 4.20. Из них явно видна первая гармоника, характерная для эксцентриситета. Амплитуда гармоники более одной угловой

секунды. После аффинных преобразований (см. рисунок 4.21) амплитуда оставшейся случайной погрешности измерений не превысила 0,5''

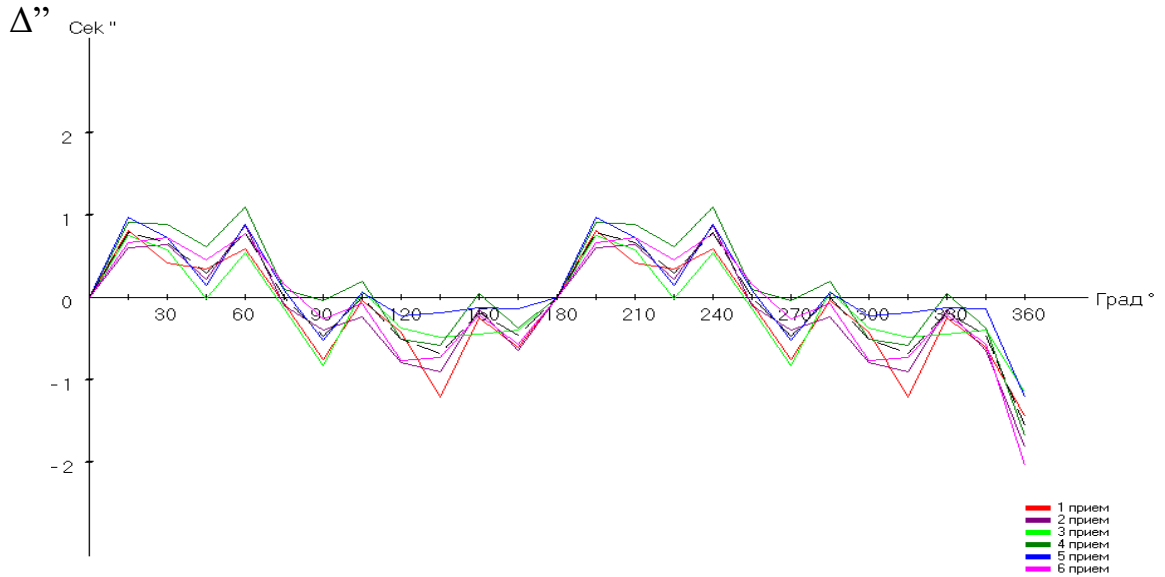


Рисунок 4.20 - Результаты исследований до устранения эксцентриситета установки МКСИ

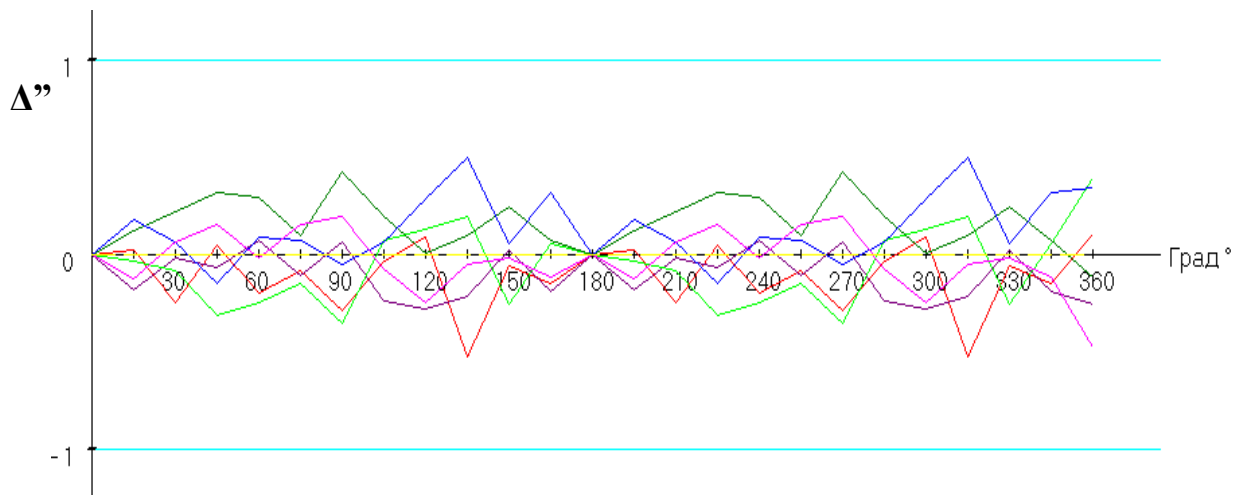


Рисунок 4.21 - Результаты исследований после устранения эксцентриситета установки МКСИ

Результаты исследований показали, что погрешность измерений горизонтальных углов не превышает 0,5”.

4.4 Исследование вертикального углового компаратора

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунке 4.22.

В соответствии с разработанным алгоритмом трилатерации по теореме косинусов в качестве рабочего эталона использован лазерный интерферометр.



Рисунок 4.22 – Внешний вид вертикального компаратора

Результаты экспериментальных исследований ПИ вертикальных углов лазерного трекера в заявленном диапазоне работ показаны на рисунке 4.23. В них

виден явно нелинейный характер, при этом при угле -12° наблюдается выход за пределы допуска. На рисунке 4.24 приведены результаты исследований короткопериодической погрешности измерений вертикального угла лазерного трекера в диапазоне $+4^\circ$.

Результаты проведенных исследований вертикальной измерительной системы лазерного трекера доказывают, что в пределах заявленного диапазона измерений ПИ может превышать пронормированный производителем допуск.

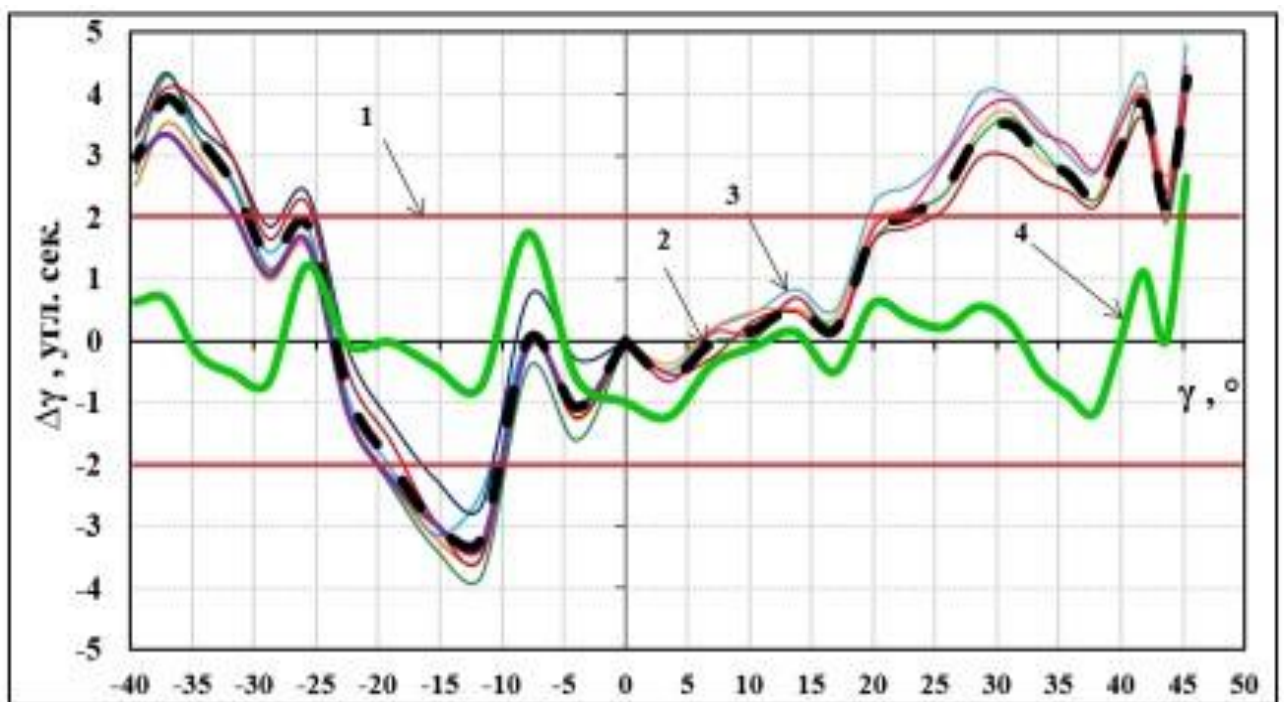


Рисунок 4.23 – Результаты измерений вертикальных углов

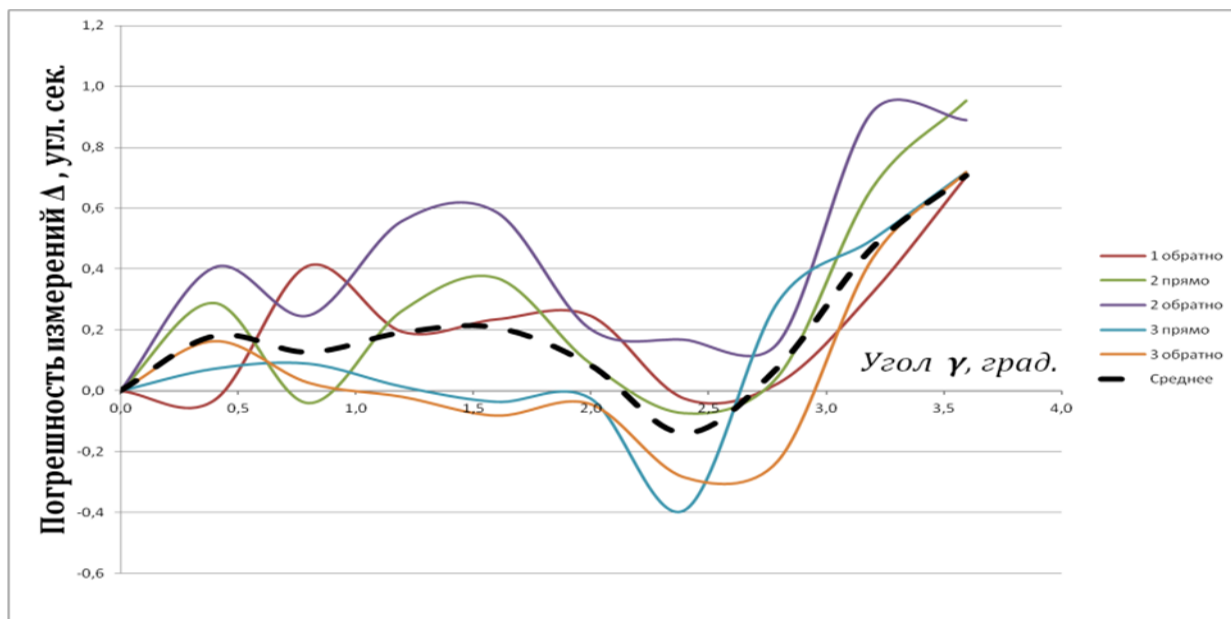


Рисунок 4.24 – Результаты измерений вертикальных углов в диапазоне измерений $+4^\circ$

4.5 Погрешность измерений длины линий в пространстве

На рисунке 4.25 приведены результаты вычислений по измеренным сферическим координатам длины линий в пространстве от 2-х до 27-ми метров, обработанные в соответствии с известными международными нормативными документами. Результаты измерений убедительно доказывают их сходимость.

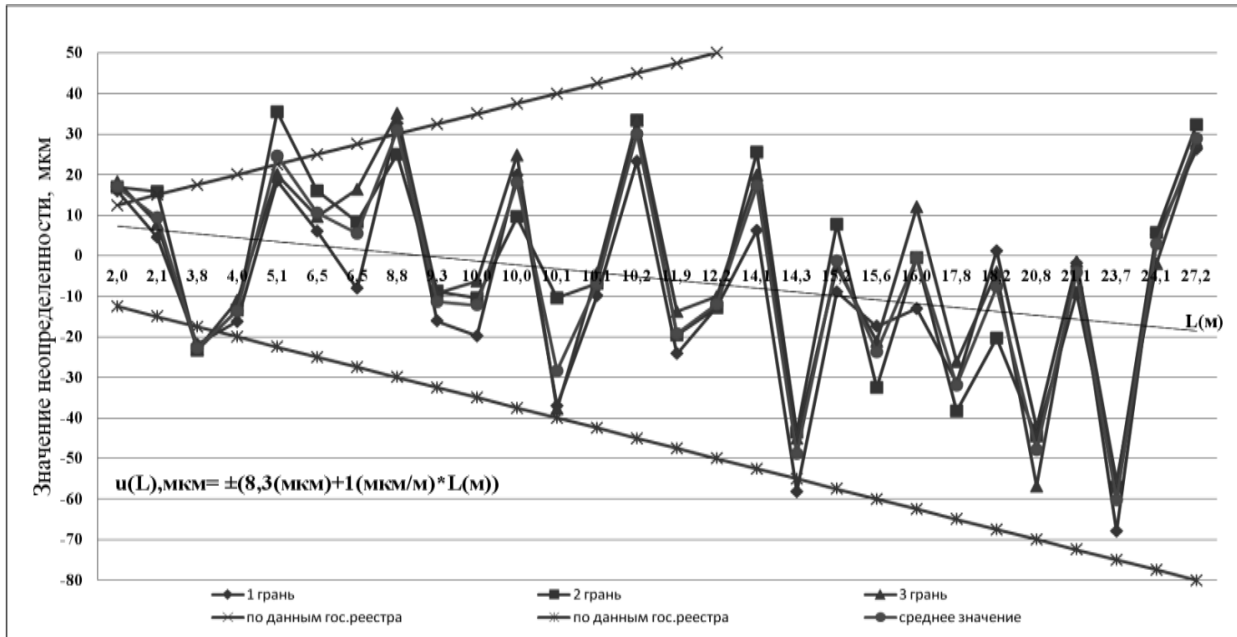


Рисунок 4.25 – Исследование длины линий в пространстве прямоугольных координат, вычисленных по измеренным сферическим координатам

4.6 Экспериментальные исследования измерительных систем «цифровой нивелир + две штрих-кодовые рейки»

4.6.1 Исследование нанесения отдельных штрихов на инварной полосе штрих-кодовой рейки

Механическая реализация разработанного метода измерений показана на рисунках 3.26 и 3.27. Здесь в качестве эталона используется лазерный интерферометр.

При исследованиях были выявлены группы штрихов, среднее расстояние между соседними линейными размерами равнялось 100 мм. Наведение на края штрихов рейки осуществлялось микроскоп-микрометром, по результатам измерений вычислялись середины штрихов, расстояния между серединами штрихов в диапазоне

измерения по рейке сравнивались с показаниями лазерного интерферометра, по результатам измерений вычислялись середины штрихов

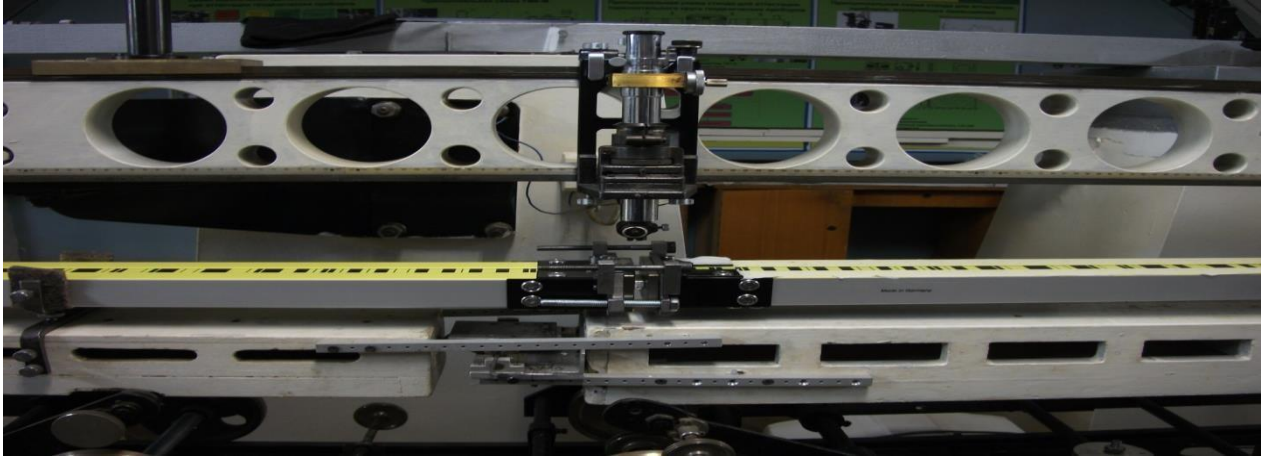


Рисунок 4.26– Исследования штрих-кодовых реек



Рисунок 4.27 – Исследования пяток реек

расстояния между серединами штрихов в диапазоне измерения по рейке сравнивались с показаниями лазерного интерферометра. Результаты исследований приведены на рисунке 3.23.

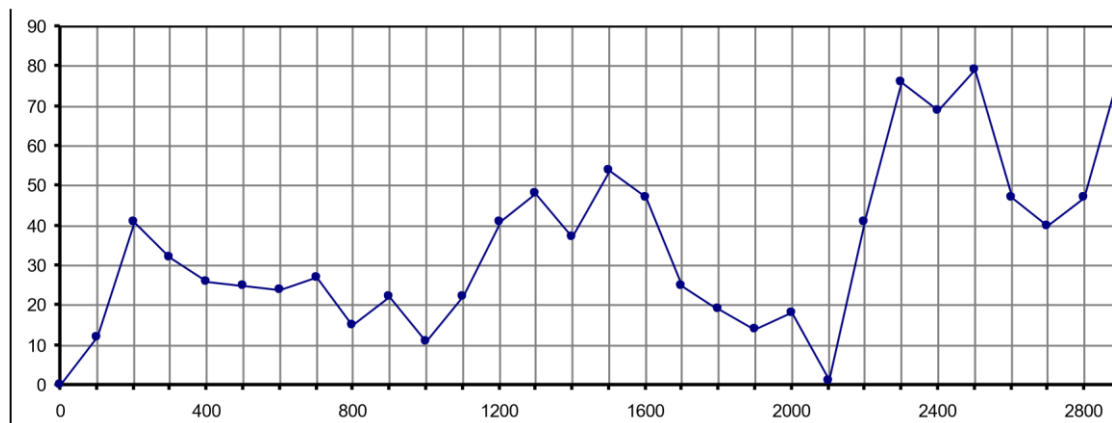
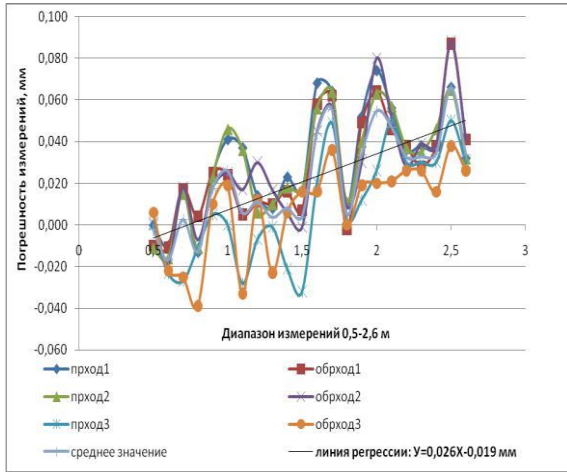


Рисунок 4.28 – Результаты исследований штрих-кодовой рейки

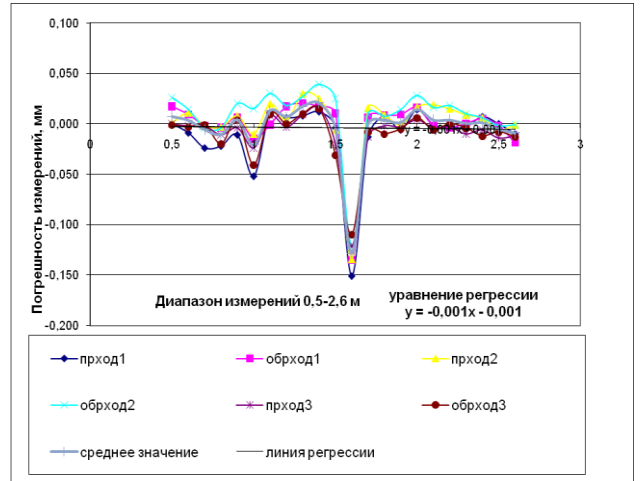
Из них видно, что отклонение нанесения отдельных штрихов на рейке от заданного значения отличается примерно на 80 мкм, носит явно нелинейный характер, который не совпадает с исследованием измерительной системы в целом. Разработанная методика утверждена как МИГК49-2011, при ее разработке автор принимал непосредственное участие.

4.6.2 Исследование измерительных систем с цифровыми нивелирами

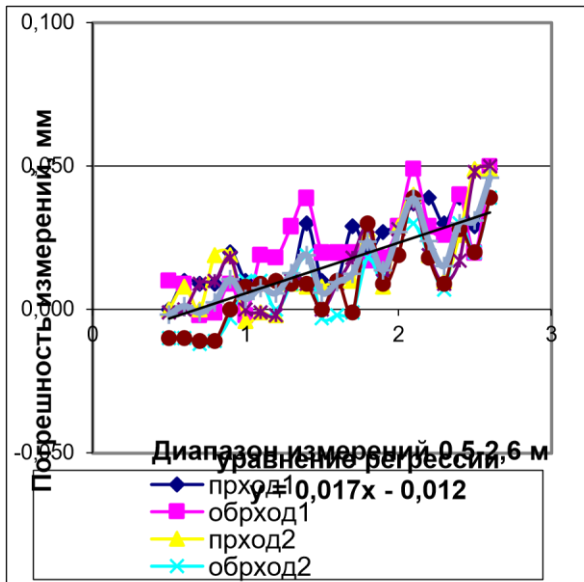
Результаты наблюдений при калибровке двух ИСЦН в течение пяти лет приведены на рисунках 3.29 и 3.30.



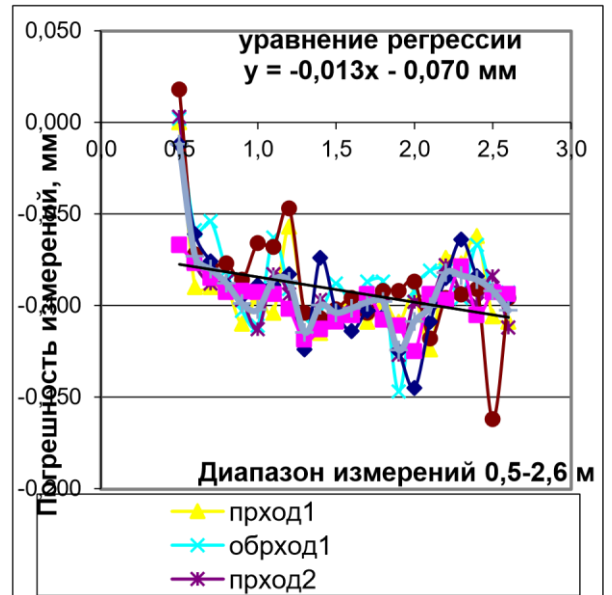
а)



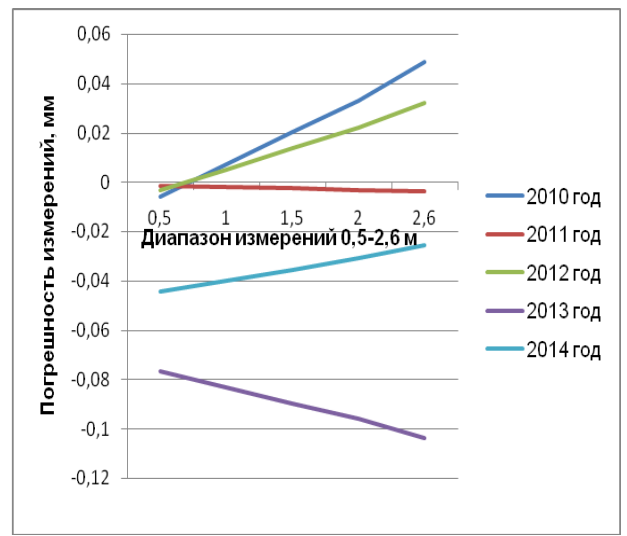
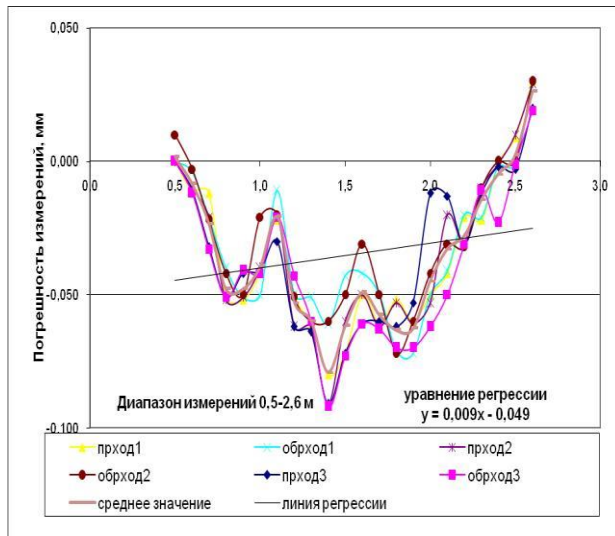
б)



в)



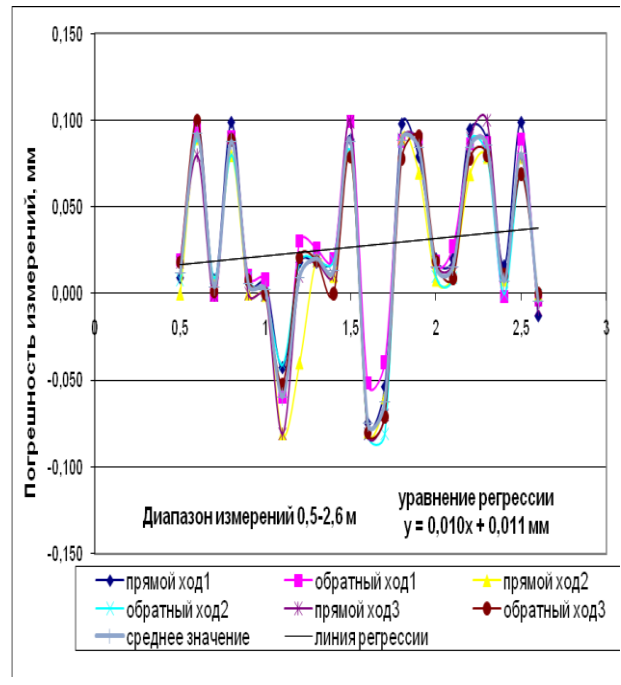
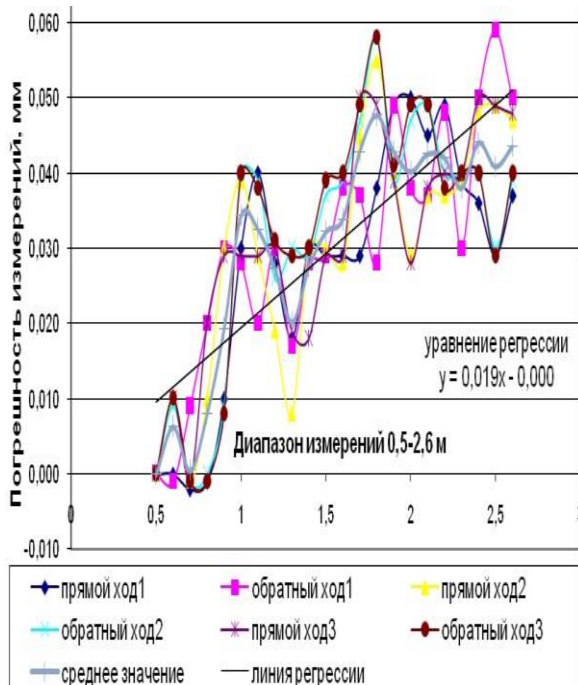
г)



д)

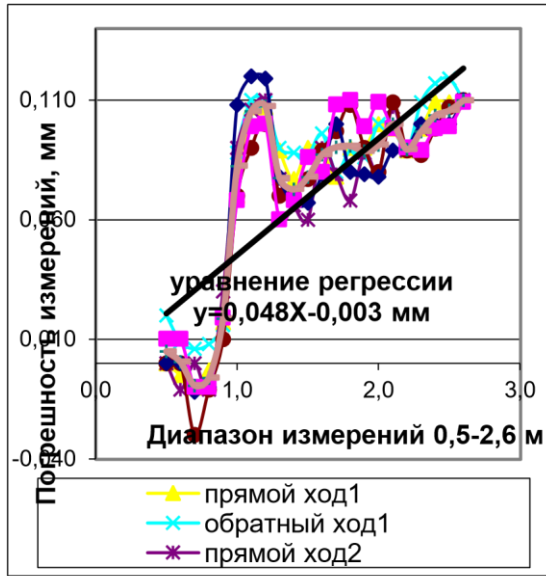
е)

Рисунок 4.29 – ИС №1: а – 2010 г., б – 2011 г., в – 2012 г., г – 2013 г., – 2014 г., е – линии регрессии погрешности измерений по годам

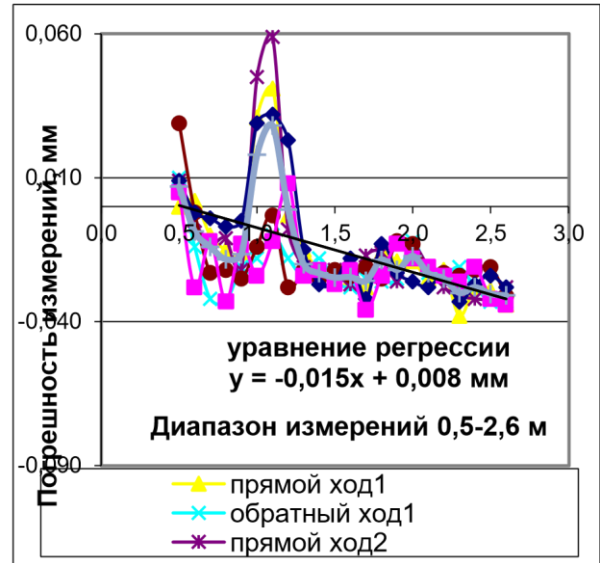


а)

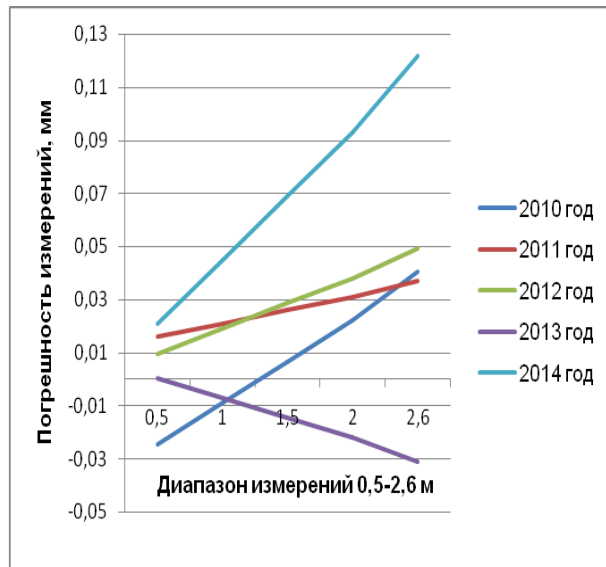
б)



В)



Г)



Д)

Рисунок 4.30 – ИС №2: а – 2010 г., б – 2011 г., в – 2012 г., г – 2013 г., д – 2014 г.

Приведенные результаты исследований доказывают нелинейный характер ПИ в диапазонах измерений и ее изменение с течением времени, что можно объяснить

подверженностью инварных шкал к ударам. В соответствии с разработанным Протоколом калибровки Белорусской фирмой «Кредо-Диалог» создана опция для ЭВМ, позволяющая вводить поправки по результатам калибровки в производственные измерения, в диссертационной работе прилагается справка о внедрении результатов разработки.

4.6.3 Выявление погрешности измерений превышений измерительной системой «нивелир+рейка» с использованием концевых мер длины

Разработанный метод выявления ПИ превышений ИСЦН с использованием концевых мер длины позволяет выявить короткопериодические ПИ системы “нивелир + штрих-кодовая рейка” на любых расстояниях от нивелира до рейки, как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Для проведения исследований в работе были выбраны три высокоточных нивелира: оптический Н-05 и цифровые DiNi10 и Dini12, а также инварная штриховая и штрих-кодовые рейки длиной 3 метра. Работа проводилась в солнечный день в утреннее время при температуре около 20⁰С и в изолированном помещении лаборатории с той же температурой. МКСИ перед началом работы проверялись на соблюдение главного условия нивелира. Нивелиры устанавливались на штативы на одинаковом расстоянии от нивелируемых пунктов на одной высоте (высота цифровых нивелиров проверялась по их сеткам нитей визированием на штриховую рейку). Пять точек установки реек с концевыми мерами длины представляют собой неподвижные горизонтальные площадки (например, горизонтальные предметные столики). Расстояния от нивелиров до пяти точек нивелирования при экспериментальных исследованиях составляли: 3,5 м, 13,7 м, 29,0 м, 50,0 м, при этом максимальное расстояние, где ИСЦН

измеряли превышения, равнялось 86,5 м. В лабораторных условиях нивелирные точки находились на расстояниях 3,5 м, 13,7 м и 29,0 м. Для изменения высоты точки использовались, концевые меры длины II разряда (КМД), ПИ их размера не превышала 0,4 мкм [23]. На предметный столик устанавливалась соответствующая штриховая или штрих-кодовая рейка, и снимались отсчеты по трем СИ. Затем на столик устанавливалась и притиралась концевая мера и снова ставилась соответствующая рейка и снимались отсчеты. Изменение высоты при помощи концевых мер проводилось от нуля (пустая площадка) до 200 мм. Дискретность изменения высоты: от 0 до 10 мм составляла 0,5 мм; от 10 мм до 100 мм составляла 10мм; от 100 до 200 мм составляла 20мм; между мерой в 1 мм и 1,5 мм устанавливалась мера в 1,2 мм. Такая методика была использована на каждой из пяти нивелируемых точек в полевых условиях и трех в лаборатории. Во время работы нивелиры не передвигались, и их высота была неизменной. Инварная штрих-кодовая рейка приводилась в вертикальное положение при помощи накладного круглого уровня. Результаты исследований со штриховой инварной и четырьмя штрих-кодовыми рейками в полевых условиях приведены ниже на рисунке 4.26. Здесь по оси ординат отложена ПИ, полученная как разность между показаниями нивелира и значениями КМД. Из результатов исследований видно, что в диапазоне измерений от 0 до 10 мм НИ при использовании инварной штрихкодовой рейки не превысила $\pm 0,15$ мм, у обычных штрих-кодовых реек при этом наблюдаются выбросы до 0,4 мм. На рисунках 4.31÷4.32 приведены результаты исследований с одной и той же инварной штрих-кодовой рейкой в полевых (рисунок 3.31) и лабораторных (рисунок 4.32) условиях. Из них видно, что в лабораторных условиях на том же самом расстоянии от нивелира до рейки погрешность измерений значительно меньше (в три раза).

На рисунках 4.31÷4.38 приведены результаты исследований в полевых условиях для разных расстояний от прибора до рейки с одними и теми же нивелирами, но с разными инварными рейками.

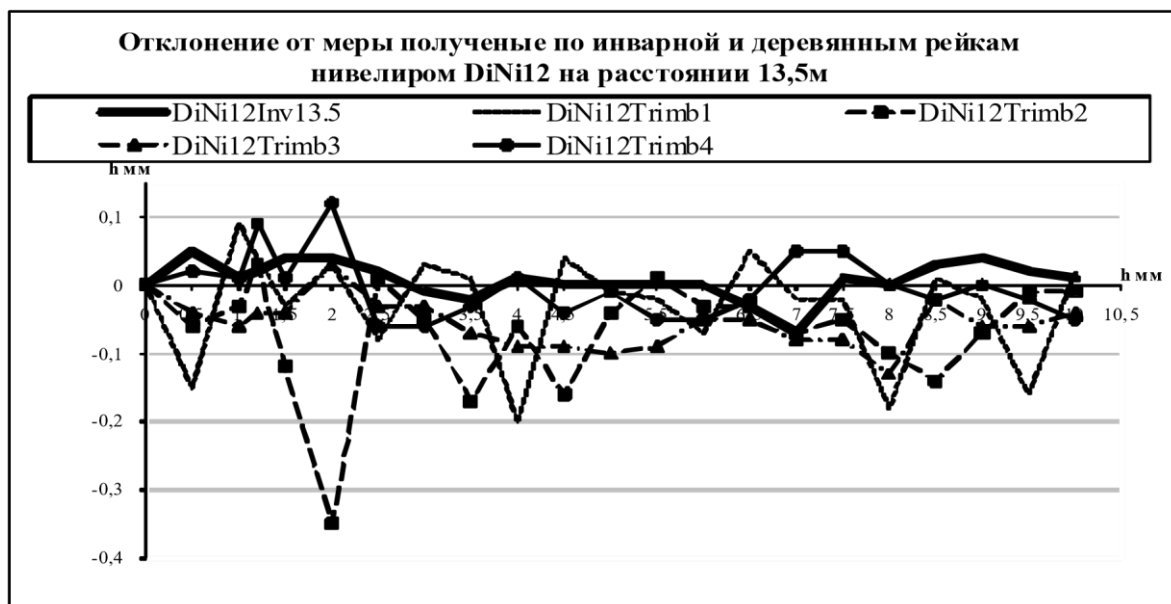


Рисунок 4.31

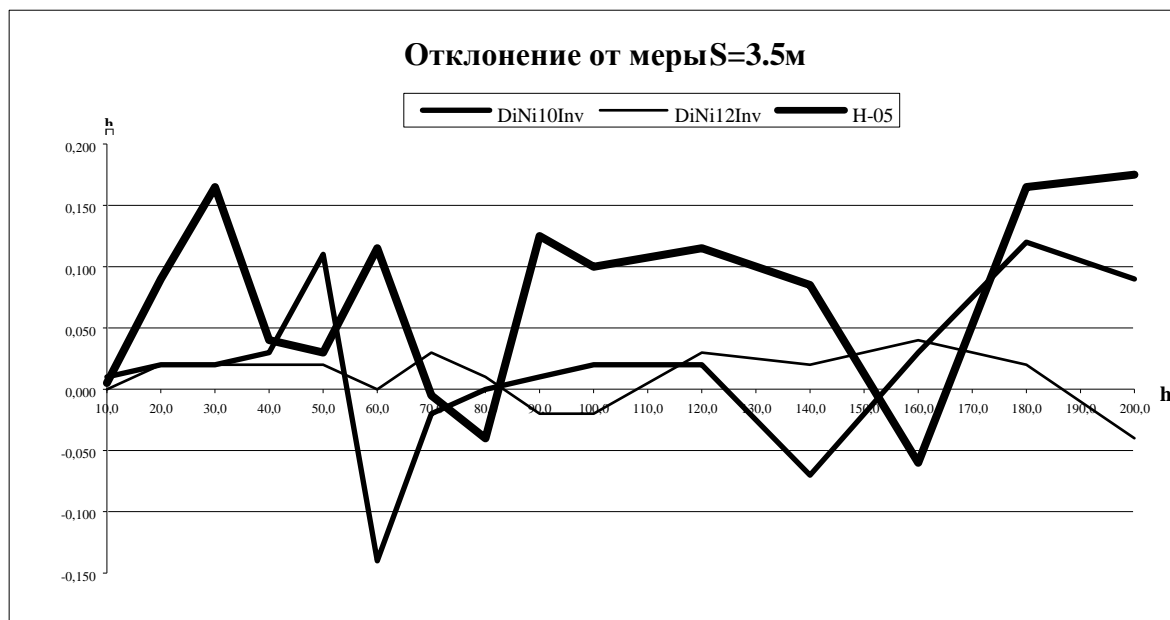


Рисунок 4.32

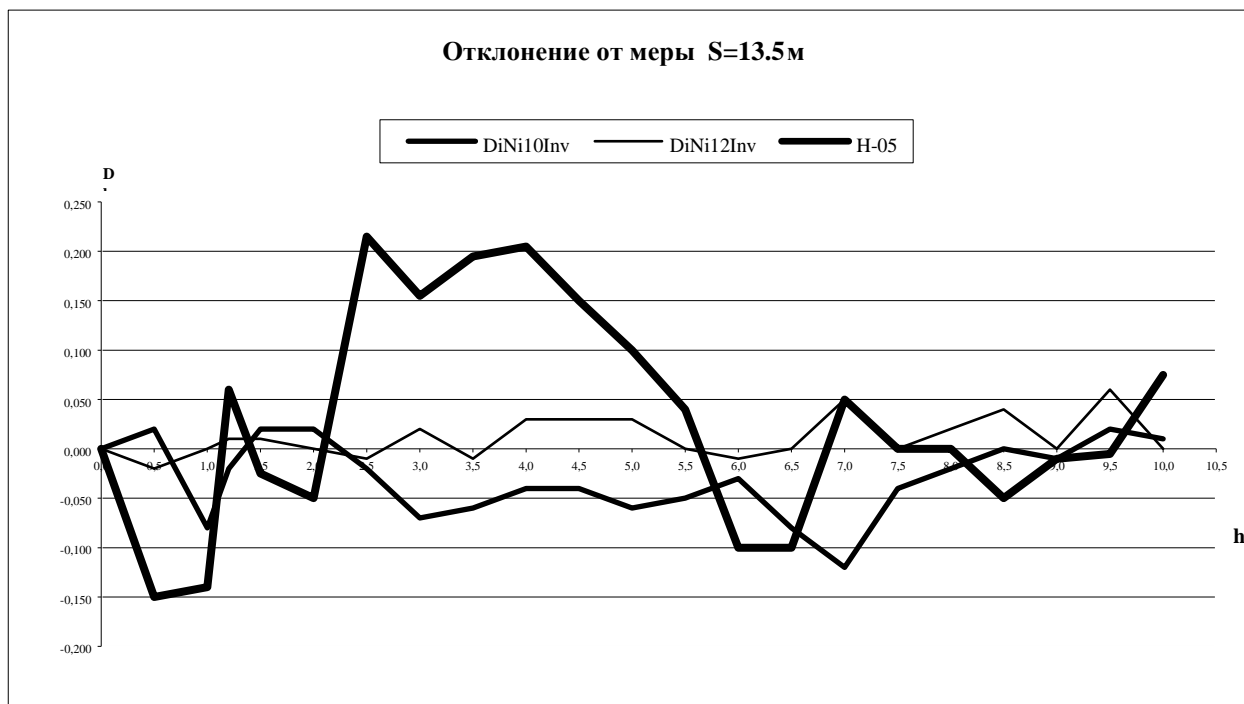


Рисунок 4.33

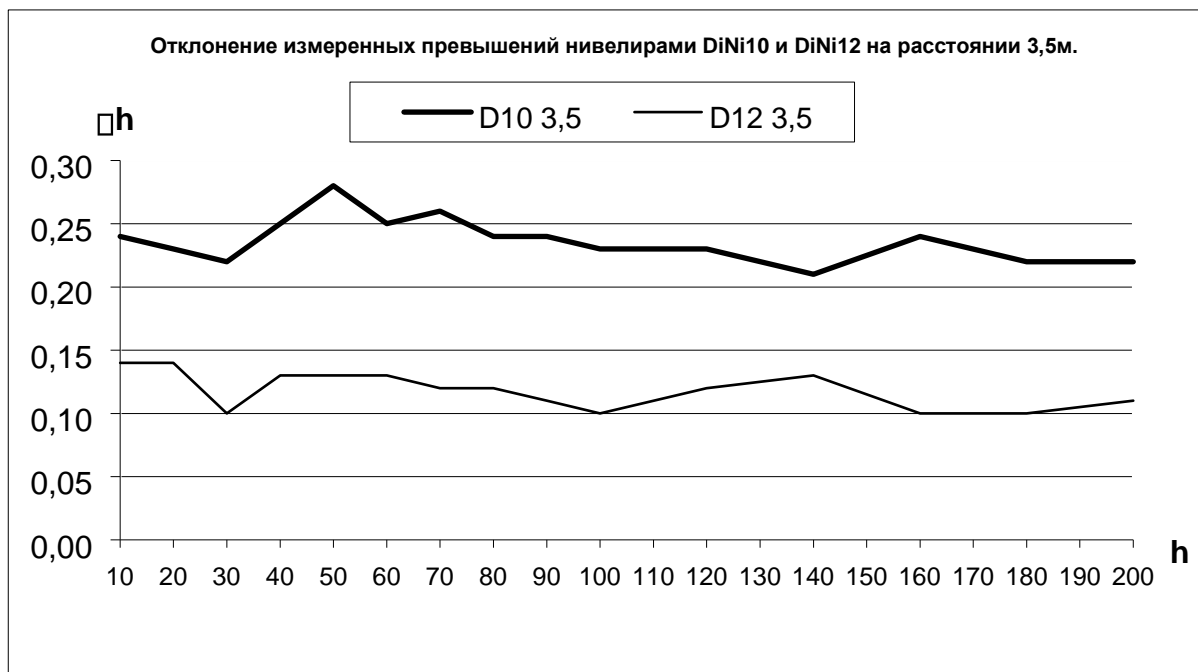


Рисунок 4.34

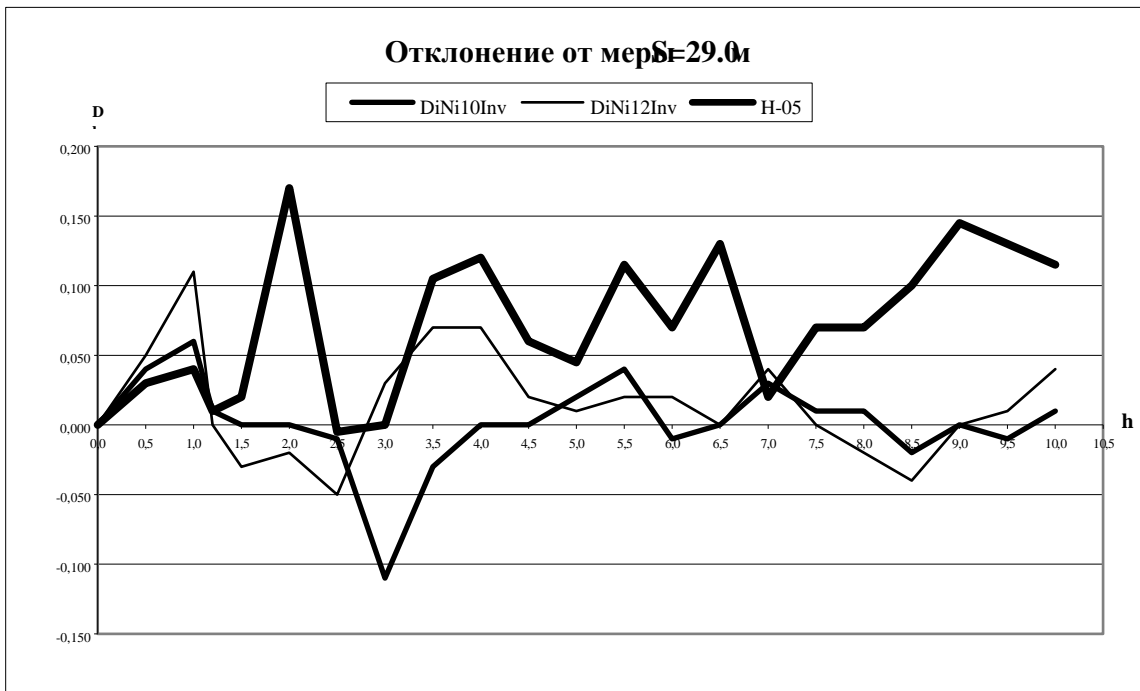


Рисунок 4.35

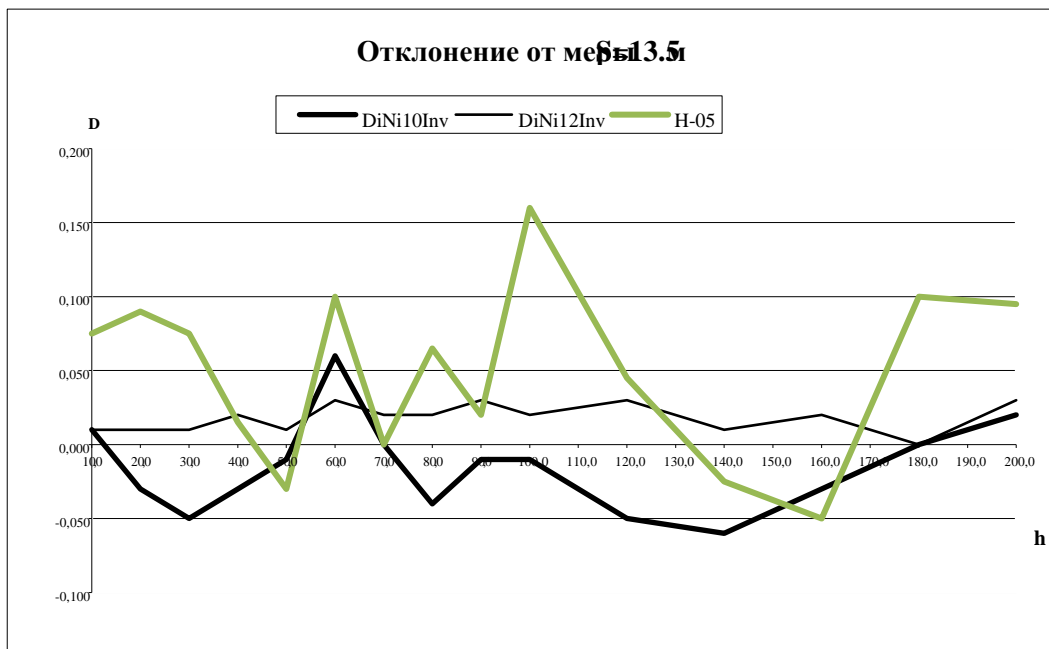


Рисунок 4.36

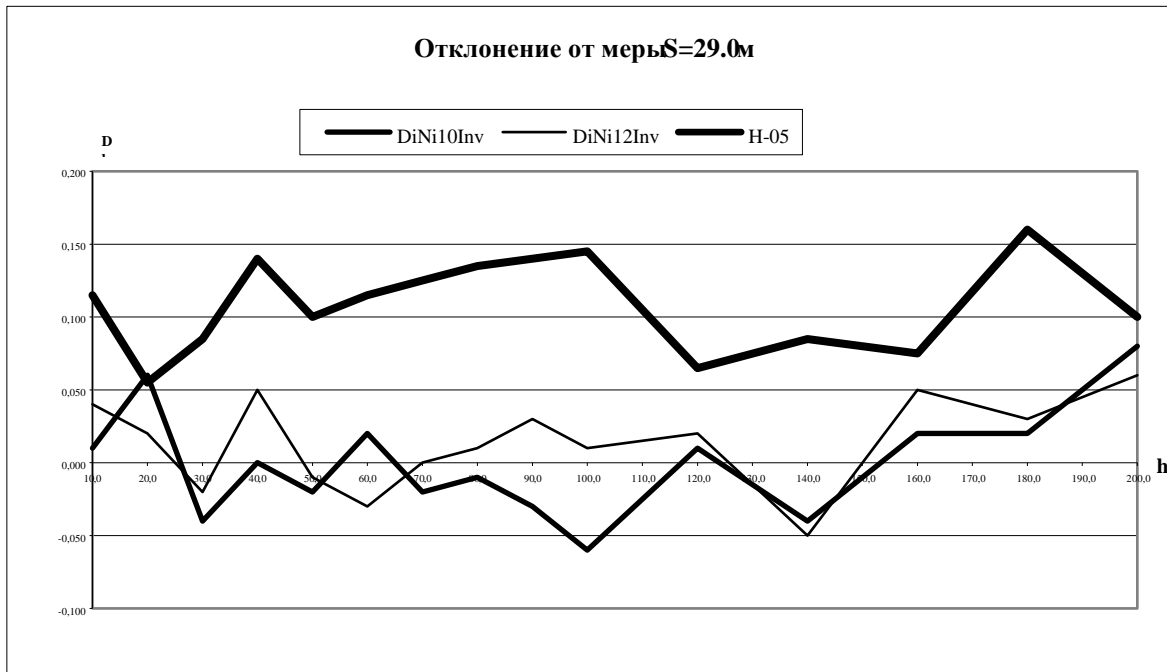


Рисунок 4.37

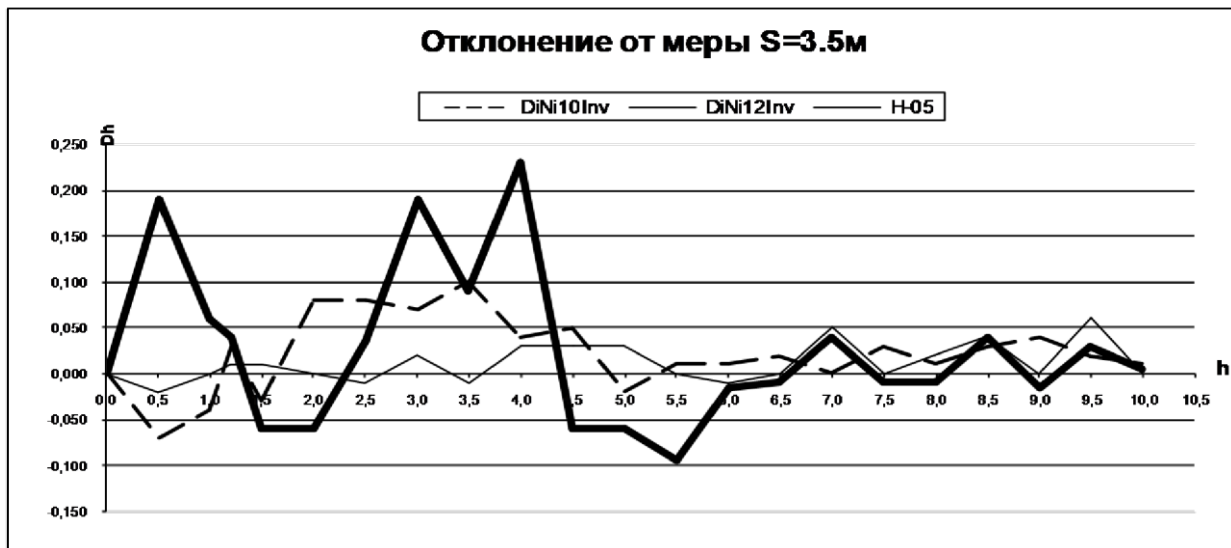


Рисунок 4.38

Из результатов измерений вытекают следующие выводы: с увеличением расстояния от нивелира до рейки растет и ПИ определения превышения. DiNi 10 на 3,5м имеет НИ 0,25мм, на 13,5м – 0,18мм, на 29,0м – 0,5мм, на 50м – 0,6мм и на 86,5м ПИ достигла 1,2мм. . DiNi 12 на 3,5м имеет 0,15мм, на 13,5м – 0,25мм, на 29,0м – 0,35мм, на 50м – 0,55мм и на 86,5м ПИ составила 1,2мм. Отсюда можно сделать вывод, что на расстояниях превышающих 30 метров ПИ превышений больше 1 мм.

Предлагаемый метод с использованием концевых мер длины позволяет производить исследование на больших расстояниях между нивелиром и рейкой.

4.6.4 Исследования ИСЦН на горизонтальном линейном компараторе

По разработанной в Главе 2 методике калибровки ИСЦН на горизонтальном линейном компараторе были выполнены исследования измерительной системы с цифровым нивелиром DINI-03. В качестве рабочего эталона использовался лазерный интерферометр. Результаты измерений из трех приемов показаны на рисунке 4.43. Из них видно, что размах показаний в пределах измерений 0,5□2,6 м не превысил 0,15 мм. В данном эксперименте отсчеты цифровым нивелиром по рейке брались с интервалом 100 мм.

На рисунке 4.44 показаны для сравнения результаты измерений с той же рейкой для нивелиров DINI-03 и DINI-12. Из них видно, что кривая ПИ для нивелира DINI-

03 практически повторяется с приведенной на рисунке 4.39, при этом

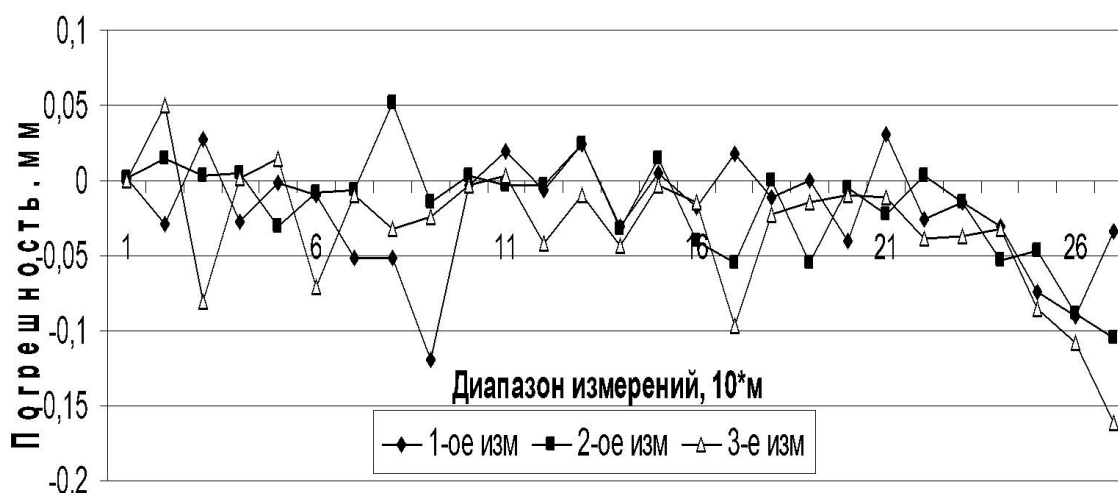


Рисунок 4.39

результаты измерений на рисунках 4.40 и 4.43 получены с разностью во времени один месяц. Температурные условия в обоих случаях сохранялись одинаковыми. На рисунке 4.44 приведены результаты измерений с инварной штрих-кодовой рейкой длиной 1 метр. Из них видно, что зависимость ПИ в диапазоне измерений по рейке носит явно выраженный нелинейный характер, при этом размах показаний в составляет не более 40 мкм.

Проведенные исследования подтверждают работоспособность разработанной функциональной схемы измерений. Ниже на рисунке 4.46 показаны результаты исследований измерительной системы «цифровой нивелир + три штрих-кодové рейки». Из них видно, что при измерениях с разными рейками ПИ значительно

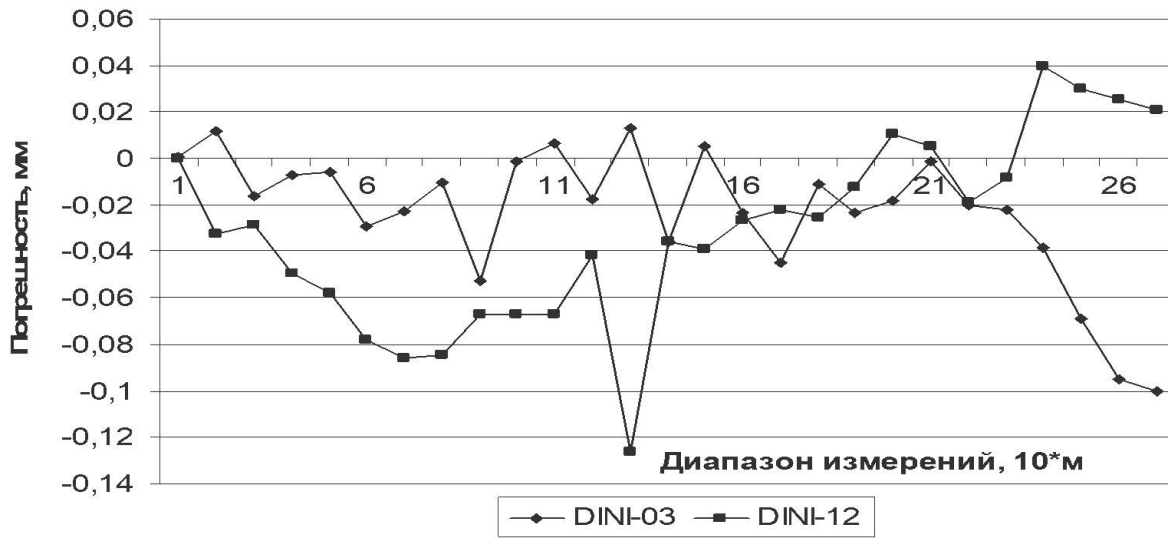


Рисунок 4.39

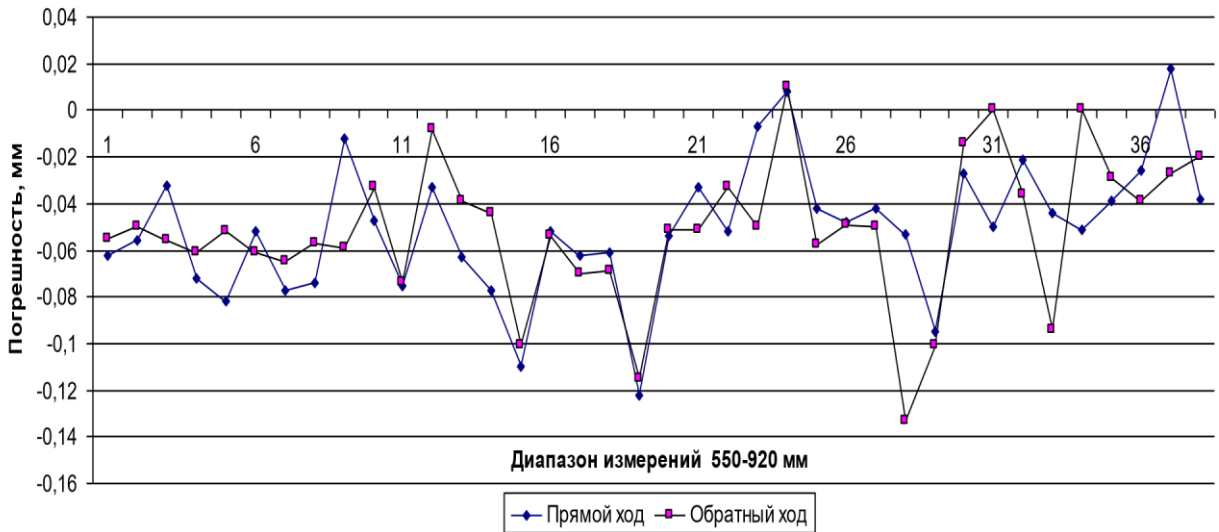


Рисунок 4.40

меняется (более, чем на 0,3 мм), что позволяет сделать вывод о том, что при калибровке и поверках необходимо подбирать пары реек к конкретному цифровому нивелиру, т.е. поверять систему в целом. Дальнейшее увеличение точности измерений при использовании ИС на производстве возможно за счет введения поправок за компарирование в отсчеты по рейкам.

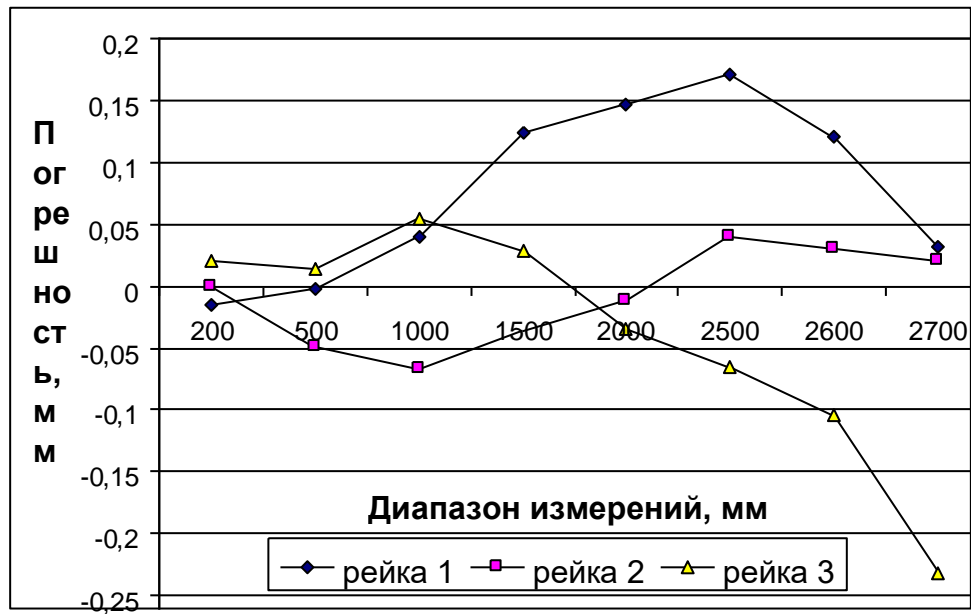


Рисунок 4.41

Многочисленные исследования ИСЦН показывают, что ПИ носит явно выраженный нелинейный характер, ее значение на разных интервалах рейки достигает порядка 0,4 мм. Введением поправок ее можно уменьшить до значений порядка 0,02–0,05 мм. При этом максимальное значение погрешности проявляется в начале и конце диапазона измерений. Поэтому график поправок целесообразно получать, начиная с отсчета 500 мм, при этом расстояние от пятки рейки до отсчета 500 мм для разных экземпляров колеблется в пределах ±0,4 мм и может, в связи с возможными ударами рейки, со временем может изменяться.

4.6.5 Исследование ИСЦН при горизонтальном и вертикальном расположении рейки

В штриховых рейках обеспечивалось натяжение шкалы и контролировалось натяжение инварной шкалы. В ИСЦН такой возможности нет, однако, еще в 1961

году в книге Иордана были опубликованы результаты исследований штриховых реек, из которых видно, что при горизонтальном расположении рейки

В штриховых рейках обеспечивалось натяжение шкалы и контролировалось натяжение инварной шкалы. В ИСЦН такой возможности нет, однако, еще в 1961 году в книге Иордана были опубликованы результаты исследований штриховых реек, из которых видно, что при горизонтальном расположении рейки наблюдается ПИ порядка 0,1 мм относительно вертикальной рейки (в книге Иордана за 1961 год приведены исследования немца Пешеля, который показал, что отличие не более 13 мкм).

В данной работе были проведены исследования ПИ штрих-кодовой рейки при горизонтальном и вертикальном ее расположении. Результаты исследований показаны на рисунках 4.42 и 4.43. Из них видно, что при разных положениях рейки отклонение значений ПИ составляет порядка 100 мкм и это необходимо учитывать при их калибровке.

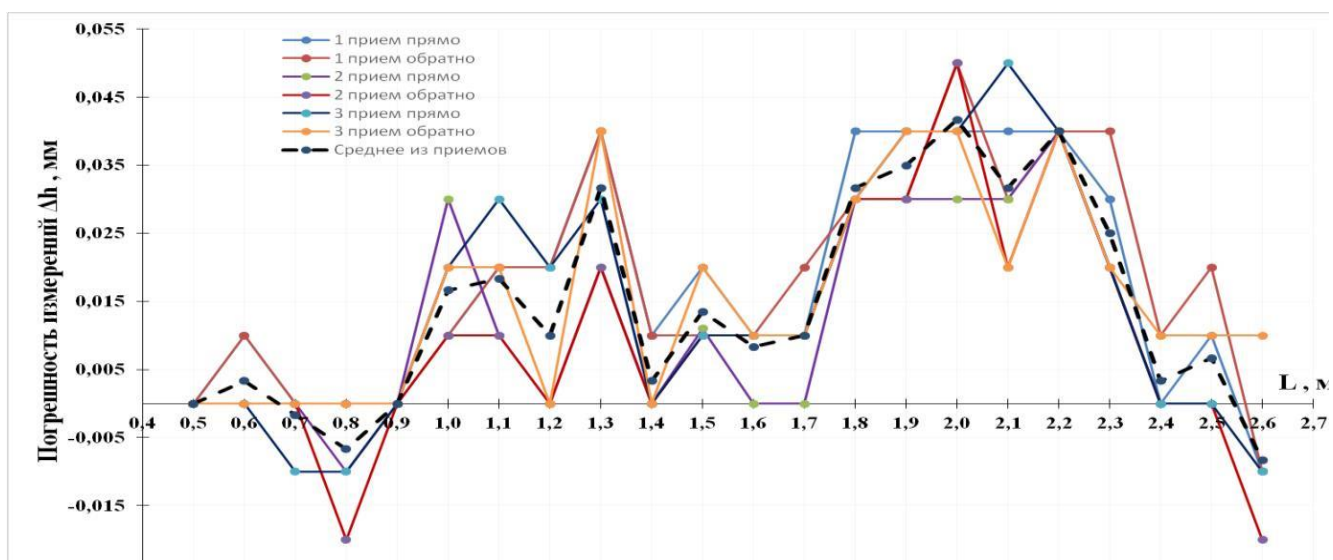


Рисунок 4.42 - Исследования ИСЦН при калибровке с горизонтальной рейкой

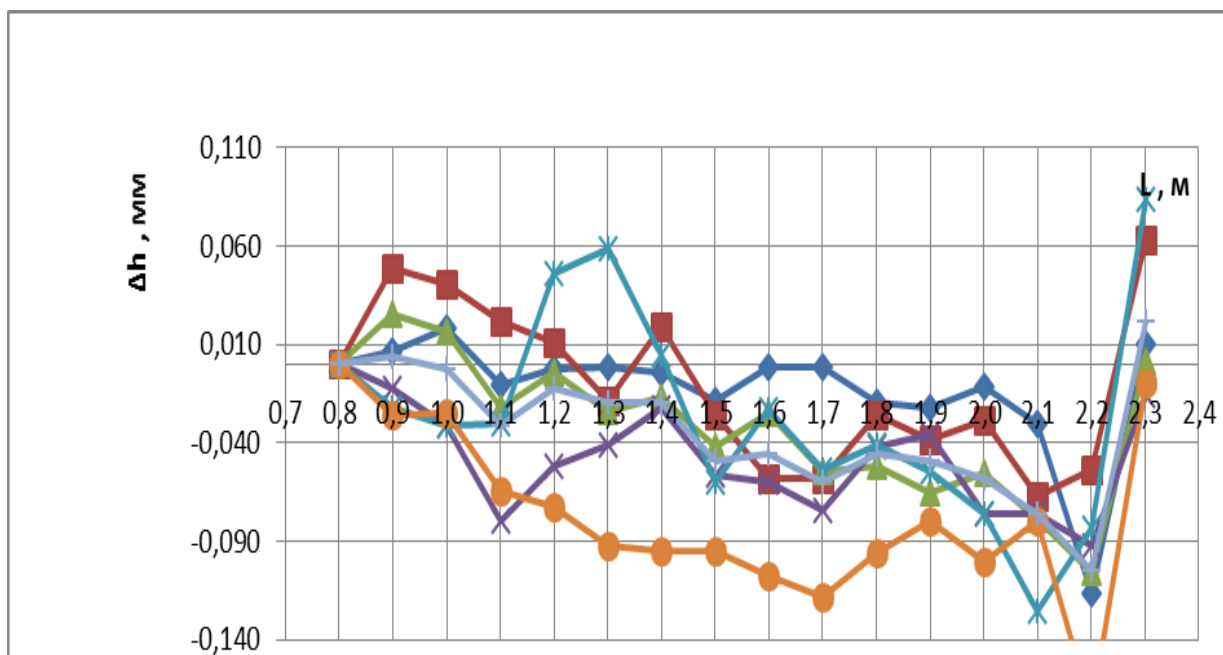


Рисунок 4.43 - Исследования ИСЦН при калибровке вертикальной рейкой

4.6.6 Разработанная методика измерений измерительными системами с цифровым нивелиром и двухпяточными рейками позволяет результаты измерений в реальных условиях эксплуатации

Из проведенных исследований видно, что одной из существенных составляющих ПИ является ПИ, связанная с влиянием внешних условий. Для учета влияния внешних условий в производственных условиях была разработана и запатентована методика измерений и изготовлена рейка с двумя пятками. Разработанная методика измерений позволяет использовать результаты калибровки рейки в производственных условиях (по изменению длины рейки между пятками).

Методика измерений состоит из следующих этапов:

1. Калибруют пару двух пяточных реек, вычислив размеры между пятками в нормальных условиях h_{ni}
2. Нивелир устанавливают между рейками,
3. Берут отсчеты: h_{ai} - по задней рейке и b_i - по передней рейке
4. Переворачивают обе рейки на 180° на те же точки, берут инверсные отсчеты h^* и h^* , получают:
превышения по задней рейке $h = h_{ai} + h_{ai}^*$,
превышения по передней рейке $h_{bi} = h + h_{bi}^*$,
5. Вычисляются и распределяются пропорционально отсчетам поправки за температуру инвара:

$$\Delta_a = h_{на} - h_a, \delta_b = h_{нв} - h_b$$

При производственных измерениях вычисляют разность между полученной длиной между пятками и длиной, полученной в процессе калибровки. Полученная разность пропорционально отсчету по рейке вводится в прямой результат измерений.

Выводы по Главе 4

Проведенные экспериментальные исследования разработанного оптикоэлектронного комплекса и 1D÷3D координатных средств измерений на нем доказывают, что погрешность измерений имеет практически во всех случаях явно нелинейный характер, короткопериодические составляющие соизмеримы с допускаемой основной погрешности измерений, их учет путем введения поправок по результатам исследований в результаты текущих измерений позволит повысить точность и надежность измерений.

Проведенные экспериментальные исследования погрешности измерений на разработанном оптико-электронном комплексе подтверждают теоретические научные Положения, разработанные в данной работе.

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;
2. 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.

3. В диссертации разработана и исследована научно-техническая основа 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.

4. 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 МКИ,

- 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,

5. 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.

6. 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-х 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 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 основе 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 рек 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 высоко-

технологичных 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÷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°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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамонис И.Ю., Кузмицкас Р.А., Рагайшис В.Л. Автоматизация контроля преобразователей линейных перемещений на опытном заводе “Прецизика” // Станкостроение Литвы. - 1988. - №20. – с.157÷161,
2. Андрусенко А.М., Генике А.А., Герасименко М.Г., Пушкарев Г.П., Сугачев О.Л. Метрологическое обеспечение измерений в диапазоне 24 – 75000 м // Измерительная техника. – 1987. - №7. – С. 17,
3. Белоцерковский В.И. Система государственных испытаний средств измерений в СССР. – М.: ВНИКИ, 1983. – 28 с.,
4. Блюмин М.А., Свистунов М.К., Эдлин Ф.З. Результаты исследований светодальномеров СП-2 // Геодезия и картография. – 1989. - №9. – С. 12-16,
5. Богуславский М.Г., Цейтлин Я.М. Приборы и методы точных измерений длины и углов. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 247 с.,
6. Болонин А.А. Анализ погрешностей интерференционного компаратора штриховых мер длины // Исследования в области линейных и угловых измерений. - 1988. – с. 19÷25,
7. Болонин А.А., Федорин В.Л., Хавинсон Л.Ф., Шур В.Л. Интерференционный компаратор для аттестации штриховых мер и концевых мер длины // Измерительная техника. - 1984. - №11. – с.21÷23,
8. Большаков В.Д., Деймлих Ф. и др. Радиогодезические и электрооптические измерения: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 303 с.,
9. Визиров Ю.В. Метрологический контроль штрих-кодовой нивелирной рейки // Измерительная техника. – 2002. - №1. – с. 41 – 43,
10. Воронцов Л.Н. Фотоэлектрические системы контроля линейных величин. – М.: Машиностроение, 1985. – 236 с.,
- 11, Высокоточные угловые измерения / Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с., ил.,

12. Вязовец С.В. Почему им выписали извещение о непригодности // Геодезист. – 2001. - №1. – С. 28 – 30,
13. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1983. – 456 с., ил.,
14. Бахарев Е.С., Голыгин Н.Х. Степочкин А.А. Травкин С.В. Исследование оптико-электронных геодезических приборов и устройств для аттестации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. - №5. – с. 123 – 135,
15. Исследовательские и экспериментальные работы по созданию оптоэлектронных узлов на базе интегральных фотоприемников, лазерной техники и волоконной оптики к устройствам средств измерений и автоматизации контроля размеров. – Отчет о НИР/ВНИИизмерения. Рук. Темы Голыгин Н.Х. – № ГР 01.83.0 037087. – М.: ВНИИЦ, 1985. – 119 с.,
16. Голыгин Н.Х. Установка для контроля параметров голографических дифракционных решеток. Сб. «Голографические методы в науке и технике». – Л.: ЛИЯФ, 1985. – с. 27-29,
17. Голыгин Н.Х. Исследование первичных погрешностей фотоэлектрических растровых преобразователей линейных перемещений. Материалы 3-ей конференции молодых ученых и специалистов приборостроительной промышленности. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1986. – с.23-24,
18. Голыгин Н.Х. Влияние первичных погрешностей преобразователей с голографическими дифракционными решетками на погрешность измерения // Метрология. - 1988. - №2. – с. 41-45,
19. Голыгин Н.Х., Гладырь В.И., Степанов А.В. Голографические преобразователи линейных перемещений. Сб. “Современные проблемы в системе метрологического обеспечения”, под ред. В.А. Боднера. – М.: ВЗМИ, 1985. – с. 69-71,
20. Голыгин Н.Х., Степанов А.В. Высокоточный контроль линейных перемещений в технологии машиностроения // Технология, организация и экономика машиностроительного производства. – 1985. - №7, - с. 23-25,

21. Голыгин Н.Х. Методика измерения перемещений на компараторе БВ-2035. Материалы конференции "Разработка и аттестация методик выполнения измерений". – Пенза: ПНДНТП, 1989. – с. 48-49,
22. Визиров Ю.В., Вильчинский Ю.А., Голыгин Н.Х. Лазерные рулетки в геодезических работах // Геодезия и картография. - 2002. - №11. – с. 18-22,
23. Голыгин Н.Х., Шаимкулов Д.А. Исследование внутришаговой коротко периодической погрешности цифрового нивелира DINI-10 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2003. - №5. – с. 106-111,
24. Голыгин Н.Х., Хиноева О.Б., Ямбаев Х.К. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №4. – с. 17-27,
25. Голыгин Н.Х., Бахарев Е.С., Степочкин А.А., Травкин С.В. Исследования оптико- электронных геодезических приборов и устройств для их аттестации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №5. – с. 123-135,
26. Голыгин Н.Х., Салунин Н.В., Шилин В.А. Преобразователь положения визирной системы на основе координатно-чувствительного приемника излучения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №3. – с. 88-93,
27. Голыгин Н.Х., Шилин В.А. О повышении точности угловых измерений в геодезии // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №5. – с. 94-97,
28. Голыгин Н.Х., Салунин Н.В., Шилин В.А. Оценка точности образцовой Установки для измерительных систем геодезических приборов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - №6. – с. 125-128,
29. Голыгин Н.Х., Ямбаев Х.К. Измерительный комплекс для аттестации оптико-электронных геодезических приборов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. – №6. – с. 113-117,
30. Голыгин Н.Х., Травкин С.В. Стенд для аттестации вертикальных угловых

измерительных систем геодезических приборов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - №2. – с. 128-131,

31. Бахарев Е.С., Голыгин Н.Х., Бахарев Е.С., 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,

32. Голыгин Н.Х., Шилин В.А. Стенд для поверки горизонтальных измерительных систем угловых перемещений геодезических приборов // Приборы. - 2006. – №5. – с. 55-56,

33. 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,

34. Голыгин Н.Х., Лазуткин А.М., Пегливанян Г.Г. Исследование погрешности измерений цифровых нивелиров DINI-03 и DINI-12 с инварными штрих-кодowymi рейками // Приборы. - 2009. - №4. – с. 52-56,

35. Голыгин Н.Х., Ковалев С.В., Лебедев С.В., Пегливанян Г.Г., Федосеев Ю.Е. Поверка и калибровка цифровых нивелиров и штрих-кодowych реек // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2009. - №2.,

36. Голыгин Н.Х., Степочкин А.А. Перспективы развития и использования оптико-механического компаратора МИИГАиК. - Материалы международной научно-технической конференции “Геодезия, картография и кадастр – ХХ1 век”, М.: МИИГАиК, 2009. - с. 244-245,

37. 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,

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

39. 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,

40. 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,
41. Голыгин Н.Х. Широкодиапазонный компаратор для поверки и калибровки координатных средств измерений / пат. РФ № RU2401985 С1. – МПК G01C 3/00,
42. Голыгин Н.Х. Стенд для поверки и калибровки цифровых нивелиров и штрих-кодовых реек/ пат. РФ № RU2419070. – МПК G01C 5/00,
43. Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д. Поверочный комплекс координатных приборов и измерительных систем / пат. РФ №2494346. – МПК G01C 25/00,
44. Голыгин Н.Х., Черепанов П.А. Стенд для поверки и калибровки цифровых нивелиров и штрих-кодовых реек / пат. РФ № RU2419766. – МПК G01C 5/00,
45. Голыгин Н.Х., Черепанов П.А. Стенд для поверки и калибровки штрих-кодовых реек/ пат. РФ № RU 2500987. – МПК G01C 5/00,
46. Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение. – Тверь: ООО ИПП “АЛЕН”, 2006. – 592 с.,
47. Городецкий Ю.Г. Конструкция, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. – М.: Машиностроение, 1971. – 375 с.,
48. Р.Готтвальд (Швейцария), Ж.Рюгер (Австрия) Поверка электронных тахеометров в полевых условиях // Геодезист. – 2001. - №5. – С. 29,
49. ГОСТ 8.009-84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений,
50. ГОСТ 8.395-80. Нормальные условия при поверке. Общие требования,
51. Лысенко В.Г. Разработка и исследование системы обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей: Дис. д-ра техн. наук : 05.11.15 Москва, 2005 438 с. РГБ ОД, 71:06-5/128
52. Кеткович А.А., Яковлева Н.И., Чичигин Б.А. Лазерная компьютерная система контроля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 // Контроль. Диагностика. – 2007. - № 3. – с. 32-34,
53. Криксунов Л.З., Мехряков В.И., Найговзин О.И. Частотно - временные и

пространственно - частотные характеристики оптических модулирующих устройств М.: Машиностроение, 1972. – 132 с.,

54. Russ J.C., Dehoff R.T. Practical Stereology, 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, 2000. – 382p,

55. Елисеев С.В. Геодезические инструменты и приборы. – М.: Недра, 1973. – 392 с.,

56. Жуков А.В. Современные универсальные электронные тахеометры // Геодезист. - 2002. - №1. – С. 27 – 30,

57. Земских Г.В., Кортев Н.В. Маркшейдерско-геодезические приборы. Учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: УГГГА, 1995. – 97 с.,

58. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем: Учебник для вузов. – М.: Логос, 2000. – 584 с., ил.,

59. Зимин В.Н. Стенд для исследования угломерных инструментов // Геодезия и картография. – 1983. - №4. – С.112 – 122,

60. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 496 с., ил.,

61. Разработка, изготовление и аттестация информационно-измерительного комплекса с голографическими дифракционными решетками для линейных размеров. Отчет о НИР/ ВНИИизмерения. Рук. Темы Голыгин Н.Х., № ГР 01.8.80 059519. – М.: ВНИИЦ, 1988. – 59 с.,

62. Карсунская М.М. Геодезические приборы. – М.: Институт оценки природных ресурсов, 2002. – 186 с.,

63. Карсунская М.М., Ямбаев Х.К. Анализ влияния инструментальных ошибок в накопительных растровых датчиках направлений с использованием компьютерной модели датчика// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - №4. – с. 115-128,

64. Каяк Л.К. Поверка лимбов теодолитов и других угломерных приборов по образцовым многогранным призмам // Измерительная техника. - 1968. - №3. - с. 64-73,

65. Климов О.Д. Применение принципа автоколлимации при исследовании

астрономических инструментов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1982. - №4. – С. 82-89,

66. Кириллов М.А., Эйдинов А.В. Опыт аттестации лазерных интерферометров // Измерительная техника, 1984. - №11. – с.24÷25,

67. Коронкевич В.П., Ханов В.А. Современные лазерные интерферометры. – Новосибирск: Наука, 1985. – 180 с.,

68. Коронкевич В.П., Ханов В.А. Лазерные интерферометры и их применение. – Новосибирск: Изв. ИАиЭ СО АН СССР, 1984. – 102 с.,

69. Кривенков В.В. Автоматический контроль и поверка преобразователей угловых и линейных величин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 247 с., ил.,

70. Корешков Н.А. О компарировании инварных реек на полевом контрольном превышении // Геодезия и картография. – 1989. - №8. – С. 14-16,

71. Координатные измерительные машины и их применение. – М.: Машиностроение, 1988. – 327 с.,

72. Лизунов В.Д. О поверке измерителей перемещений лазерных / Материалы Всесоюзного научно-технического семинара “Внедрение прогрессивных методов и средств размерного контроля, точных измерений длин и углов”. – Л.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1984. – с.76÷77,

73. Майзенхаймер Д. Новое поколение тахеометров компании Zeiss/Spectra PRECISION // Геодезист. – 2001. - №3. – С. 30-31,

74. Мироненко А.В. Фотоэлектрические измерительные системы. – М.: Энергия, 1967. – 360 с.,

75. Чекирда К.В. Совершенствование и исследование государственного первичного эталона единицы длины. Дисс. На соискание ученой степени канд. техн. Наук. – СПб.: ВНИИМ, 2013. – 128 с., ил.,

76. Митрофанов С.С. Автоматизация методов и средств измерительного контроля преобразователей круговых перемещений. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 250 с.,

77. Мартынов В.Т. Аттестация высокоточных лимбов. – Труды ВНИИМ

им. Д.И. Менделеева, вып. 199(259). – Л.: Энергия, 1976. – с. 36-37,

78. Парвлюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Стенд для метрологической аттестации высокоточных угломерных приборов// Известия высших учебных заведений.

Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - №6. – с. 157-162,

79. Парвлюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Векторная модель стенда для метрологической аттестации высокоточных угломерных приборов// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - №6. – с. 151-157,

80. Парвлюсов Ю.Б., Карсунская М.М. Автоматизированная система визирирования для электронных теодолитов// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1994. - №1. – с. 119-127,

81. Патент Великобритании №1355975 кл. С013.7, 1981,

82. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров: Пер. с польск. – М.: Мир, 1989. – 335 с., ил.,

83. Плотников В.С. Геодезические приборы: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. - 396 с., ил.,

84. Потапов Е.П., Залкинд Л.Р., Скопцова В.В. и др. Образцы прецизионного оборудования для изготовления и аттестации высокоточных мер длины / В кн. "Автоматизированные измерительные машины и комплексы в прецизионном станкостроении". – М.: ЭНИМС, 1980. – с.55 ÷ 57,

85. Пресс Ф.П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1981. – 136 с.,

86. Ржевский В.Г., Цидулко Ф.В. Поверка концевых мер длины с использованием ЭВМ / Материалы семинара "Использование вычислительной техники в метрологии при измерении линейно-угловых размеров в машиностроении". – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1987. – с. 113 ÷ 115,

87. Рубичев Н.А., Фрумкин В.Д. Методы и средства поверки и метрологической аттестации средств измерений. – М.: Недра, 1986. – 56 с.,

88. Селиханович В.Г. Геодезия: Учебник для вузов. – Ч. 11. – М.: Недра, 1981. – 544 с.,

89. Спиридонов А.И., Кулагин В.И., Кузьмин А.М. Проверка геодезических приборов. – М.: Недра, 1981. – 159 с.,
90. Спиридонов А.И. Основы геодезической метрологии: Произв. – практ. изд. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2003. – 248 с., ил.,
91. Спиридонов А.И. Способы создания пространственного угла при исследовании лимбов // Геодезия и картография. - 1970. - №9. – С.134 – 152,
92. Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. Оптико-электронные растровые преобразователи угловых и линейных перемещений// Измерение, контроль, автоматизация. - 1979. - №1. – с.44-50,
93. Солдатов В.П. Анализ некоторых способов ослабления погрешностей лимбов высокоточных оптико-электронных угломеров// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2002. - №1. – с. 122-128,
94. Травкин С. В. Метод определения погрешности измерения превышения высокоточными нивелирами с использованием концевых мер длины // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. – №3 – с. 97 ÷ 100,
95. Федотов А.И. Автоматизация делительных работ. – Л.: Машиностроение, 1977. – 302 с., ил.,
96. Цейтлин Я.М., Бржезинский В.М., Гопп И.Э., Сошников В.А. Автоматизированная установка для контроля точности широкопредельных преобразователей перемещений. – Л.: ЛДНТП, 1984. – 24 с.,
97. Шилин В.А. Погрешность растрового фазовращателя при треугольной функции пропускания растрового звена // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1987г. – №3. – С. 23-27,
98. Тахеометр электронный 3Та5Р. Руководство по эксплуатации. – УОМЗ. – 89 с.,
99. Яковлев В.В., Науменко Г.А. Практикум по лазерным светодальномерам и электронным тахеометрам: Учебное пособие / под ред. В.А. Яковлева. – Ростов на Дону: Рост. гос. строит. Ун-т, 2004. – 131 с.,

100. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник. – 5-е изд., перераб. И доп. – М.: Логос, 2004. – 472 с., ил.,
101. Брянкин С.Ю. Разработка и исследование методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных координатно-измерительных машин. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. Наук. – М.: ВНИИМС, 2011. – 183 с., ил.,
102. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х. Геодезическое инструментоведение. Практикум: Учеб. пособие для вузов. – М.: ЮКИС, 2005. – 312 с., ил.,
103. Heister H. Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 53, 45-53 S.,
104. Ingensand H. TPM – Ein neues Gerät zur vollautomatischen Prüfung von Teilkreisen in elektronischen Theodoliten. X. Internationaler Kongress für Ingenieurvermessung, München – 12 – 17, September. - 1988. S. A 6/1 – A6/12,
105. Pfeifer T. et al. Modulare Laserinterferometer als Werkzeugmaschinen. – Ind. Anz. - 1981. – Bd/ 103/ - №26. – S. 22÷27,
106. Laser Measurement system HP-5528A. – Hewlett Packard Company. - 1986. – 502 p.
107. Buschman E. Metrologische Grundlagen der Geodäsie. //Vermessungstechnik. – 1975. - №10. – S. 361 – 366,
108. Deumlich F. Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. VEB Verlag für Bauwesen. – Berlin. – 1988. – S. 31 – 36,
109. Sledzinski J., Kalinowska-Sledzinski B. Metrological laboratories as an indispensable tool in the activities of the national geodetic services. Proceeding of the United Nations. Regional cartographic conference. - 1985,
110. Heister H. Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 53, 45-53 S.,

111. Леховицер В., Липский Е., Балушок К. Новые технологии ускоренного получения заготовок лопаток авиадвигателей на базе систем быстрого прототипирования // Двигатель. – 2001. - №3. – с. 3-5,

112. Голыгин Н.Х. Поверка и калибровка оптико-электронных геодезических приборов // Материалы II международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка. На рубеже веков». – М.: Геопрофи. - 2011. – с.9,

113. Федосов К.В. Разработка и исследование метрологического обеспечения производства крупногабаритных конструкций в судостроении. Автореферат дисс. на соиск. Ученой степени канд. техн. наук. – М.: ВНИИМС, 2009. - 30 с., ил.,

114. Спутниковые методы определения координат пунктов геодезических сетей: учеб. пособие / В.Ф. Манухов, О.С. Разумов, А.И. Спиридонов, А.С. Тюряхин. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2009. – 108 с.,

115. Голыгин Н.Х., Спиридонов А.И. МИГК49-2011. – Методика поверки и калибровки штрих-кодовых нивелирных реек. – М.: ЦНИИГАиК, 2011. - 28 с.,

116. Ханох Б.Ю. Оптические отражатели тетраэдрического типа в активных системах. – Минск: изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982. – 160 с.,

117. Голыгин Н.Х. Схема обеспечения единства измерений при поверке и калибровке мобильных координатных средств измерений. Тезисы доклада IV международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка на рубеже веков. – Москва: изд. НПК «Йена Инструмент, 2013. – с. 28÷29,

118. ASME B 89.4.19-2006 Standard – Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems,

119. Калибровка координатно-измерительных машин // Главный метролог. - 2011. - №1. – с. 55÷59,

120. Выскуб В.Г., Розов Б.С., Савельев В.И. Прецизионные цифровые системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1984. – 135 с., ил.,

121. Голыгин Н.Х. Погрешности информационно-измерительных систем с голографическими решетками для линейных размеров в машиностроении. Дисс. на соиск. Ученой степени канд. техн. наук. – М.: ВНИИИзмерения, 1991. - 171 с., ил.,
122. 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,
123. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Часть 2. Обеспечение единства измерений: Учебник для вузов. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 240 с., ил.,
124. Голыгин Н.Х. Поверка и калибровка современных геодезических приборов. Тезисы докладов на 9-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». – Москва, 2013.
125. Анил К. Джей. Введение в искусственные нейронные сети.// Открытые системы. – 1997. - № 04. – с. 45-56,
126. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн.1–М.:ИПРЖР, 2000. – 416 с.,
127. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4: Учеб. пособие для вузов //Общая ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.: ил.,
128. Голыгин Н.Х., Федосеев Ю.Е., Черепанов П.А. Перспективы использования измерительных систем «цифровой нивелир+штрих-кодовая рейка»// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2013. – №6 – с. 113 ÷ 116,
129. Федосеев Ю.Е., Голыгин Н.Х., Еременко И.Б. Способ высокоточного геометрического нивелирования // патент РФ №2535230 – МПК G01C 5/00, опубл. Бюл. №34,
130. Соломатин В.А., Шилин В.А. Фазовые оптико-электронные преобразователи. – М.: Машиностроение, 1986. – 145 с.
131. 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 высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. – №1 – с. 22 ÷ 27,

132. Голыгин Н.Х. Поверка и калибровка современных геодезических приборов. Материалы Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (15-16 октября 2013 г.). – М.: Информационное агентство «ГРОМ», 2013. – с. 74÷75,

133. Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д., Непоклонов В.Б. Методика поверки и калибровки мобильных координатных средств измерений на поверочной установке «УМК-М МИИГАиК». Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки». - 14 февраля 2014 г. ч. 1. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. – с. 40÷44,

134. Голыгин Н.Х., Ключников Д.А., Сандулов Ю.А., Степочкин А.А. Наблюдения за изменением погрешности измерительных систем «Цифровой нивелир + штрих-кодовая рейка». Материалы 10-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». - М.: изд. «Проспект», 2014. - с. 28-34,

135. Ямбаев Х.К., Голыгин Н.Х. Геодезическое инструментоведение. Практикум: Учеб. пособие для вузов. – М.: ЮКИС, 2005. – 312 с., ил.,

136. Голыгин Н.Х., Ключников Д.А., Сандулов Ю.А., Степочкин А.А. Наблюдения за изменением погрешности измерительных систем «цифровой нивелир+штрих-кодовая рейка». Материалы 10-ой Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения». Сборник материалов. – М.: Изд. «Проспект», 2014. – с. 28÷33,

137. Уставич Г.А., Сальников В.Г., Рябова Н.М. Схема полевого высотного стенда для поверки системы «Цифровой нивелир – штрих-кодовые рейки» // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2014. – №4 – с. 51 ÷ 55,

138. ГОСТ Р 8.792-2012 ГСИ. Системы измерительные «цифровой нивелир – кодовая рейка. Методика поверки. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с., ил.

139. МИГК 49-2011 Методика выполнения измерений при поверке длины штрих-кодовых реек с использованием поверочной установки УМК-М. – М.: ЦНИИГАиК, 2011. – 18 с.,

140. Попов Н.Н., Голыгин Н.Х., Матвеев Д.С. и др. Влияние структуры материалов на размерную стабильность деталей оплотехники // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2015. – №2 – с. 105 ÷ 115,

141. Mikko Takalo and Paavo Rouhiainen. Development of a System Calibration Comparator for Digital Levels in Finland.- *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research VOL 1, 2004,*

142. *Georg Gassner, Robert Ruland, Brendan Dix. INVESTIGATIONS OF DIGITAL LEVELS AT THE SLAC VERTICAL COMPARATOR SLAC, Stanford University, P.O.Box 20450, MS 21, Stanford, CA 94309, USA,*

143. Woschitz, H. and Brunner, F.K. System Calibration of Digital Levels – Experimental Results of Systematic Effects. - *INGEO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying, Kopáček A and Kyrinovič P (eds), Bratislava, November 2002: pp 165-172,*

144. *Dr. Mikko TAKALO, Paavo ROUHIAINEN, Pekka LEHMUSKOSKI and Veikko SAARANEN. ON CALIBRATION OF ZEISS DINI12. - Finnish Geodetic Institute Department of Geodesy and Geodynamics. - P.O.Box 15,*

145. Чугреев И.Г., Владимирова М.Р. Разворот и трансформирование системы координат свободных модели топографической съемки в заданную// Приложение к журналу изв. Вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – Сборник статей по итогам международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию основания МИИГАиК. – вып. 2 (в 2-х частях). – М.: МИИГАиК, 2009. – с. 11÷16,

146. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» №102-ФЗ,

147. Todias Garske. Überprüfung der Leistungsspezifikationen der Lasertracker Faro ION, Faro Modell-X und API T3-40 inklusive der Darstellung eines Messkonzeptes auf Grundlage der VDI/VDE 2617, Blatt 10. – dissertation, das Jahr

2012. – 155 p.:<http://www.hochschule-chum.de/fbv/photo/absolventen/diplomanden.html>,

148. Голыгин Н.Х. Принципы метрологического обеспечения координатных оптико-электронных средств измерений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2015. – №5 – с. 107 ÷ 110,

149. Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Хижняков В.А. Метрологическое обеспечение координатных оптико-электронных измерений // Измерительная техника.- №10. - 2016 г. – с. 35÷38,

150. Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator / Н. Woschitz, Fritz K. Brunner, Н. Heister // Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement.– 2003. – 128. – PP. 11–17.. ред. А.Е.Пашкова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – с. 145÷147,

151. Однокурцев К.А. Система автоматизированного управления функциональными элементами сборочной оснастки при выполнении сборочно-стыковочных работ // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара (Иркутск, 9-11 ноября 2011 г.). Под общ. ред. А.Е. Пашкова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – с. 147÷149,

152. Чугреев И.Г., Голыгин Н.Х., Хижняков В.А. Координатное уравнивание высокоточных измерений (Свидетельство о государственной рег. программы для ЭВМ – № 2016615109), - рег. В госреестре программ для ЭВМ от 16 мая 2016 г., приоритет 16 дек. 2015 г.,

153. Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Хижняков В.А. Высокоточные координатные измерения крупногабаритных изделий и объектов сложной формы. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО-2016». – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – с. 894-896,

154. Laser Tracker Calibration Using Coordinate Measuring Machine / J.F.Ouyang, W.L.Liu, D.X.Sun, Y.G.Yan // XVII IMEKO World Congress.- June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia,

155. Traceable large-scale metrology based on laser tracker / Zhang FuMin, Qu XingHua, Wu Hong Yan // State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments Tianjin University 92, Weijin, Tianjin, 300072, China. – June 1-046÷1-050,

156. Кононова Н.А. Разработка и исследование тридцатиметрового компаратора для государственного первичного эталона единицы длины-метра. Дисс. На соискание ученой степени канд. техн. Наук. – СПб.: ВНИИМ, 2013. – 138 с., ил.,

157. Международный стандарт ISO 10360 «Геометрические характеристики изделий. Приемочные и повторные поверочные испытания систем измерения координат. Часть 10: Лазерное устройство сопровождения для измерения расстояния от точки к точке»,

158. Самойленко А.Н., Молюк Б.Е. Исследование метрологических характеристик горизонтального круга лазерных трекеров FARO X и FARO ION // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. - №5. – с. 46÷51,

159. Чугреев И.Г., Владимирова М.Р., Бахарев Ф.С. К вопросу о выборе методики проведения тахеометрических съемок в современных условиях. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2012. – №2 – с. 20 ÷ 24,

160. Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Хижняков В.А., Чугреев И.Г. Эталонный комплекс для калибровки и испытаний координатных средств измерений в сферической системе координат // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. - №3. – с. 43÷47,

161. 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. - приоритет 22 июня 2017 г.,

162. Чугреев И.Г., Голыгин Н.Х., Хижняков В.А., Маркелов Г.М. Преобразование контрольных измерений сложных инженерных изделий, объектов и со-

оружений к их математическим моделям (Свидетельство о государственной рег. программы для ЭВМ – № 2018618871) - рег. в госреестре программ для ЭВМ от 23 июля 2018. - приоритет 13 июня 2018 г.,

163. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Хижняков В.А., Чугреев И.Г. Метод калибровки мобильных трехкоординатных средств измерений в сферической системе координат // Материалы докладов XIV общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве». – М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. – с. 104-108,

164. 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 патент РФ №2710900 – МПК G01C 1/00, опубл. 2020. - Бюл. №2,

165. Голыгин Н.Х., Чугреев И.Г., Хижняков В.А. Метод калибровки мобильных координатных средств измерений в сферической системе координат. Сборник статей по итогам научно-технических конференций // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — выпуск 9. – М.: МИИГАиК, 2018 – с. 76-80,

166. J. Conte, J. Santolaria, A.C. Majarina, S. Aguado Laser Tracker Kinematic Error Model Formulation and Subsequent Verification under Real Working Conditions // MESIC, 2015, Zaragoza, Ispania, s. 788-795,

167. Милованова Е.А., Маликов К.И., Иванникова Н.В. и др. Совместные исследования метрологических характеристик комплекса государственных первичных эталонов единицы длины // Измерительная техника. – 2018. - №9. – с. 8÷12,

168. Беломытцев В.Д., Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Шилин В.А. Оптико-электронный комплекс для испытаний, поверки и калибровки координатных средств измерений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – т. 65. - №2. – с. 232÷240,

169. Парвлюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Векторная модель станда для аттестации высокоточных угломерных приборов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. - №6. – с. 151÷157,

170. Парвлюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Методика оценки и учета нестабильности конструкции метрологического угломерного станда // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. - №5. – с. 122÷130,

171. 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,

172. 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,

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

174. Metrological support for opto-electronic coordinate measurements. N. Golygin, V. Lysenko , V. Khizhniakov. Measurement Techniques , 2017, T. 59 , №10, p.1073-1077,

175. The experience of using material and interference systems for checking and calibrating CMM for various measurement ranges. V. Lysenko , K. Malikov , E. Milovanova , N. Tabachnikova , N. Zuykova , N. Golygin, V. Belomyttsev. International Conference “ Intelligent metrology for a sustainable efficient digital factory “ , Metromeet 2021. Bilbao. Spain. 23-24,

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

177. Gassner G. and Ruland R. Laser Tracker Test Facility at SLAC – Progress Report. In: The 10th International Workshop on Accelerator Alignment. February 11-15 (2008),

178. 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 метрология. – 2023. - №1. – с. 19 - 24.

Приложение

Письма от предприятий, подтверждающие актуальность разработки оптико-электронного комплекса для координатных средств измерений



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО
ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ
И МЕТРОЛОГИИ**
(Росстандарт)

Ленинский просп., д. 9, Москва В-49, ГСП-1, 119991
Тел: (499) 236-03-00; факс: (499) 236-62-31
E-mail: info@gost.ru
http://www.gost.ru

ОКПО 00091089, ОГРН 1047706034232
ИНН/ КПП 7706406291/770601001

06.02.2014 № 120/12-337

На № _____

О метрологическом обеспечении
координатно-измерительных
приборов

В дирекцию научно-технических программ

Копии:
Директору ФГУП «ВНИИМС»
С.А. Кононогову
Ректору МИИГАиК
А.А. Майорову

В настоящее время в наукоемких производствах и критических технологиях прецизионного машиностроения, оборонном комплексе, авиационной, космической и других отраслях промышленности используются дорогостоящие оптико-электронные мобильные координатные измерительные приборы (лазерные трекеры, наземные и воздушные сканеры, измерительные системы с цифровыми нивелирами, электронные тахеометры и другие средства измерений, при этом цена одного комплекта достигает порядка 20 млн. руб.), в основном иностранного производства. В полной мере задача проверки их метрологических характеристик не решена у нас в стране, а также на международном уровне.

Управлением метрологии Росстандарта решение данной задачи было возложено на ФГУП «ВНИИМС». Анализ состояния вопроса, выполненный ФГУП «ВНИИМС», показал, что наблюдается значительное отставание по точности известных средств измерения в указанном диапазоне измерений от требований отечественной промышленности.

Так как решение проблемы координатных измерений требует значительных финансовых затрат, связанных с материальным обеспечением НИОКР, Управлением метрологии в 2007 году было принято решение о привлечении к данной работе Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), в котором с 1926 года функционировал единственный в России оптико-механический компаратор для поверки инварных 24-метровых проволок, при этом МИИГАиК располагает эталонами 1 разряда, полученными нашей страной в 1925 году согласно Женевской конвенции, и другим уникальным прецизионным оборудованием.

В предшествующий период за счет внутренних внебюджетных средств университетом, с привлечением ФГУП «ВНИИМС», были проведены научные работы по анализу известных зарубежных методов и средств контроля метрологических характеристик, поставляемых на наш рынок координатных приборов, разработаны локальные поверочные схемы и методики измерений, тип поверочной установки МИИГАиК утверждён Росстандартом и допущен к применению в Российской Федерации.

В 2008 г. утверждено Положение о совместном использовании с ФГУП «ВНИИМС» комплекса эталонов сложных координатных измерений, метрологическая служба университета аккредитована Росаккредитацией на право поверки и калибровки геодезических приборов.

В связи с появлением в настоящее время на отечественном рынке новых прецизионных координатных приборов, а также не решенными вопросами, связанными с фундаментальной теоретической проработкой метрологического обеспечения современных координатных средств измерений и с экспериментальными исследованиями в т.ч. по реализации полученных 8 патентов на изобретения, необходимо продолжить научно-исследовательскую работу в данном направлении, при этом ФГУП «ВНИИМС» готов выступить в качестве соисполнителя работ в части научно-методического сопровождения доработки и пересмотра нормативной документации и ее утверждения в установленном порядке.

По окончании работы в целом разработанная нормативная документация может быть использована при создании первичного эталона для координатных средств измерений, а доработанный универсальный метрологический комплекс МИИГАиК использован в качестве вторичного эталона для передачи размеров координатным средствам измерений, используемым в отечественной и зарубежной промышленности.

Управление метрологии Росстандарта считает целесообразным выполнение в рамках программного мероприятия 1.3 Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» работы по теме «Разработка методов и средств измерений для метрологического обеспечения мобильных координатно-измерительных приборов».

Начальник
Управления метрологии



С.С. Голубев



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

Международная научно-техническая организация
117342, Москва, ул. Введенского, 3
Тел.: (495) 333-00-22 Факс: (495) 334-47-80
Эл.почта: las@tsr.ru <http://www.cislaser.com/las>.

Лазерная ассоциация – координатор технологической платформы «Фотоника»

Исх. № 17/14-тп от 11.02.2014 г.

Министерство образования и науки
Российской Федерации

О поддержке Технологической платформой
«Фотоника» лота по мероприятию 1.3 ФЦП ИР

Настоящим уведомляем о том, что проект лота на тему «Разработка современных оптико-электронных координатных средств измерений для метрологического обеспечения приборов, используемых для предотвращения техногенных чрезвычайных ситуаций», представленный по приоритетному направлению «Индустрия наносистем», соответствует направлениям исследований Технологической платформы «Фотоника». Проект лота согласовываем без замечаний.

Заявителем, выступающим от лица Техплатформы «Фотоника», является Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК). Указанная заявка полностью соответствует Стратегической программе техплатформы «Фотоника» и будет выполняться в режиме частно-государственного партнерства. Проект лота полностью соответствует Прогнозу научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года.

Сообщаем также, что в случае объявления конкурса по указанному лоту ниже-названные организации-участники Технологической платформы «Фотоника» могут принять участие в его софинансировании, будучи заинтересованными в его реализации, а также последующем использовании результатов прикладных научных исследований для их внедрения в производство и коммерциализации:

- ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, МО
- ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Москва
- ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН», г. Москва

Президент Лазерной Ассоциации
Руководитель Секретариата
ТП «Фотоника»

И.Б.КОВШ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО
ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ
И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ»
(ФБУ «РОСТЕСТ – МОСКВА»)

117418 Москва, Нахимовский пр., 31
Call-Центр: 495-544-00-00
тел.: 499-129-19-11 факс: 499-124-99-96
Email: info@rostest.ru, www.rostest.ru

ОКПО 11246589, ОГРН 1027700066415
ИНН/КПП 7727061249/772701001

07.02.20142 № 445-5/845
На № 77-01-29/4 от 07.02.2014 г.

В ФГБНУ «Дирекция НТП»

123557, г. Москва,
Пресненский вал, д. 19, стр. 1

**Копия: ректору МИИГАиК
Майорову А.А.**

105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4

В основе современных и разрабатываемых технологий производства продукции во всех отраслях экономики присутствуют высокоточные измерения, которые выполняются приборами и измерительными системами, метрологические характеристики которых находятся на уровне государственных эталонов. Серийное производство и доступная стоимость этих средств измерений (СИ) привела не только к технической революции в измерительном процессе, но и выявила некоторые проблемы, для решения которых требуется научно-исследовательский подход. Одна из таких задач, которую решают многие ведомства, это организация мало затратной, не трудоемкой и производительной периодической поверки высокоточных СИ. К таким СИ, в частности, относятся лазерные измерительные системы (трекеры, сканеры, тахеометры, интерферометры) выпускаемые мировыми лидерами приборостроения для геодезической отрасли и машиностроения. Это фирмы «Trimble» и «Hewlett-Packard» (США), «Topcon», «Nikon» и «Sokkia» (Япония), «Leica» и «Tesa» (Швейцария), «Hexacon» (Швеция), «Renishaw» (Великобритания) и др. Выпускаемые ими СИ обладают прецизионной точностью измерений, которая составляет в угловой мере порядка (0,2-0,5)'' и в линейной мере – (1-5) мкм в диапазоне измерений до 50 м.

Организация и проведение поверки этих СИ является государственной задачей, так как Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» устанавливает сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, одной из которых являются измерения, выполняемые при осуществлении геодезической и картографической деятельности. Кроме этого, существует Приказ Минэкономразвития от 23 июля 2013 г. № 412 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, выполняемых при осуществлении геодезической и картографической деятельности, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений».

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) владеет уникальным и единственным в России техническим устройством – 24-х метровым оптико-механическим компаратором. Это устройство, построенное в 20-е годы прошлого столетия, расположено в термостатированном помещении на изолированном фундаменте и укомплектовано 3-х метровой штриховой мерой 1 разряда. В настоящее время, на базе компаратора создана поверочная установка УМК-М МИИГАиК, которая прошла испытания в целях утверждения типа и зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 32334-06, а метрологическая служба университета аккредитована Росаккредитацией на право поверки и калибровки средств измерений (лазерных измерительных систем). Существующие методы поверки лазерных измерительных систем являются трудоемкими и экономически затратными. В целях повышения производительности необходима модернизация компаратора, создание автоматизированного рабочего места и разработка новых методов поверки.

ФБУ «Ростест Москва» поддерживает инициативу МИИГАиК выполнить НИР связанную с разработкой методов и средств измерений для метрологического обеспечения лазерных измерительных систем на базе установки поверочной УМК-М МИИГАиК и считает, что данная работа актуальна, востребована, целесообразна и может быть выполнена по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках мероприятия 1.3 «Проведение прикладных исследований, направленных на создание опережающего научно-технологического задела для развития отраслей экономики».

Заместитель генерального директора
ФБУ «Ростест-Москва»



А.С. Евдокимов



Российская академия наук

Учреждение Российской академии наук
Институт теоретической и прикладной
электродинамики РАН

125412, Москва, ул. Ижорская, 13, ИТПЭ РАН
ОКПО 29012159, ОГРН 1027739263441
ИНН/КПП 7713020549/771301001

Тел.: 7-495-4842383
Факс: 7-495-4842633
E-Mail: itae@dol.ru

№ 11406- 01-5114.1/64

03.02.2014

(дата)

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный университет
геодезии и картографии»**

**В дирекцию научно-технических программ
Копия: Ректору МИИГАиК Майорову А.А.**

105064, Москва, Гороховский пер., 4

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН выполняет исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами сложной структуры и измерения параметров антенн, используемых в критических технологиях, на автоматизированном измерительном комплексе – компактном полигоне АИК-КП, разработанном и построенном в ИТПЭ РАН. В настоящее время комплекс позволяет проводить измерения в диапазоне частот от 0,8 до 40,0 ГГц. Одним из основных и наиболее важных элементов измерительного комплекса является микроволновый коллиматор с размером зеркала 12,5м x 11,5м и фокусным расстоянием 12м. Зеркало коллиматора имеет форму несимметричной вырезки из параболоида вращения, конструкция состоит из 203 отдельных щитов, закрепленных на опорной конструкции посредством специальных микрометрических винтов. Требования к точности геометрии зеркала коллиматора весьма высоки, поэтому юстировка зеркала коллиматора является сложной технической задачей. В настоящее время в центральной (рабочей) зоне зеркала коллиматора максимальное отклонение геометрии от теоретической не превышает 55 мкм.

Компактный полигон ИТПЭ РАН постоянно модернизируется и

совершенствуется. В ближайшей перспективе планируется оснащение полигона микроволновым оборудованием, работающем в диапазоне частот до 100 ГГц. Таким образом, повышаются требования к точности зеркала коллиматора до 15мкм. Юстировка зеркала коллиматора с такими точностями представляет серьезную задачу, решение которой может потребовать разработки новых методик контроля геометрии зеркала коллиматора, новых конструктивных решений в креплении щитов, применение новых средств измерений.

Для юстировки комплекса в настоящее время используется координатный измерительный прибор – лазерный трекер, калибровка которого позволит повысить точность измерения параметров антенн.

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН поддерживает научно-исследовательскую работу по теме «Разработка методов и средств измерений для метрологического обеспечения мобильных координатно-измерительных приборов» и рекомендует выполнить ее по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках программного мероприятия 1.3.

Заместитель директора ИТПЭ РАН



Кисель В.Н.



Открытое акционерное общество
"Красногорский завод им. С.А. Зверева"
(ОАО КМЗ)



Речная ул., д.8, г.Красногорск, Московская область, Россия, 143403; Телефон: +7 (495) 561-80-00, факс: +7 (495) 562-68-42.
http://www.zenit-foto.ru; kmz@zenit-foto.ru
ОКПО 07526142, ОГРН 1025002863247, ИНН 5024022965, КПП 509950001

от 11.02.2014
(дата)

2/848
(номер)

В ФГБНУ «Дирекцию НТП»
123557, г. Москва, Пресненский вал, д. 19, стр. 1
Копия: ректору МИИГАиК Майорову А.А.
105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4

ОАО «Красногорский завод им С.А. Зверева» является одним из ведущих в России предприятий оптико-механической промышленности. Предприятие занимается научно-исследовательской и производственной деятельностью в области создания оптико-электронных приборов и комплексов различного назначения. Потребителями нашей продукции являются оборонный комплекс, авиационная, космическая и др. отрасли промышленности страны.

Производство современных сложных оптико-электронных комплексов не может быть обеспечено без метрологической поддержки, поэтому мы крайне заинтересованы в метрологическом обеспечении приборов с целью повышения точности, надежности и безопасности их использования. Постоянно повышающийся уровень точности современных измерительных приборов, используемых в высокотехнологичных и критических производствах, требует создания уникальной метрологической базы и нормативной документации. МИИГАиК располагает производственной базой, усовершенствование которой позволит с наименьшими затратами создать систему метрологического обеспечения современных оптико-электронных средств измерения.

Так как задача по обеспечению единства измерений является необходимой практически для всех отраслей экономики, то ОАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» поддерживает инициативу ГОУ ВПО «Московского государственного университета геодезии и картографии» и рекомендует выполнить работы по теме «Разработка методов и средств измерений для метрологического обеспечения мобильных координатно-измерительных приборов» по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках программного мероприятия 1.3.

Генеральный директор
ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»



А.П. Тарасов

МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ,
КАДАСТРА И КАРТОГРАФИИ
(РОСРЕЕСТР)**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение

**«Федеральный научно-технический центр
геодезии, картографии и инфраструктуры
пространственных данных»**

(ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»)

Волгоградский проспект, д. 45, Москва, 109316

Тел. (495) 456-91-71 факс (495) 456-91-42

e-mail: info@nsdi.rosreestr.ru

ОКПО 02571830; ОГРН 1137746612068

ИНН 7722814241; КПП 772201001

ОКАТО 45290590000; ОКВЭД 74.20.31

13.02.2014 № 24-316

На № _____ от _____

*О проведении НИР в области метрологического
обеспечения геодезических измерений*

Ректору МИИГАиК
А.А. Майорову
105064, г. Москва, Гороховский пер.,4

Копия: Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Дирекция НТП»
123557, г. Москва
Пресненский вал, д. 19, стр. 1

Уважаемый Андрей Александрович!

В настоящее время при производстве геодезических работ широко внедряются новые средства измерений, в основе действия которых используются новейшие достижения науки и техники. В частности, появление лазерных и цифровых приборов в настоящее время определяет научно-технический прогресс при проведении линейных и угловых геодезических измерений.

В соответствии с Федеральным законом №102-ФЗ геодезические средства измерений подлежат обязательному утверждению типа и поверке при импорте, выпуске из производства, после ремонта и в эксплуатации. Однако применяемые в настоящее время контрольно-измерительные приборы и поверочное оборудование нуждаются в совершенствовании с учетом метрологических характеристик и особенностей конструкции новейших геодезических средств измерений.

В этой связи заслуживает внимания и поддержки инициатива МИИГАиК по выполнению научно-исследовательской работы по разработке на базе поверочной установки УМК-М методов и средств метрологического обеспечения геодезических лазерных измерительных систем. ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» как головная организация метрологической службы отрасли считает данную разработку актуальной, перспективной и своевременной. Целесообразно, чтобы эта работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-20 годы» (мероприятие 1.3 «Проведение прикладных исследований, направленных на создание опережающего научно-технологического задела для развития отраслей экономики»).

И. о. директора

Г. В. Демьянов

Исп. Спиридонов
(495) 456 91 31



Федеральное космическое агентство
Федеральное государственное
унитарное предприятие
**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЦЕНТР
имени М. В. ХРУНИЧЕВА»
(ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»)**

Новозаводская ул., д. 18, г. Москва, 121087
Тел. (495) 145-99-34, факс (495) 142-59-00
e-mail : proton@khrunichev.com

В ФГУБНУ «Дирекцию НТП»

ОКПО 17664075, ОГРН 1027739198090
ИНН/КПП 7730052050/773001001

**123557, г. Москва, Пресненский вал, д.19, стр.1
Копия: ректору МИИГ АиК Майорову А.А.
105064, г. Москва, Гороховский пер., д.4**

17.02.2014 № 304

При производстве и освоении новых изделий на предприятии ФГУП «ГКНПЦ ИМ. М.В.Хруничева» требуется контроль стапельно-сборочного и сварочного оснащения. Существующие до недавнего времени оптико-механические средства измерения требуют дополнительного контрольного оснащения (изготовление макетов, контр-макетов, ступеней входного контроля, приспособлений, мастер-плит, шаблонов и др.). При этом при высокой трудоемкости работ обеспечивается неопределенность измерений порядка $0,2 \pm 0,4$ мм.

Закупленные предприятием мобильные координатно-измерительные системы (МКИС) (лазерные трекары и манипуляторы) практически заменяют стационарные контрольно-измерительные машины типа «Оптно», позволяют производить обмеры непосредственно на рабочем месте на любом этапе изготовления, оперативно сравнивать параметры изделий с их математическими моделями, не требуют дополнительного контрольного оснащения, значительно (в 8-10 раз) упрощают и сокращают процесс контроля. При этом в соответствии с заявляемой иностранными производителями точность измерений может быть обеспечена неопределенность измерений не более $0,02 \pm 0,08$ мм. Указанная точность измерений позволит увеличить безопасность применения изделий в космической и авиационной отраслях отечественной промышленности.

Однако указанные выше дорогостоящие измерительные системы являются в основном иностранного производства, возникает необходимость их постоянного оперативного метрологического обеспечения. Известные в настоящее время отечественные и зарубежные нормативная документация и эталонные средства измерений, основанные на контроле параметров в одномерном пространстве, не обеспечивают заявленную точность измерений многофункциональных трехкоординатных мобильных средств измерений. Создание системы метрологического обеспечения МКИС отдельным предприятием или даже отраслью в настоящее время практически невозможно, так как требует больших материальных затрат и времени на ее внедрение.

ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» поддерживает инициативу Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московского государственного университета геодезии и картографии» (МИИГ АиК) о разработке системы метрологического обеспечения мобильных координатных средств по теме «Разработка методов и средств измерений для метрологического обеспечения мобильных координатно-измерительных приборов» на базе известного с 1926 оптико-механического компаратора в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», мероприятие 1.3.

При этом затраты на финансирование проекта уменьшатся в сотни раз.

Зам. Главного инженера РКЗ
Ю.П. Городничев



**ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
"НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ"**



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»
(ОАО «ВПК «НПО машиностроения»)
ул. Гагарина, д. 33, г. Реутов, Московская область, 143966
телеграфный: Реутов Московской ВЕСНА (АТ346416)
Тел.: (495) 528-30-18 (канцелярия) Факс: (495) 302-20-01
E-mail: vpk@npomash.ru http://www.npomash.ru
ОКПО 07501739, ОГРН 1075012001492
ИНН/КПП 5012039795/509950001

21.02.2014

№ *92/78*

ФГБНУ «Дирекция НТП»
123557, г. Москва,
Пресненский вал, д. 19, стр. 1

Копия: ректору МИИГАиК
А.А. Майорову
105064, г. Москва,
Гороховский пер., д.4

Трудно переоценить роль, которую в обеспечении качества, а, следовательно, и конкурентоспособности продукции, играет контрольно-измерительная техника. ОАО «ВПК «НПО машиностроения» использует только те средства измерений, которые соответствуют лучшим мировым стандартам. Одними из таких средств измерений являются координатно-измерительные машины Faro Laser Tracker, Faro Arm Platinum.

Faro Laser Tracker проходит ежегодную периодическую поверку в метрологической службе Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), аккредитованной на право поверки и калибровки средств измерений (лазерных измерительных систем).

В настоящее время на базе уникального 24-метрового оптико-механического компаратора создана поверочная установка УМК-М МИИГАиК, которая прошла испытания в целях утверждения типа и зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений (№ 32334-06).

Существующие методы поверки лазерных измерительных систем являются трудоемкими и экономически затратными.

В целях повышения производительности необходима модернизация компаратора, создание автоматизированного рабочего места и разработка новых методов поверки.

ОАО «ВПК «НПО машиностроения» поддерживает инициативу МИИГАиК выполнить НИР, связанную с разработкой методов и средств измерений для метрологического обеспечения лазерных измерительных систем на базе поверочной установки УМК-М МИИГАиК, и считает, что данная работа актуальна, востребована, целесообразна и может быть выполнена по федеральной целевой программе «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках мероприятия 1.3 «Проведение прикладных исследований, направленных на создание опережающего научно-технологического задела для развития отраслей экономики».

Главный метролог
ОАО «ВПК «НПО машиностроения»



Б.Е. Черстов



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Открытое акционерное общество
Санкт-Петербургский научно-исследовательский
изыскательский институт
«ЭНЕРГОИЗЫСКАНИЯ»
(ОАО «СПб НИИИ «ЭИЗ»)

ул. Бабушкина, дом 1, г. Санкт-Петербург, 192029
Телефоны: (812) 374-91-32, 374-91-01
Факс: (812) 374-91-31
E-mail: info@eiz-spb.ru
ИНН 7811411780, КПП 781101001

11.04 2014 г. № 21901/0700-487

На № _____ от _____

О метрологическом обеспечении мобильных
координатных приборов

Институт тесно сотрудничает с «Московским государственным университетом геодезии и картографии» (МИИГАиК) в части метрологического исследования геодезических приборов, используемых при геодезическом мониторинге особо опасных производств и сооружений, при инженерно-геодезических изысканиях для проектирования строительства атомных станций.

В настоящее время аккредитованная метрологическая служба МИИГАиК является единственной в стране, выполняющей калибровку координатных измерительных приборов, в частности, измерительных систем с цифровыми нивелирами, используемых при геодинамических исследованиях и при наблюдении осадки и деформации на объектах использования атомной энергии.

ОАО «СПб НИИИ «ЭИЗ» считает целесообразным продолжить разработку эталонных средств измерений для координатных средств измерений в направлении повышения точности передачи размеров и автоматизации процесса калибровки. Работа по теме «Разработка методов и средств измерений для метрологического обеспечения мобильных координатно-измерительных приборов» может быть выполнена в рамках программного мероприятия 1.2 «Рациональное природопользование» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы»

Директор

М.С. Исхаков

ФБНУ «Дирекция НТП»
123557, г. Москва
Пресненский вал, д. 19, стр. 1

Копия: ректору МИИГАиК
А.А.Майорову
105064, г. Москва,
Гороховский пер., д.4