

На правах рукописи

Брянкин Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

05.11.15 - "Метрология и метрологическое обеспечение"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2011 г.

Работа выполнена в Федеральном Государственном унитарном
предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)

Научный руководитель

доктор технических наук

Лысенко В. Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Семина В.И.

кандидат технических наук

Голыгин Н.Х.

Ведущая организация: ОАО «НИИИзмерения», г. Москва

Защита состоится « ___ » _____ 2011 г. на заседании
диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу:
119361, г. Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук _____

Лысенко В. Г.

Актуальность

Развитие производства в области машиностроения, в авиационной, ракетно-космической, энергетической, судостроительной, автомобильной промышленности предъявляет постоянно растущие требования по обеспечению безопасности и надежности функционирования оборудования. Между эксплуатационными свойствами деталей и их геометрией существует взаимосвязь, и поэтому для прогнозирования и контроля эксплуатационных показателей деталей и машин необходимо измерение их геометрических характеристик (параметров).

Многие современные машины и механизмы различных отраслей промышленности содержат крупногабаритные детали. Современные требования к точности изготовления таких деталей вызывают необходимость уменьшения величины допусков высокоточных деталей больших размеров.

Измерения на координатно-измерительных машинах занимают значимое место среди всех методов измерений крупногабаритных деталей и узлов. Для некоторых деталей больших размеров крупногабаритные координатно-измерительные машины (далее – КИМ) различных типов компоновок являются единственно возможным средством контроля геометрических параметров, обеспечивающим измерения с требуемой точностью.

При пространственных измерениях на КИМ необходимо решить комплекс проблем по обеспечению единства измерений, включая в целом научные, технические, нормативные и организационные составляющие метрологического обеспечения.

В области обеспечения единства координатных измерений большой вклад внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Каспарайтис А.Ю., Лукьянов В.С., Телешевский В.И., Дич Л.З., Лысенко В.Г., F. Waldele, H. Weber, G. Chen, E. Trapet, C. Wang, G. Zhang, W. Lotze и другие.

Существовавшие до недавнего времени методы оценки точности крупногабаритных координатно-измерительных машин разрабатывались, прежде всего, на основе практических данных по метрологическому обслуживанию КИМ, а также информации, содержащейся в документации фирм-изготовителей. Современной научной базы, на основе которой можно было бы построить универсальные практические методики метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ в полной мере не существует.

Исходя из этого, разработка новой научно-методической и технической базы обеспечения испытаний с целью утверждения типа, поверки и калибровки крупногабаритных КИМ, учитывающая все аспекты современных измерений на КИМ, а также требуемая корректировка существующей нормативно-технической документации их метрологического обслуживания является современной и актуальной задачей.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование научных, технических и нормативно-методических основ метрологического обслуживания крупногабаритных координатно-измерительных машин.

В соответствии с целью основными задачами являются:

1. Осуществить анализ состояния и исследование существующих в России и за рубежом методов, средств, нормативной базы оценки точности координатно-измерительных машин и степени их применимости для метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ.
2. Разработать научно-методические основы пространственных координатных измерений на крупногабаритных КИМ существующих типов компоновок, включая анализ составляющих погрешностей координатных измерений на КИМ, математическое обоснование и разработку математических моделей КИМ.

3. Разработать оптимальные методы определения компонентов погрешностей крупногабаритных КИМ, включая как методы определения параметрических погрешностей машины, так и методы, характеризующие точность измерений КИМ как трехмерного средства измерений длины.

4. Осуществить исследования и разработку методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ, включая определение оптимальных способов и средств поверки и калибровки крупногабаритных КИМ;

5. Провести экспериментальные исследования и апробацию основных научных и технических положений, разработанных в диссертации и проверку адекватности разработанных моделей.

6. Разработать проекты необходимых нормативно-технических документов – методик испытаний с целью утверждения типа, поверки и калибровки крупногабаритных КИМ.

Методы и средства исследований

Работа выполнена на основе теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования и разработка математических моделей КИМ проводились методами математического моделирования с использованием соответствующих разделов аналитической геометрии и матричной алгебры. Исследование систематических и случайных составляющих погрешностей проводилось методами численного эксперимента при использовании программного обеспечения КИМ. Экспериментальные исследования проводились на существующих координатно-измерительных машинах в лабораториях института и промышленных предприятиях.

Научная новизна

- На основе анализа существующих типов компоновок КИМ осуществлен расчет координатного кода и разработаны вероятностные математические модели для существующих типов компоновок КИМ, отражающих механическую реализацию декартовой системы координат при наличии трансляционных и ротационных составляющих погрешностей, позволяющие осуществить оценку погрешности координатных измерений на крупногабаритных КИМ.

- Разработана математическая модель измерений одномерного эталона длины с учетом систематических и случайных флуктуаций погрешностей элементов машины, а также влияния математической компенсации погрешностей машины и температурных деформаций на результаты измерений эталона длины.

- Решена задача поиска пространственного расположения меры в измерительном объеме КИМ по критерию максимума значения погрешности измерений длины в зависимости от пространственного расположения и направления меры в измерительном объеме КИМ.

- На основе вариационного метода расчета погрешностей механических устройств разработана математическая модель для выявления и компенсации погрешностей щуповой головки КИМ измеряющего типа и разработан универсальный прямой метод определения погрешностей щуповых головок КИМ для проведения их метрологического обслуживания.

- Разработаны методы определения пространственной погрешности крупногабаритных КИМ: метод определения параметрических погрешностей КИМ с помощью лазерной интерференционной измерительной системы, метод с использованием разъемной одномерной меры длины и метод с использованием лазерного измерителя перемещений (лазерного трекера).

– Разработаны и исследованы новые научные и технические решения повышения точности измерений на крупногабаритных КИМ на основе компенсации параметрических погрешностей и погрешностей внешних условий.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная математическая модель механической реализации декартовой системы координат позволяет осуществлять математическое описание функционирования существующих типов компоновок крупногабаритных КИМ.

2. Разработанная математическая модель измерений одномерной меры длины в измерительном объеме КИМ позволяет определить пространственные положения меры по критерию максимума значения погрешности измерений длины меры при априорно известных данных параметрических погрешностей элементов КИМ.

3. Разработанная одномерная разъемная мера длины и методика ее применения обеспечивает проведение процедуры поверки и калибровки крупногабаритных КИМ в диапазоне измерений от 0,5 до 5 метров с неопределенностью не более $1+2 \cdot L$ мкм, где L – длина измерений в метрах.

4. Разработанный метод использования лазерного измерительного трекера при работе в режиме одиночного канала измерения дальности, обеспечивает передачу единицы длины к крупногабаритной КИМ в диапазоне измерений до 40 м с неопределенностью не более 1 мкм/м.

5. Разработанная нормативно-методическая база метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ, включая методики испытаний с целью утверждения типа, методики поверки и калибровки обеспечивает решение практической задачи метрологического обслуживания КИМ на требуемом уровне точности.

6. Разработанный комплекс методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ обеспечивает передачу единицы

длины от эталона длины к крупногабаритной КИМ в диапазоне от 100 мм до 40000 мм с пределами допускаемой погрешности в 3 - 8 раз меньше погрешности крупногабаритных КИМ, что удовлетворяет современным требованиям.

Практическая значимость

Разработанный комплекс методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ и научно-обоснованный универсальный комплект нормативной документации по испытаниям с целью утверждения типа, поверке и калибровке крупногабаритных КИМ позволяют осуществлять передачу единицы длины от эталона длины к крупногабаритной КИМ и обеспечивать проведение метрологического обслуживания большого парка крупногабаритных КИМ в стране.

Основные положения и результаты работы внедрены на предприятиях, использующих крупногабаритные координатно-измерительные машины. Разработанные методы и средства метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ использовались при проведении испытаний с целью утверждения типа крупногабаритных КИМ мостовой и стоечной типов компоновок. По результатам проведения испытаний с целью утверждения типа получены акты внедрения.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на всероссийских конференциях и семинарах, в том числе: девятом Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, 2010 г.), научно-практической конференции «100 лет Российскому подводному флоту», (г. Северодвинск, 2006 г.), девятой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, 2004 г.), научно-технической конференции «Молодые

метрологи – народному хозяйству России» (Госстандарт России, г. Москва, 1999 г.).

Публикации

По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 14 печатных работ, в том числе: 2 в журналах, рекомендованных ВАК, 11 тезисов докладов.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 183 страницы машинописного текста, включая 18 таблиц и 86 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении приведено обоснование постановки темы, показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна результатов работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ существующих методов и средств метрологического обслуживания КИМ.

На сегодняшний день известен ряд нормативных документов национальных и международных технических комитетов и организаций, регламентирующих методы и средства оценки точности КИМ.

В главе исследованы и проанализированы следующие отечественные и международные научно-технические и нормативно-методические разработки в области оценки точности измерений КИМ:

- методика определения точности для координатно-измерительных машин СММА ассоциации производителей координатно-измерительных машин (Coordinate Measuring Manufactures Association);

- стандарт BS6808 разработанный Британским институтом стандартов (British Standards Institution) Великобритании;
- методика тестирования координатно-измерительных машин ASME B89 Американского Сообщества Инженеров (American Society of Mechanical Engineers);
- стандарт VDI/VDE 2617 немецкой ассоциации инженеров (Verein Deutscher Ingenieure);
- методика CNOMO, разработанная содружеством французских производителей в машиностроении (PSA Peugeot, Citroen, Renault);
- стандарт ISO 10360, разработанный Техническим Комитетом ISO/213 «Нормирование и поверка размерных и геометрических параметров изделий» ISO (Международная Организация по стандартизации);
- методика поверки машин координатно-измерительных портального типа МИ 2569-99, разработанная ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС).

В результате анализа существующих нормативных документов по выявлению точности координатных измерений на КИМ, отмечается следующее:

- Различными организациями и объединениями по метрологии предлагается множество методов оценки точности пространственного объема КИМ, различающиеся по виду методики измерения, меры (нормали), используемой для оценки точности, а также требованиям к внешним условиям. Не разработано универсальных объективных критериев сравнения оценок метрологических характеристик КИМ, полученных различными методами и средствами.
- Методики определения точности даются в виде конечных рекомендаций, преимущества тех или иных способов выявления точности КИМ не содержат научного объяснения и доказательств выбора тех или иных способов оценки точности. Данные по таким исследованиям не доступны в открытой печати.

- В методиках оценки точности КИМ используются как характеристики, описывающие погрешность составных элементов КИМ (например, направляющих, шкал, щуповой головки), так и характеризующую точность КИМ в целом (измерения меры длины).

- Все методики оценки точности КИМ подразумевают, в том числе, определение точности измерений КИМ при измерении длины одномерной меры длины, и таким образом, производится оценка точности КИМ как средства измерения линейных размеров (длины).

- Применяемые эталонные средства измерений не позволяют осуществлять оценку точности крупногабаритных КИМ с длиной оси до 40 м. Применяемые в методиках методы и средства не имеют теоретического обоснования достаточности измерительной информации для оценки точности крупногабаритных КИМ во всем рабочем объеме.

На основе анализа состояния метрологического обеспечения измерений на крупногабаритных КИМ сформулированы выводы, обобщающие современное состояние вопроса метрологического обслуживания крупногабаритных координатно-измерительных машин.

1. Имеются существенные различия в предлагаемых на сегодня различными организациями и объединениями методами и средствами оценки точности координатных измерений на КИМ. Существующие методы оценки точности не полностью соответствуют требованиям обеспечения единства измерений в части охвата метрологических характеристик крупногабаритных КИМ, номенклатуры используемых при метрологическом обслуживании средств измерений, способов передачи единицы длины КИМ.

2. Передача единицы длины от линейного одномерного эталона длины прибору, функционирующему в пространственном трехмерном объеме напрямую существующими на сегодняшний день методами и средствами измерений невозможна. Идеология процедур метрологического обеспечения крупногабаритных КИМ должна подразумевать разработку

комплексной системы передачи единицы длины от эталона единицы длины, функционирующего в одномерном, линейном пространстве к координатно-измерительной машине, выполняющей измерения в трехмерной декартовой системе координат.

3. Учитывая постоянно возрастающие требования к точности изготовления деталей в машиностроении, и постоянное повышение точности КИМ, необходимо разработать методики определения погрешности крупногабаритных КИМ, соответствующие современным требованиям точности координатных измерений.

4. Фирмы-изготовители представляют потребителю весьма ограниченную информацию по метрологическим характеристикам КИМ. Информация об используемых ими методах и средствах оценки точности измерений на КИМ в большинстве своем отсутствует в широком доступе, и не может быть использована в качестве основы для разработки методики оценки точности крупногабаритных КИМ. Известные на сегодняшний день методы контроля метрологических характеристик КИМ фирмами-изготовителями предназначены для обеспечения выпуска машины и основаны, во многих случаях, на специализированном оборудовании, разработанном для этих целей.

5. Действующая в настоящее время методика поверки координатно-измерительных машин порталного типа МИ 2569-99 не охватывает КИМ других типов компоновок (стоечные, мостовые, консольные) и не полностью отвечает современным требованиям к оценке точности крупногабаритных КИМ с диапазоном измерений по одной из измерительных осей КИМ более 2-х метров.

Проведенный анализ состояния вопроса метрологического обеспечения координатных измерений на крупногабаритных КИМ показывает, что на сегодняшний день отсутствует отечественная универсальная система их метрологического обслуживания.

Учитывая изложенное выше, необходимо осуществить разработку новых, системно и научно обоснованных методов и средств оценки точности крупногабаритных КИМ, включающее все аспекты воспроизведения и передачи единицы длины КИМ, а также обновление и гармонизацию отечественной и международной нормативно-методической базы в области координатных измерений на КИМ.

Вторая глава посвящена разработке математической модели КИМ существующих типов компоновок и ее исследованию для определения влияния составляющих погрешностей элементов и узлов машины на результирующую погрешность измерений КИМ.

Математическая модель координатно-измерительной машины представляет собой математическое описание процессов преобразования измерительной информации, происходящих в КИМ в процессе ее работы, в котором влияющие факторы функционально связаны и могут оказывать влияние на конечный результат измерения. Можно выделить два главных компонента в составе координатно-измерительной машины, – измерительная система машины в составе механической реализации декартовой системы координат и щуповая головка. Датчики перемещения машины, измеряющие положение щупа относительно детали в системе координат машины, могут располагаться на различных элементах машины в зависимости от типа компоновки. С учетом этого указанные элементы КИМ рассматриваются отдельно, для каждого вида рассмотренных устройств определяется координатный код и координатная система, определяются погрешности, вносимые соответствующим видом элементов подсистемы.

Система построения математической модели КИМ базируется на принципах вариационного метода расчета погрешности механических устройств. Последняя может быть представлена в соответствии с ее физическим смыслом как полная вариация функции, описывающей основное служебное назначение устройства. В качестве входных параметров модели рассматриваются погрешности положения узлов и

элементов машины, вызванные различными физическими причинами, в качестве выходных – погрешности измерения координат на КИМ.

Вначале формируется координатный код машины, представляющий собой упорядоченную последовательность номеров обобщенных координат перемещения звеньев (элементов) измерительной системы КИМ при движении относительно соседнего звена. Координатный код несет информацию о структуре элементов, входящих в систему, и их взаимной связи. Далее на место каждого номера элемента координатного кода подставляется матрица обобщенных перемещений. Перемножая эти матрицы в порядке, заданном координатным кодом системы, и умножая матрицу-произведение на радиус-вектор измерительного щупа, получаем векторное уравнение (модель) искомой системы.

В результате рассмотрения классификации и анализа существующих типов компонок координатно-измерительных машин установлено, что существующие типы компонок, описываемые механической реализацией декартовой системы координат, могут быть сведены к трем типам, соответствующим координатным кодами 213, 132, 123.

В работе получены точные математические модели для рассмотренных типов компонок при воздействии на элементы машины каких-либо возмущений, и возникающих вследствие этого трансляционных и ротационных составляющих погрешностей. В частности, точная математическая модель КИМ с типом компоновки, соответствующая координатному коду 213 имеет вид:

$$r_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r_p, \text{ где}$$

$$a_{11} = 1 - yrz \cdot xrz - yry \cdot xry + zrz(-xrz - yrz + yry \cdot xrx) - zry(xry + yrz \cdot xrx + yry)$$

$$a_{12} = -zrz(1 - yrz \cdot xrz - yry \cdot xry) - xrz - yrz + yry \cdot xrx + zrx(xry + yrz \cdot xrx + yry)$$

$$a_{13} = zry(1 - yrz \cdot xrz - yry \cdot xry) - zrx(-xrz - yrz + yry \cdot xrx) + xry + yrz \cdot xrx + yry$$

$$a_{14} = ztx(1 - yrz \cdot xrz - yry \cdot xry) + zty(-xrz - yrz + yry \cdot xrx) + (ztz + z)$$

$$\cdot (xry + yrz \cdot xrx + yry) + (xtx + x) - yrz \cdot xty + yry \cdot xtz + ytx$$

$$\begin{aligned}
a_{21} &= yrz + xrz + yrx \cdot xry + zrz(-xrz \cdot yrz + 1 - yrx \cdot xrx) - zry(xry \cdot yrz - xrx - yrx) \\
a_{22} &= -zrz(yrz + xrz + yrx \cdot xry) - xrz \cdot yrz + 1 - yrx \cdot xrx + zrx(xry \cdot yrz - xrx - yrx) \\
a_{23} &= zry(yrz + xrz + yrx \cdot xry) - zrx(-xrz \cdot yrz + 1 - yrx \cdot xrx) - xry \cdot yrz - xrx - yrx \\
a_{24} &= ztx(yrz + xrz + yrx \cdot xry) + zty(-xrz \cdot yrz + 1 - yrx \cdot xrx) + (ztz + z) \\
&\quad \cdot (xry \cdot yrz - xrx - yrx) + (xtx + x) \cdot yrz + xty - yrx \cdot xtz + yty + y \\
a_{31} &= -yry + yrx \cdot xrz - xry + zrz(xrz \cdot yry + yrx + xrx) - zry(-yry \cdot xry - yrx \cdot xrx + 1) \\
a_{32} &= -zrz(-yry + yrx \cdot xrz - xry) + xrz \cdot yry + yrx + xrx + zrx(-yry \cdot xry - yrx \cdot xrx + 1) \\
a_{33} &= zry(-yry + yrx \cdot xrz - xry) - zrx(xrz \cdot yry + yrx + xrx) - yry \cdot xry - yrx \cdot xrx + 1) \\
a_{34} &= ztx(-yry + yrx \cdot xrz - xry) + zty(xrz \cdot yry + yrx + xrx) + (ztz + z) \cdot (-yry \cdot xry - yrx \cdot \\
&\quad xrx + 1) - yry(xtx + x) + yrx \cdot xty - xtz + ytz \quad , \text{ где}
\end{aligned}$$

xtx, xty, \dots, ztz – трансляционные и ротационные компоненты параметрических погрешностей,

$r_p(x_p, y_p, z_p)$ – радиус-вектор щупа,

$r_o(x_o, y_o, z_o)$ – радиус-вектор искомой точки «О» измерительного объема КИМ.

Также были разработаны упрощенные, но достаточно точные для практики математические модели КИМ. Для КИМ типов компоновки с координатным кодом 213 математическая модель будет иметь вид:

$$r_o = \begin{pmatrix} 1 & -zrz - xrz - yrz & zry + xry + yry & ztx + z(xry + yry) + xtx + x + ytx \\ yrz + xrz + zrz & 1 & -zrx - xrx - yrx & zty - z(xrx + yrx) + x \cdot yrz + xty + yty + y \\ -yry - xry - zry & yrx + xrx + zrx & 1 & ztz + z - x \cdot yry + xtz + ytz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r_p$$

Для машин с координатным кодом 132:

$$r_o = \begin{pmatrix} 1 & -zrz - xrz - yrz & zry + xry + yry & ytx - y(zrz + xrz) + ztx + z \cdot xry + xtx + x \\ yrz + xrz + zrz & 1 & -zrx - xrx - yrx & yty + y + zty - z \cdot xrx + xty \\ -yry - xry - zry & yrx + xrx + zrx & 1 & y(xrx + zrx) + ytz + ztz + z + xtz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r_p$$

И для машин с координатным кодом 123:

$$r_o = \begin{pmatrix} 1 & -xrz - yrz - zrz & xry + yry + zry & ztx + z(xry + yry) + ytx - y \cdot xrz + xtx + x \\ xrz + yrz + zrz & 1 & -xrx - yrx - zrx & zty - z(xrx + yrx) + yty + xty + y \\ -xry - yry - zry & xrx + yrx + zrx & 1 & ztz + z + y \cdot xrx + xtz + ytz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} r_p$$

Разработанная математическая модель КИМ позволяет осуществлять моделирование измерений любых геометрических параметров с учетом как систематических, так и случайных флуктуаций погрешностей элементов

машины. Для решения задач метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ была разработана математическая модель измерений одномерной меры длины в объеме КИМ.

Математическая модель измерений одномерной меры длины (ОМД) с номинальным значением длины L представляет собой математическое описание процесса измерений меры, расположенной в измерительном объеме машины в некоторой позиции с центром меры в точке с координатами x_0, y_0, z_0 (рис. 1) и находящаяся под углами α - угол наклона проекции меры в плоскости XY от оси X , $\alpha = 0 \dots 180^\circ$ и β - угол наклона меры в плоскости XZ , измеряя от плоскости XY , $\beta = -90 \dots 90^\circ$.

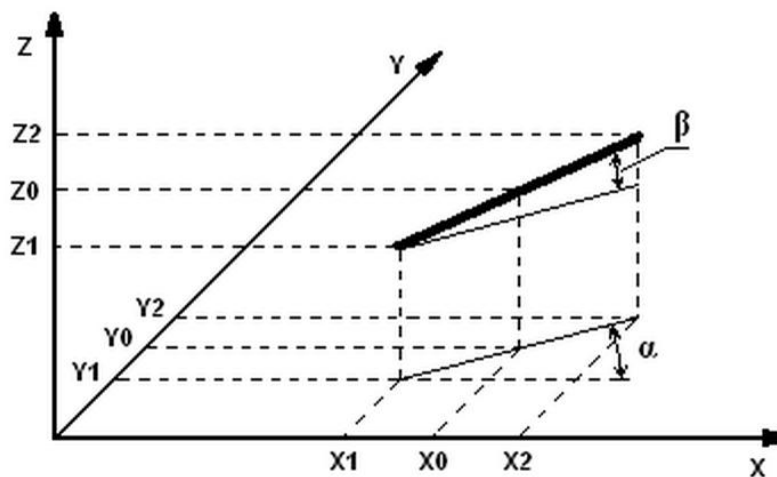


Рис. 1 Расположение ОМД в пространстве КИМ

Отклонение между номинальным значением длины меры и «измеренным» значением $L_i(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0)$ для случая отсутствия компенсации определяется как: $\Delta L(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0) = L_i(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0) - L$.

$$L_i(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0) = \sqrt{(DX_i)^2 + (DY_i)^2 + (DZ_i)^2}$$

$$DX_i = x_2(L, \alpha, \beta, X_0) + \Delta x(x_2(L, \alpha, \beta, X_0), y_2(L, \alpha, \beta, Y_0), z_2(L, \alpha, \beta, Z_0)) - (x_1(L, \alpha, \beta, X_0) + \Delta x(x_1(L, \alpha, \beta, X_0), y_1(L, \alpha, \beta, Y_0), z_1(L, \alpha, \beta, Z_0))))$$

$$DY_i = y_2(L, \alpha, \beta, Y_0) + \Delta y(x_2(L, \alpha, \beta, X_0), y_2(L, \alpha, \beta, Y_0), z_2(L, \alpha, \beta, Z_0)) - (y_1(L, \alpha, \beta, Y_0) + \Delta y(x_1(L, \alpha, \beta, X_0), y_1(L, \alpha, \beta, Y_0), z_1(L, \alpha, \beta, Z_0))))$$

$$DZ_i = z_2(L, \alpha, \beta, Z_0) + \Delta z(x_2(L, \alpha, \beta, X_0), y_2(L, \alpha, \beta, Y_0), z_2(L, \alpha, \beta, Z_0)) - (z_1(L, \alpha, \beta, Z_0) + \Delta z(x_1(L, \alpha, \beta, X_0), y_1(L, \alpha, \beta, Y_0), z_1(L, \alpha, \beta, Z_0))))$$

В результате применения компенсации параметрических погрешностей, удастся скомпенсировать основное (большее) значение каждой параметрической погрешности, но остается некоторое недокомпенсированное значение, имеющее как постоянную составляющую, и составляющую, изменяющуюся случайным образом. При осуществлении компенсации погрешностей отклонение между «измеренным» $L_r(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0)$ и номинальным значением длины равно: $\Delta L_k(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0) = L_r(L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0) - L$.

Для целей проведения метрологического обслуживания КИМ с использованием мер длины нас будет интересовать вопрос, при какой длине, линейных позициях и угловом положении ОМД в измерительном объеме машины, измерения меры длины позволит выявить существующие погрешности КИМ максимально полно. В работе осуществлен расчет погрешности измерений длины ОМД для положений ОМД в пространстве КИМ, задаваемого при последовательном варьировании параметров положения меры в объеме машины $L, \alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0$ для случаев наличия и отсутствия компенсации погрешностей КИМ.

В результате анализа погрешностей измерений ОМД в зависимости от различных положений меры длины в пространстве установлено:

- Наблюдается рост погрешности измерения при увеличении длины измеряемой меры. В случае отсутствия компенсации погрешностей на КИМ характер зависимости максимального значения погрешности измерений от длины меры является близким к линейному.

- Для различных позиций меры в объеме КИМ не выявляется значительных отклонений максимального значения погрешности. Таким образом, для определения наилучшей позиции меры может быть рекомендовано расположение меры в позиции, близкой к центру измерительного объема машины.

- Зависимости максимального значения погрешности от углов поворота α и наклона β имеют сложный характер в зависимости от

конкретных значений величин параметрических погрешностей, и максимальное значение отклонения смещается в зависимости от длины ОМД. Отмечается, что максимальное значение погрешности обнаруживается при значениях углов, близких к главным диагоналям КИМ, в области углов $\alpha=135..155^\circ$ и $\beta=-30..-40^\circ, 30..40^\circ$. Данный вывод позволяет дать рекомендации о расположении меры в области угла поворота $\varphi=35..45^\circ$ от оси X в плоскости XY и угла наклона $\theta=35..45^\circ$ в вертикальной плоскости относительно плоскости XY для выявления максимальной погрешности измерений.

- Применение компенсации трансляционных и ротационных составляющих погрешностей позволяет значительно снизить максимальную погрешность измерений меры длины даже при наличии недокомпенсированной систематической составляющей и случайных составляющих параметрических погрешностей.

- Исследование влияния температуры на погрешность измерений показывает, что температура оказывает значительное влияние на результирующую погрешность измерений как в случае наличия компенсации параметрических погрешностей, так и в случае их отсутствия. Влияние погрешности измерений в результате температурных деформаций возрастает с увеличением измеряемых размеров и при измерении размеров свыше 100 мм является доминирующей, что позволяет рекомендовать проведение обязательной коррекции (компенсации) температурного влияния при проведении процедур метрологического обслуживания КИМ.

В результате анализа математических моделей щуповых головок КИМ показано, что погрешность щуповой головки не зависит от пространственного расположения щупа и головки в объеме КИМ в процессе измерения (т.е. координат положения щупа относительно измеряемой детали), а определяется направлением касания, или направлением измерительного усилия, воздействующего со стороны детали через

измерительный щуп (наконечник) на измерительную головку, и является функцией конструктивных характеристик щуповой головки.

Выработаны рекомендации по проведению отдельного теста измерительной головки в процессе проведения метрологического обслуживания КИМ. Определение погрешности измерительной головки должно подразумевать измерение эталонного объекта, обладающего малым отклонением формы по всем возможным направлениям касания щуповой головкой, наиболее удобной формой которого является шар. Отклонение формы такого калибровочного шара должно быть намного меньше (минимум в 3 раза) чем погрешность измерительной головки в данной конструктивной реализации.

На основе разработанных математических моделей механической реализации декартовой системы координат, щуповой головки КИМ, модели измерений одномерного эталона длины и модели влияния внешних условий разработана математическая модель измерений длины на КИМ, которая позволяет рассчитать зависимость неопределенности измерений длины от различных влияющих факторов, участвующих в модели. Данный алгоритм моделирования измерений длины в измерительном пространстве КИМ является «виртуальной» КИМ для случая измерений линейных размеров. «Виртуальной» КИМ называется алгоритм или программа для расчета погрешностей геометрических параметров конкретных деталей, изготавливаемых в производстве, на основе имеющихся данных о погрешностях измерительной машины и внешних влияющих факторах, основывающейся на моделировании реальных состояний геометрии КИМ, щуповой системы и условий окружающей среды. Полученные в диссертации формулы для расчета погрешностей измерений координат в измерительном объеме КИМ с учетом параметрических погрешностей позволяют построить модель измерений любых геометрических параметров при известных функциональных зависимостях этих параметров от значений координат точек, измеряемых на КИМ.

В третьей главе осуществлена разработка методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ.

Установлено, что применение прямого метода оценки точности для крупногабаритных КИМ на основе последовательного воссоздания всех точек измерительного объема КИМ с помощью эталонных плит и концевых мер длины невозможно, так как предполагает применение эталонных плит размером более 2x2 м с малым отклонением от плоскостности, их точного пространственного расположения для обеспечения перпендикулярности в моделировании плоскостей системы координат, а также концевых мер длины с номинальным размером более 2-х метров.

В результате математического моделирования показано, что погрешности крупногабаритных КИМ существующих типов компоновок описываются параметрическими (трансляционными и ротационными) погрешностями элементов КИМ. Параметрические погрешности определяются из условия, что подвижные элементы ее конструкции, перемещаясь вдоль осей координат, как твердые тела имеют в каждой точке перемещения 6 степеней свободы на каждую ось, характеризующиеся 3-мя линейными (трансляционными) перемещениями и 3-мя угловыми (ротационными) колебаниями, а также отклонением от перпендикулярности осей координат КИМ.

Разработана методика измерения параметрических погрешностей с помощью лазерной интерференционной измерительной системы в соответствующей конфигурации оптических элементов - интерферометров и отражателей (ретрорефлекторов), подразумевающая определение следующих компонентов параметрических погрешностей крупногабаритной КИМ: погрешностей измерения линейных перемещений, отклонений от прямолинейности перемещения, малых угловых поворотов и взаимной перпендикулярности координатных осей КИМ (рис. 2). Отмечается, что при использовании модели параметрических погрешностей КИМ, осуществляются измерения прямолинейных отрезков рабочего пространства

по отдельным направлениям, необходимым для определения параметрических погрешностей системы координат КИМ, что не требует применения уникальных артефактов, и позволяет провести измерения за ограниченный отрезок времени.

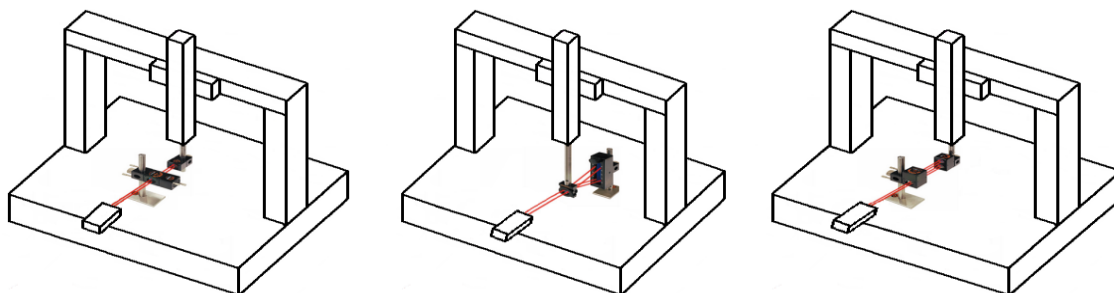


Рис. 2. Определение трансляционных и ротационных параметрических погрешностей КИМ с помощью лазерной интерференционной измерительной системы.

В результате математического моделирования установлено, что необходимо проведение проверки метрологических характеристик при использовании одномерных мер длины для расположения мер длины вдоль координатных осей X , Y , Z и для расположения в пространстве вдоль четырех главных диагоналей измерительного объема КИМ. На основе данных выводов в диссертации разработан метод применения устройства с концевыми мерами длины в качестве одномерной меры длины и методика его расположения в пространстве КИМ (рис. 3).

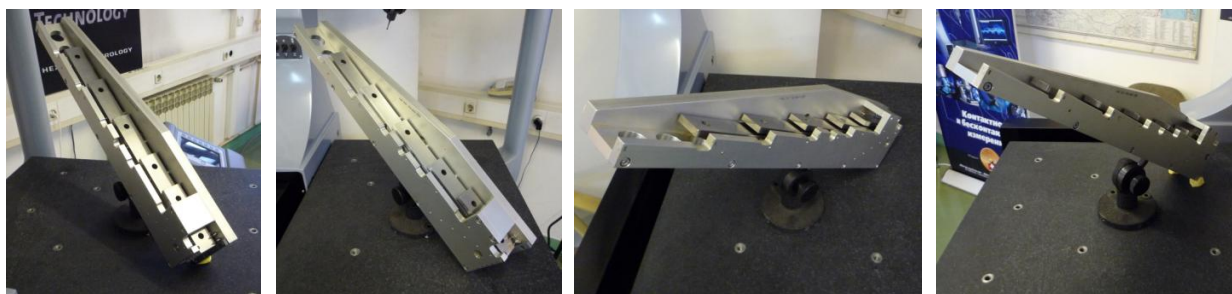


Рис. 3 Расположение устройства с концевыми мерами длины при проведении измерений вдоль главных диагоналей измерительного объема КИМ.

Разработана одномерная разъемная мера длины для определения погрешностей механической реализации декартовой системы координат крупногабаритных КИМ. Особенность конструкции заключается в использовании различных элементов меры, определяющих длину образца, и

элементов опоры (крепления). Эталонная длина обеспечивается с помощью воспроизводимой комбинацией сфер и концевых мер длины (КМД), находящихся в непосредственном контакте. Элементы опоры состоят из разъемной металлической рамы (швеллера), на которой закрепляются сферы и меры длины (рис. 4). Требуемая длина измерений достигается необходимым количеством сфер и мер длины, расположенных по одной прямой. Сферы (1) чередующиеся с концевыми мерами длины (3), присоединяются с помощью пружин (2) к металлической раме (6). Компенсационная пружина (5) на крайней сфере прижимает комбинацию из сфер и мер длины к крайней сфере противоположной стороны с заданным усилием. Крайняя сфера (на схеме слева) зафиксирована на раме неподвижно с помощью кронштейна (4). Таким образом, суммарная длина меры, образующиеся из последовательного соединения сфер и мер длины определяет длину эталонного образца. Рама (6) состоит из разъемных компонентов достаточно небольшой длины, которые могут легко перемещаться различными видами транспорта.

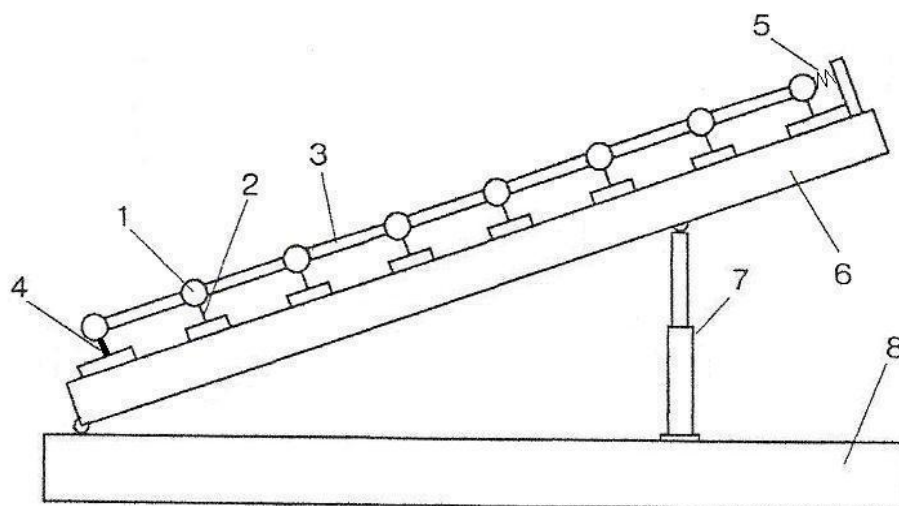


Рис. 4. Конструкция одномерной разъемной меры длины.

Требуемое число сегментов рамы определяется необходимой длиной измерений. С помощью стойки (7), регулируемой по высоте, мера длины,

находящаяся на измерительном столе (8) КИМ, может располагаться в различных позициях в измерительном объеме КИМ.

В работе проведен расчет стандартной неопределенности меры с учетом неопределенности составляющих мер – КМД и сфер с малым отклонением формы, а также составляющих, возникающих в результате прогиба рамы под действием собственного веса и веса КМД, и соответствующего смещения координат центров шаров.

Стандартная неопределенность одномерной разъемной меры длины для координаты n -ой позиции равна:

$$u_{\text{омд}_n} = \sqrt{n \cdot (u_{\text{кк}}^2 + u_{\text{вк}}^2) + (n + 1) \cdot (u_{\text{кф}}^2 + u_{\text{кд}}^2) + u_{\text{поз}_n}^2}, \text{ где}$$

$u_{\text{кк}}$, $u_{\text{вк}}$ – неопределенности калибровки и выравнивания КМД,

$u_{\text{кф}}$, $u_{\text{кд}}$ – неопределенности отклонения формы и диаметра шара,

$u_{\text{поз}_n}$ – неопределенность, возникающая в результате смещения центров шаров из-за прогиба рамы.

Сформулированы научно-обоснованные требования к материалам и конфигурации рамы меры, погрешностям установки КМД на раме, погрешностям длин КМД, диаметров и отклонения формы сфер.

Разработана методика определения погрешностей КИМ с помощью разъемной одномерной меры длины. Погрешность определяется при помощи трехмерных измерений эталона длины, располагающегося в различных пространственных положениях в объеме КИМ. Так как длина одной координаты (оси) крупногабаритных КИМ обычно значительно больше двух других осей, необходимо производить измерения в следующих пространственных позициях (рис. 5):

- в кубическом пространственном объеме, занимающий часть всего измерительного объема КИМ (рис. 5а),

- вдоль измерительных прямых, расположенных по диагоналям измерительного объема КИМ (рис. 5б),

- вдоль осей координат X, Y, Z КИМ (рис. 5в)

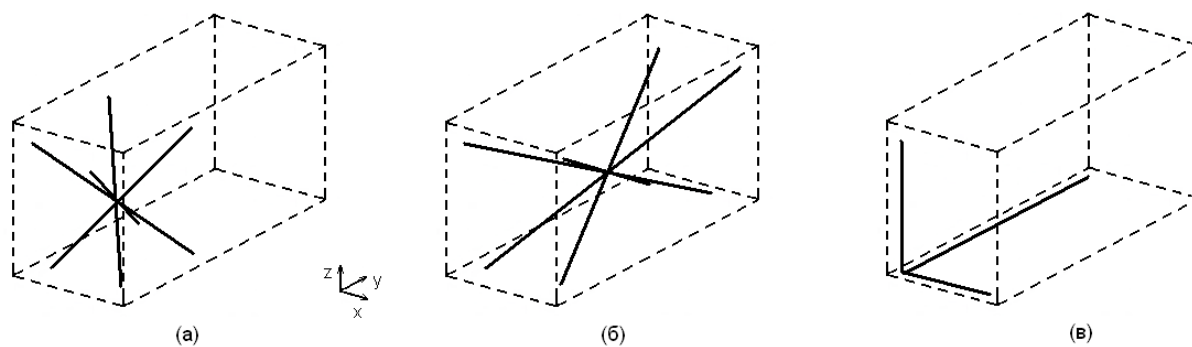


Рис. 5. Расположение меры длины в объеме КИМ.

В силу простоты конструкции меры, ее сборка-разборка, а также сам процесс измерений, могут осуществляться в том числе, и силами инженерного состава (операторов КИМ) на предприятии заказчика после соответствующего обучения, и не требует привлечения специалистов-метрологов высокой квалификации, что позволяет использовать данную меру длины также для периодической проверки точности КИМ. Отмечается, что данная мера длины не содержит дорогостоящих компонентов по сравнению с другими способами проверки точности крупногабаритных КИМ (лазерных интерферометрических измерителей перемещений, лазерных трекеров), что вместе с преимуществами данного средства, рассмотренными выше, позволяет рекомендовать данный метод для проведения поверки и калибровки крупногабаритных КИМ с длиной координатных осей до 6 метров.

Разработан метод определения погрешности измерений длины крупногабаритных КИМ с помощью лазерной интерферометрической измерительной системы либо лазерного трекера. Лазерный трекер представляет собой устройство измерений координат в пространстве в сферической системе координат. В разработанном методе предусматривается использование лазерного трекера в режиме одиночного канала измерения дальности, в котором расчет координат измерений производится только на основании дальномерного интерференционного канала лазерного трекера. В этом случае угловые каналы трекера не задействованы, и суммарная неопределенность измерений трекера

соответствует неопределенности измерения линейного размера (длины), расположенного вдоль луча лазера.

Методика подразумевает измерение длины на дистанции, образываемой перемещением отражателя лазерного трекера, закрепленного на месте щуповой головки крупногабаритной КИМ. Расположение линий измерений при использовании лазерной измерительной системы соответствует расположению линий измерения, применяемых при измерениях с помощью одномерной разъемной меры длины. Пример расположения лазерных измерительных систем для измерения вдоль главных диагоналей измерительного объема КИМ показан на рис. 6.

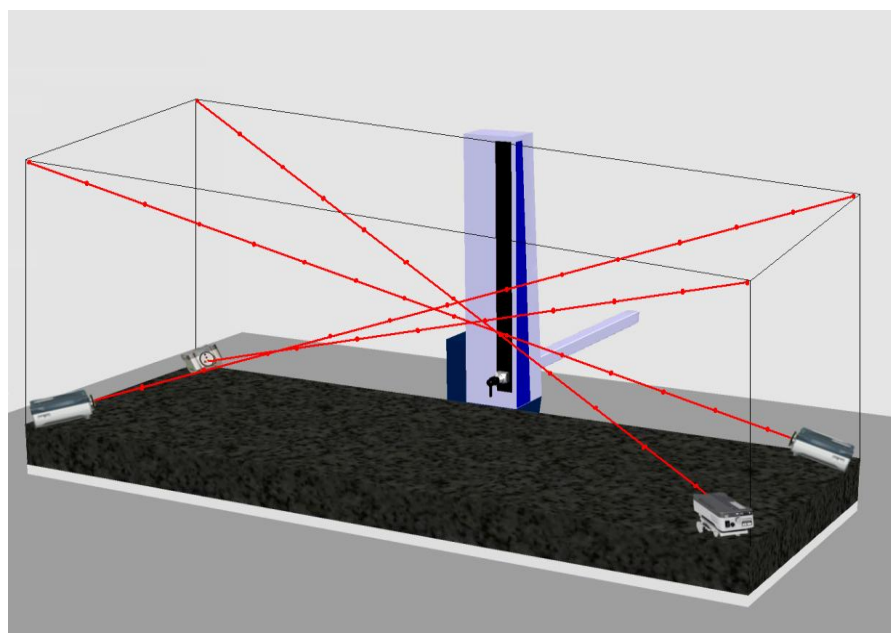


Рис. 6. Расположение лазерной измерительной системы в объеме КИМ.

Существенным достоинством данного метода является возможность его применения для больших измерительных диапазонов (до 40м), чем обеспечивается покрытие всех крупногабаритных КИМ существующих типов компоновок. Недостатком метода измерений длины с помощью лазерного трекера является высокая стоимость самого трекера. Однако в случае использования КИМ с диапазоном измерений по одной оси более шести метров, когда с помощью одномерной разъемной меры длины невозможно полностью выявить погрешности КИМ, использование этого

метода позволяет определить погрешность измерений длины на всем измерительном диапазоне крупногабаритной КИМ.

На основании анализа компонентов погрешностей и рассмотренных математических моделей щуповых головок КИМ разработана методика определения погрешностей щуповой головки. Прямой метод определения погрешностей измерительной головки при помощи эталонной сферы с малым отклонением формы позволяет определить погрешности щуповой головки вне зависимости от типа и конструктивных особенностей используемой головки (рис. 7).

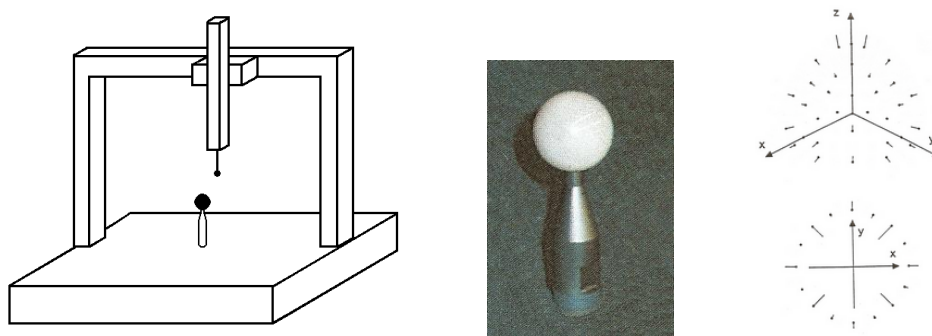


Рис. 7. Определение погрешностей щуповой головки.

В четвертой главе излагаются вопросы разработки основополагающих нормативно-методических документов по обеспечению метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ.

Проведенные в диссертации разработки и исследования математических моделей КИМ и разработанные методы и средства метрологического обслуживания КИМ позволили разработать научно-обоснованные методики испытаний с целью утверждения типа, поверки и калибровки крупногабаритных КИМ.

Разработанная нормативная база позволила провести испытания с целью утверждения типа крупногабаритных КИМ и осуществлять их поверку.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования и проверки адекватности разработанных в работе моделей.

Для проверки адекватности разработанных моделей, в соответствии с разработанной в диссертации методикой, сначала проводилось измерение параметрических погрешностей КИМ. Далее осуществлялось измерение длины одномерного эталона длины. Координаты каждой измеренной на КИМ точки пересчитывались в соответствии с формулой математической модели для данной компоновки КИМ. Для каждого измеренного значения длины одномерного эталона длины осуществлялся расчет длины для случая наличия и отсутствия компенсации параметрических погрешностей в соответствии с математической моделью КИМ. Анализ результатов измерения длины одномерной меры длины для случая нескорректированных и скорректированных с учетом математической модели координат точек измерения показывает значительное уменьшение погрешности измерений мер для случая скорректированных координат (до 10 раз). Полученные результаты подтверждают правильность метода проведения компенсации параметрических погрешностей КИМ, и в целом, подтверждают адекватность математической модели КИМ.

С целью апробации разработанных методов определения параметрических погрешностей крупногабаритных КИМ проведены экспериментальные измерения погрешности с помощью лазерной измерительной системы. В результате апробации установлено, что предлагаемый метод измерений погрешностей КИМ с помощью лазерного интерференционного измерителя перемещений позволяет осуществить измерение параметрических погрешностей КИМ, и может быть рекомендован как для определения существующих параметрических погрешностей, так и для создания данных для математической компенсации (коррекции) систематической составляющей параметрических погрешностей крупногабаритных КИМ.

С целью экспериментальной проверки и апробации возможности проведения процедур поверки и калибровки крупногабаритных КИМ проводилось экспериментальное исследование крупногабаритной КИМ

мостовой и стоечной типов компоновок с помощью одномерной эталонной меры длины и лазерной измерительной системы (лазерного трекера). Результаты эксперимента показывают, что разработанная методика измерений позволяет выявить остаточные значения недокомпенсации параметрических погрешностей крупногабаритных КИМ и сделать выводы о соответствии характеристик погрешности измерения линейных размеров предельно допускаемым значениям, заявленным фирмой-производителем.

Осуществлялось экспериментальное исследование влияния температурных деформаций на погрешность измерений на КИМ. Для определения влияния температуры окружающей среды смоделировано изменение температуры в помещении измерительной лаборатории как функции времени, представляющее собой имитацию реального температурного цикла в производственных условиях. В результате экспериментального исследования установлено, что циклические колебания температуры оказывают значительное влияние на погрешность измерений длины на КИМ, что обуславливает необходимость обязательного учета значения и осуществление компенсации температуры в процессе проведения метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ.

В Заключение приводятся основные результаты и выводы:

1. Проведенный анализ состояния и исследование существующих в России и за рубежом методов, средств и нормативной базы оценки точности крупногабаритных КИМ показал, что на сегодняшний день отсутствует отечественная универсальная система их метрологического обслуживания.

2. В рамках создания научных основ метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ на основе вариационного метода расчета погрешностей механических устройств разработана универсальная математическая модель КИМ. Показано, что существующие типы компоновок КИМ, имеющие в своей основе механическую реализацию декартовой системы координат, могут быть математически описаны с помощью произведения матриц четвертого порядка.

3. Поскольку при разработке математической модели механической реализации системы координат не требуется особого учета габаритов используемой модели, важным следствием разработанной математической модели являются:

- возможность применения разработанной математической модели для существующих типов компоновок КИМ, использующих декартову систему координат независимо от габаритов – от микро до средних и больших размеров,

- ввиду того, что сканирующая измеряющая щуповая головка является одним из видов механической реализации декартовой системы координат, использование разработанных математических моделей применительно к измеряющей щуповой головке позволяет осуществлять компенсацию ее погрешностей и таким образом уменьшить систематические составляющие погрешности щуповой головки,

- разработанные математические модели измерений координат и длины для крупногабаритных КИМ с учетом внешних и внутренних влияющих факторов позволяет разработать метод расчета неопределенности измерений геометрических параметров на КИМ – метод «виртуальной» КИМ.

4. Разработанная математическая модель КИМ и процедуры моделирования измерений длины позволили определить характер зависимости погрешности измерений длины одномерной меры длины в измерительном объеме крупногабаритной КИМ от ее расположения, включая позицию, угловое направление и длину одномерной меры длины в пространстве КИМ, при которых наблюдается наибольшее значение погрешности измерений.

5. На основе анализа характера и структуры функциональных зависимостей разработанных математических моделей сформулированы требования к методам и средствам метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ. Разработан комплекс средств метрологического

обслуживания и методики их применения: на основе модернизированного устройства с концевыми мерами длины; на основе одномерной разъемной меры длины; на основе лазерного измерителя перемещений (лазерного трекера).

6. Показана адекватность разработанных моделей и научно-технических основ измерений одномерных мер длины на крупногабаритной КИМ и возможность использования результатов для их метрологического обслуживания в целом.

7. Проведены экспериментальные исследования и апробация разработанных в диссертации методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ, а также экспериментальное исследование влияния температуры на погрешность измерений на КИМ. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанных моделей и корректность основных аналитических зависимостей и алгоритмов.

8. Разработан научно-обоснованный универсальный комплект нормативной документации по испытаниям с целью утверждения типа, поверке и калибровке крупногабаритных КИМ, основанный как на существующих средствах калибровки, так и на вновь вводимых в отечественную метрологическую практику.

9. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что разработанный комплекс методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных КИМ обеспечивает передачу единицы длины от эталона длины к крупногабаритной КИМ в диапазоне от 100 мм до 40000 мм с пределами допускаемой погрешности в 3 - 8 раз меньше погрешности крупногабаритных КИМ, что удовлетворяет современным требованиям.

На основе проведенных исследований и результатов теоретических разработок можно сделать вывод о том, что в целом в диссертации решена важная научно-техническая и метрологическая задача – разработка и

исследование методов и средств метрологического обслуживания крупногабаритных координатно-измерительных машин, имеющая существенное значение в аэрокосмической, энергетической, автомобильной и других наукоемких высокотехнологичных отраслях промышленности реального сектора экономики страны.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Брянкин С.Ю. Состояние и перспективы развития метрологического обеспечения крупногабаритных координатно-измерительных машин; ФГУП «ВНИИМС». – М.: 2011. – 34 с.: ил. – Библиогр.: 14 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 16.03.2011 № 119-В2011.
2. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Кононогов С.А., , и др. Прецизионные измерения в машиностроении. // Законодательная и прикладная метрология. М., 2010 – №5(111).
3. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г. Контроль погрешности измерений больших координатно-измерительных машин. // 9-е Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2010 г.
4. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г. Координатные методы и средства измерений геометрических параметров изделий в машиностроении. // 9-е Всероссийское совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2010 г.
5. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Кононогов С.А., и др. Сличение эталонов эвольвентных поверхностей. // Измерительная техника. М., 2010 – №5.
6. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Федосов К.В., Приоритетные направления метрологического обеспечения координатных методов измерений геометрических параметров деталей. // Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», г. Северодвинск. 2006 г.

7. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Голубев С.С., Федосов К.В. Применение математического моделирования для оценки точности координатных измерений на координатно-измерительных машинах. // Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», г. Северодвинск, 2006 г.
8. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Пошивалов А.В., Федосов К.В. Прямые и косвенные методы определения погрешностей щуповой головки координатно-измерительной машины. // Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», г. Северодвинск, 2006 г.
9. Брянкин С.Ю., Кононогов С. А., Лысенко В.Г., Пошивалов А. В. Приоритетные направления развития метрологического обеспечения прецизионного машиностроения, приборостроения и других высокотехнологичных и наукоемких производств. // 9-я Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2004 г.
10. Брянкин С.Ю., Кононогов С. А., Лысенко В.Г., Пошивалов А. В. Обеспечение единства координатных измерений геометрических параметров обработанных поверхностей. // 9-я Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2004 г.
11. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Кононогов С. А., Пошивалов А. В. Математическое моделирование измерений на координатно-измерительных машинах. // 9-я Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2004 г.
12. Брянкин С.Ю., Кононогов С. А., Лысенко В.Г., Пошивалов А. В. О методах компенсации погрешности щуповой головки координатно-измерительной машины. // 9-я Всероссийская научно-техническая

конференция «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н. Э. Баумана, М., 2004 г.

13. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Пошивалов А.В. Анализ результатов измерений профиля зуба эвольвентной меры на трехкоординатных измерительных машинах UPMС 850 и ZMC 550. // Научно-техническая конференция «Молодые метрологи – народному хозяйству России», Госстандарт России, М., 1999 г.
14. Брянкин С.Ю., Лысенко В.Г., Пошивалов А.В. Анализ результатов измерений линии зуба эвольвентной меры угла наклона на трехкоординатных измерительных машинах UPMС850 и ZMC550. // Научно-техническая конференция «Молодые метрологи – народному хозяйству России», Госстандарт России, М., 1999 г.

Для заметок