

На правах рукописи

ГОГОЛЕВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность: 05.11.15
«Метрология и метрологическое обеспечение»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2009 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 ф.-м. наук, профессор

Киселев М.И.

Кандидат технических наук, доцент

Николаев Ю.Л.

Ведущая организация:

ОАО «НИИизмерения», г. Москва

Защита состоится « » _____ 2009 г. на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу 119361, Москва, ул. Озерная, 46, ауд. 1005

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан « » _____ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук

Лысенко В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время во всём мире наблюдается существенный рост наукоемких прецизионных производств машино- и приборостроения, аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, топливно-энергетической, оборонной и других отраслей промышленности, основанных на высоких технологиях, обеспечивающих принципиально новый уровень эксплуатационных показателей изделий. В таких отраслях выпускается огромное количество деталей, содержащих сложнопрофильные поверхности (СПП): турбинные лопатки, цилиндрические и конические резьбы, кулачки, копиры, гребные винты, штампы, геликоидные и гипоидные поверхности и т.д. СПП могут быть произвольно ориентированы в пространстве и иметь произвольно ориентированные геометрические элементы с заданной номинальной формой, которая может описываться аналитически или алгоритмически. Геометрия таких деталей обусловлена их функциональным назначением.

До тех пор, пока требования к точности изготовления деталей, содержащих СПП, были невысоки, они обеспечивались технологически, или применялся комплекс средств измерений (СИ) и специальных приспособлений: проекторов, контуроскопов, инструментальных микроскопов, нутромеров, штангенциркулей, измерительных головок и т.д.

В прецизионном машино- и приборостроении основной измеряемой физической величиной является длина, до 80 – 90 % всех измерений составляют линейно-угловые. Измерения длины, как правило, являются пространственными измерениями геометрических параметров (ГП) СПП. В настоящее время точность измерений ГП деталей, содержащих СПП, тонких пленок и покрытий, элементов трехмерных объектов нанотехнологий в прецизионном машино- и приборостроении достигла долей микрометра и может быть обеспечена только стопроцентным контролем.

Под термином «геометрические параметры» подразумеваются любые линейные и угловые величины, соотношения между ними, характеризующие

форму объекта и взаимное расположение его элементов. ГП используются для математического описания взаимосвязи геометрии поверхности детали и ее эксплуатационных свойств. Теоретически определенные ГП являются сложными аналоговыми функциями от координат точек, непрерывно расположенных на реальной поверхности, функционалами или результатами расчетов по алгоритмам, реализующих их математическое определение. ГП можно представить в виде:

$$ГП = f(q_{1,1}, \dots, q_{1,m}, \dots, q_{i,1}, \dots, q_{i,m}, \dots, q_{n,1}, \dots, q_{n,m}) \quad (1)$$

где $q_{i,1}, \dots, q_{i,m}$ - координаты i -ой точки ($i = \overline{1..n}$, $n \rightarrow \infty$) в заданной СК с $(n+1)$ - степенями свободы, лежащей на реальной поверхности детали. Для ортогональной декартовой СК $q_{i,1}, \dots, q_{i,m}$ соответствуют x_i, y_i, z_i .

Пространственные измерения ГП СПП имеют принципиальные отличия от одномерных линейных измерений длины. При измерении ГП СПП необходимо задать и сохранять в процессе измерений систему координат, в которой проводятся измерения, определить в этой системе координаты точек реальной поверхности и рассчитать ГП СПП по алгоритму (1).

Практическая реализация всех элементов системы пространственных измерений ГП СПП также вносит свои особенности. Основная проблема в этой области метрологии заключается в трудности передачи размера единицы длины с требуемой точностью от первичного эталона к рабочим средствам пространственных измерений ГП СПП. Прямая передача размера единицы длины при таких измерениях от первичного эталона единицы длины традиционными одномерными методами и средствами невозможна без существенной потери точности. Необходимы специальные методы и средства, позволяющие с требуемой точностью передавать единицу длины с одновременной реализацией системы координат и алгоритмов, в соответствии с которыми вычисляются ГП СПП.

Единство исходных по точности измерений ГП СПП должно обеспечиваться специальными эталонами для передачи в промышленность единицы длины при измерении конкретных ГП СПП. Следовательно, система обеспече-

ния единства измерений ГП СПП в целом должна строиться с учётом указанных выше принципиальных отличий процедуры пространственных измерений ГП СПП от одномерных измерений длины.

Для СПП наиболее характерными ГП являются ГП отклонений формы реальной поверхности от формы номинальной поверхности. Точность измерений ГП отклонений формы СПП и привязка к эталонам в настоящее время метрологически обеспечена только для некоторых видов поверхностей: тела вращения, номинально плоские поверхности и эвольвентные поверхности. Известен ряд публикаций, в которых авторы (Кононогов С.А., Лысенко В.Г. и др.) считают целесообразным реализовать единый подход к обеспечению единства измерений ГП отклонений формы поверхностей.

В общем случае задача обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП и научно-обоснованная методология метрологического обслуживания деталей, содержащих СПП, в настоящее время решена не полностью. Не развита система воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера в специальных условиях, которая включает в себя исходные по точности СИ, средства и методы передачи размера единицы длины в области измерений ГП СПП. Действующая нормативно-методическая база не соответствует современному уровню развития средств и методов измерений ГП отклонений формы СПП.

В этой области метрологии известны работы, посвященные вопросам обеспечения единства измерений ГП СПП, таких отечественных и зарубежных ученых как Лукьянов В.С., Лысенко В.Г., Асташенков А.И., Кононогов С.А., Марков Н.Н., Каспарайтис А.Ю., Леонов В.В., Архангельский Л.А., Дич Л.З., Okafor A.C., Chen G., Lotze W., Rahman M., Heikkala J., Lappalainen K., Trapet E., Wang S-M., Wang C., Zhang G., Waldele F., Whitehouse D. и др.

Все вышеизложенное о состоянии и потребностях в обеспечении единства измерений ГП отклонений формы СПП показывает важность проблемы и представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является создание научных, технических и нормативно-методических основ обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП.

В соответствии с целью основными задачами являются:

1. Анализ и исследование основных проблем измерений ГП отклонений формы СПП, которые необходимо решить для обеспечения их единства.
2. Разработка методических основ пространственных координатных измерений ГП отклонений формы СПП, включая математическое обоснование и разработку необходимых математических моделей измерений, обеспечивающих их требуемую точность.
3. Разработка макета теоретически и экспериментально обоснованного исходного по точности СИ ГП отклонений формы СПП.
4. Разработка средств и методов передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП.
5. Разработка системы поверочных схем для СИ ГП отклонений формы СПП.
6. Разработка методик поверки СИ ГП отклонений формы СПП.
7. Экспериментальные исследования и апробация основных научных и технических положений, разработанных в диссертации, и проверка их адекватности.

Методы и средства исследований

Работа выполнена на основе теоретических и экспериментальных исследований. Разработка методических основ пространственных координатных измерений ГП отклонений формы СПП, анализ бюджета неопределенности измерений осуществлялось методами математического моделирования с использованием аппаратов аналитической и дифференциальной геометрии, дифференциального исчисления, теории вероятностей и математической статистики. В работе использовались методы имитационного моделирования, системного

анализа существующих методов и средств обеспечения единства измерений в области измерений ГП отклонений формы конкретных поверхностей (тела вращения, номинально плоские поверхности, эвольвенты). Экспериментальные исследования проводились на существующих СИ.

Научная новизна

В качестве научных результатов, впервые полученных, могут быть выделены следующие:

- Разработано математическое обоснование процедуры пространственных измерений ГП отклонений формы СПП, обеспечивающих необходимую точность, и позволяющее разработать программно-алгоритмические модели измерений ГП отклонений формы СПП;

- Получены аналитические выражения, связывающие неопределенность измерений координат точек реальной поверхности с неопределенностью измерений ГП отклонения формы СПП;

- В результате проведенного анализа существующих систем обеспечения единства измерений ГП отклонения формы конкретных поверхностей выявлены общие элементы, связывающие их, заключающиеся в материализации криволинейной системы координат, воспроизведении единицы длины и передачи ее размера вдоль координатных осей, и наличии алгоритмов, в соответствии с которыми вычисляются ГП отклонения формы СПП;

- Разработан обобщенный критерий выбора исходного по точности СИ ГП отклонения формы СПП;

- Научно обоснованы и разработаны средства и методы передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонения формы СПП;

- На основе единого научно обоснованного подхода разработана система поверочных схем для СИ ГП отклонений формы СПП;

- Разработана научно обоснованная нормативно-методическая база для метрологического обслуживания СИ ГП отклонений формы СПП.

В диссертационной работе решена важная народнохозяйственная задача обеспечения единства измерений в области измерений ГП отклонений формы СПП для совокупности различных видов, методов и средств измерений, составляющих их техническую основу.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты разработок и исследований

1. Особенность системы воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера в области измерений ГП отклонений формы СПП заключается в материализации криволинейной системы координат, измерении координат точек реальной поверхности и наличии алгоритма, задающего математический оператор определения ГП отклонений формы СПП.

2. Процедура измерений ГП отклонений формы СПП определяется математическими моделями номинальной, реальной и координатной поверхностей, уравнением нормали от координатной поверхности к реальной, локальным отклонением формы как расстояние между двумя точками, лежащими на реальной и координатной поверхностях, и моделью, определяющей ГП отклонений формы СПП.

3. Разработанные математические модели объектов, методов и процедуры измерений ГП отклонений формы СПП позволяют связать неопределенность измерений координат точек реальной поверхности с неопределенностью измерений ГП отклонения формы СПП.

4. Макет исходного по точности СИ ГП СПП на базе КИМ ZMC-550 фирмы Carl Zeiss может быть использован в качестве технической основы специального эталона для воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера в области измерений ГП отклонений формы СПП.

5. Передачу размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП можно выполнять с помощью материальных и «виртуально-материальных» мер, физически или косвенно реализующих координатную поверхность.

6. Обобщенная поверочная схема для СИ ГП отклонений формы СПП позволяет разработать поверочную схему для СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей, таких как турбинные лопатки.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что полученные результаты позволили обеспечить единство измерений ГП отклонений формы СПП. Созданный в рамках диссертационной работы макет исходного по точности СИ ГП отклонений формы СПП может войти в состав Государственного специального эталона единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП, осуществлять воспроизведение, хранение единицы длины и передачи ее размера в специальных условиях. Разработанные в диссертации методы и средства поверки и калибровки позволяют осуществлять передачу размера единицы длины СИ ГП отклонений формы СПП. Разработанные нормативно - методические документы прошли успешную апробацию, что позволяет говорить о создании нормативной основы обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП. Основные положения и результаты работы внедрены на предприятиях, использующих координатные методы и средства измерений ГП отклонений формы СПП.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на 2-х международных конференциях и симпозиумах, а также на 3-х всероссийских конференциях и семинарах, в том числе: Международном радиоэлектронном форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харьков, 2005), 10-ой Всероссийской научно-технической конференции: «Состояние и проблемы измерений» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 21-25 апреля 2008), 32-ом Международном семинаре-презентации и выставке «Автоматизация. Программно-технические средства. Системы. Применения» (Москва, 2008), 5-ой Научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение

измерительных систем» (Пенза, 2008), Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» с международным участием, посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 16-17 декабря 2008).

Публикации

По результатам исследований и разработок опубликовано 6 печатных работ, 4 тезисов докладов, зарегистрирован отчет по НИР и 2 методики института.

Объем и структура диссертации

Диссертация содержит аналитический обзор состояния проблемы, теоретическую часть, результаты экспериментальных исследований, данные по разработке макета исходного по точности СИ ГП отклонений формы СПП, методов и средств передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП, результаты разработки нормативно-методических документов.

Работа состоит из Введения, 7 глав с выводами к каждой из них и Заключения, изложенных на 262 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, библиографию из 189 наименований и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении приведено обоснование постановки темы, показана ее актуальность, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна результатов работы, обоснованы и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию и анализу состояния обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП. Рассмотрены СПП, их виды и способы задания. Особенность СПП заключается в том, что поверхности, являясь сложными по своей геометрической форме, не всегда описываются

аналитически. Около 20 – 25 % деталей имеют поверхности, аналитическое описание которых затруднено. В главе проведен анализ понятия «геометрические параметры», способов их нормирования и измерений. Установлено, что специфика измерений ГП СПП заключается в материализации системы координат, измерении координат точек реальной поверхности и наличии алгоритма, задающего математический оператор определения ГП СПП. Отмечено, что в практике измерений встречаются частные случаи, когда ГП не вычисляются по результатам измерений координат точек, а определяются как длины отрезков вдоль координатной оси - прямые измерения ГП.

В главе проанализированы отечественные и международные научно-технические разработки в области обеспечения единства измерений ГП СПП. Выполнен анализ нормативно-технических документов (НТД) - государственных стандартов, методических указаний, инструкций и методик институтов, обеспечивающих единство измерений, и включающих в себя поверочные схемы, методики поверки, методики выполнения измерений, методики калибровки и т.д. Проанализированы исходные по точности СИ конкретных ГП поверхностей. Анализ состояния научных основ, НТД и эталонной базы показал, что в основном все работы, техническая база, НТД и научные исследования ориентированы на решение задач обеспечения единства измерений ГП определенных видов поверхностей: плоскости, поверхности вращения и эвольвентные поверхности. Для остальных СПП нормативно-техническая база обеспечения единства измерений ГП СПП не соответствует современному уровню развития: отсутствуют системы воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера в области измерений ГП СПП.

Установлено, что для СПП наиболее характерными ГП являются ГП отклонений формы реальной поверхности от формы номинальной поверхности. В главе проведен анализ понятия «ГП отклонений формы поверхности», способы их нормирования и измерений. Отсчет локального отклонения формы ведут от координатной поверхности, имеющей форму номинальной. В зависимости от взаимного положения и ориентации координатной поверхности в пространстве

относительно реальной поверхности, координатная поверхность может быть прилегающей, средней или заданной другим определенным способом.

Анализ существующих методов и СИ ГП отклонения формы СПП показал, что всех их объединяют общие процедуры и этапы измерений. Принцип измерений отклонений формы в конечном итоге основан на сравнении формы проверяемой (измеряемой) поверхности с материализованной координатной поверхностью. Координатная поверхность и нормали к ней образуют криволинейную систему координат (рис.1).

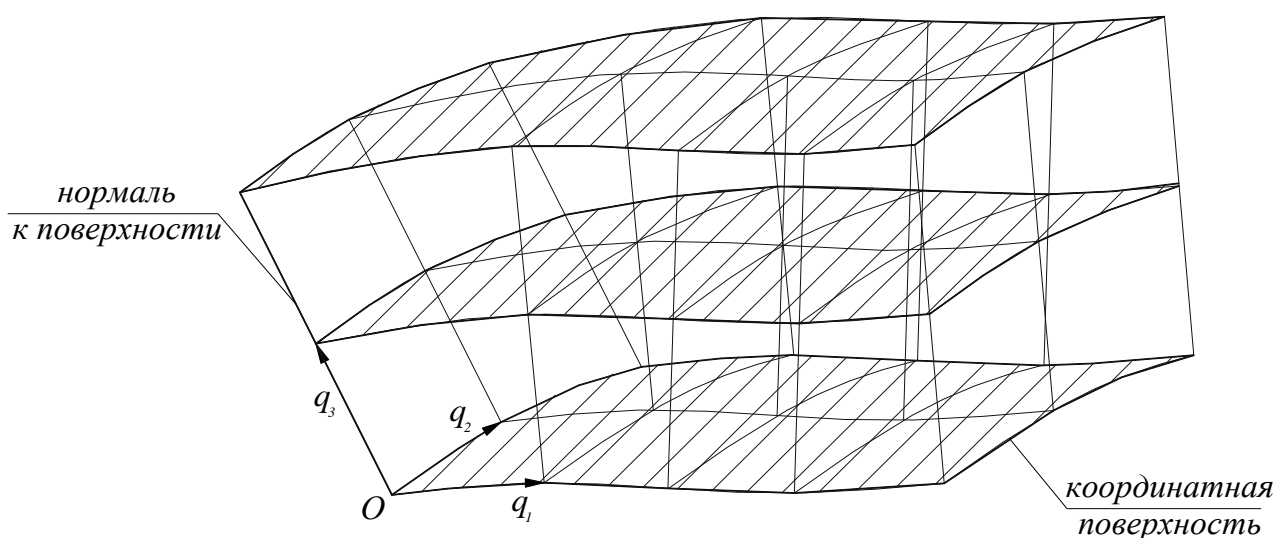


Рис. 1 Криволинейная система координат

Реализовать криволинейную систему координат можно несколькими способами: механическим и «виртуально–механическим». Особенностью механического способа реализации является физическая материализация координатной поверхности относительно реальной поверхности. «Виртуально–механическая» реализация криволинейной системы координат осуществляется путем материализации универсальной (в основном декартовой) системы координат, не связанной с формой, положением и ориентацией реальной поверхности, и виртуально (программно) строится криволинейная система координат относительно реальной поверхности в соответствии с теоретическим определением номинальной поверхности.

Средства измерений отклонений формы, в зависимости от способа материализации криволинейной системы координат можно разделить на специали-

зированные и универсальные. Тенденции развития методов и средств измерений отклонений формы СПП в основном ориентируются на универсальные СИ с «виртуально-механической» реализацией координатной поверхности.

В главе был проведен анализ методов и средств измерений ГП отклонений формы СПП с целью определения потенциально наиболее перспективных исходных по точности СИ. В зарубежных странах для измерений ГП СПП в основном применяются КИМ - прецизионные технические устройства, оснащенные мощным алгоритмическим и математическим обеспечением, обеспечивающие измерения большой номенклатуры ГП. Установлено, что наиболее перспективные с точки зрения исходных по точности СИ ГП отклонений формы СПП, являются КИМ порталного типа. Для того чтобы КИМ порталного типа сделать исходным по точности СИ необходимо решить задачи обеспечения требуемой точности измерений координат и требуемой точности вычислений ГП отклонений формы СПП.

Во второй главе в целях научного обоснования разработки и применения исходных по точности СИ ГП отклонений формы СПП, методов и средств передачи размера единицы длины разработаны методические основы пространственных координатных измерений ГП отклонений формы СПП, как наиболее перспективных, и принятых в данной работе за основу при создании макета исходного по точности СИ ГП отклонений формы СПП.

Суть методических основ состоит в математическом обосновании основных принципов и аналитических зависимостей, определяющих процедуру измерений ГП отклонений формы СПП, и оценки неопределенности измерений. В главе разработаны обобщенная математическая модель ГП отклонений формы СПП, модель измерений локального отклонения формы СПП, ряд математических моделей поверхностей.

ГП отклонений формы СПП определяется выражением:

$$ГП_{\Delta\phi} = F \left(\overset{\text{локал}}{\underset{\phi}{\curvearrowright}} \right), \quad (2)$$

где $\Delta_{\phi}^{\text{локал}}$ – локальное отклонение формы, F - функционал ГП отклонений формы СПП, например, $\max(\Delta_{\phi}^{\text{локал}})$ соответствует определению ГП отклонений формы СПП, как наибольшему расстоянию от точек прилегающей поверхности по нормали к реальной поверхности. Неопределенность измерений ГП отклонений формы СПП в основном обусловлена неопределенностью измерений локальных отклонений формы СПП и реализованным в СИ ГП отклонений формы СПП алгоритмом (2).

Локальное отклонение формы СПП – длина отрезка Δ_{ϕ} от точки, лежащей на координатной поверхности, по нормали от координатной поверхности до точки пересечения нормали и реальной поверхности:

$$\Delta_{\phi} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2 + (z_p - z_k)^2}, \quad (3)$$

где x_p, y_p, z_p - координаты точки, лежащей на аппроксимированной реальной поверхности; x_k, y_k, z_k - координаты точки, лежащей на координатной поверхности. Значения x_p, y_p, z_p и x_k, y_k, z_k определяются по результатам измерений координат точек в прямоугольной системе координат, лежащих на реальной поверхности, и алгоритмами, в соответствии с которыми они вычисляются. Неопределенность измерений Δ_{ϕ} обусловлена неопределенностью измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности, и алгоритмами в соответствии с которым определяются x_p, y_p, z_p и x_k, y_k, z_k .

В работе были разработаны математические модели номинальной; координатной; реальной и измеренной поверхностей; выражения для определения координат точек пересечения нормали от координатной поверхности с реальной поверхностью; функционалы, соответствующие математическому определению ГП отклонений формы СПП, от аргументов локальных отклонений формы СПП.

Существует три основных способа описания номинальной СПП: аналитическое; дискретное; дискретно-аналитическое. В общем виде математическая модель номинальной СПП представляет собой совокупность аналитических

выражений. Номинальная поверхность, заданная аналитически в явном виде, описывается как:

$$f_n(\mathbf{C}, y) = \sum_{j=1}^m r_j F_j^n(\mathbf{C}, y) \quad (4)$$

где $F_j^n(\mathbf{C}, y)$ – базисные функции номинальной поверхности; r_j – известные коэффициенты.

Координатную поверхность можно рассматривать как результат поступательного перемещения и поворота номинальной поверхности в пространстве. Математические преобразования ориентации координатной поверхности эквивалентны смещению и повороту системы координат, в которой задана номинальная поверхность. Координатная поверхность, определяется в соответствии с выражением:

$$h_k(\mathbf{C}', y') = \sum_{j=1}^{m-l} c_j F_j^n(\mathbf{C}', y') + \sum_{j=m-l+1}^m r_j F_j^n(\mathbf{C}', y'), \quad (5)$$

где x', y' – координаты точек в новой системе координат, c_j – коэффициенты, полученные, например, методом наименьших квадратов (МНК), методом максимального правдоподобия, методом ортогональной регрессии и др. (выбор конкретного метода зависит от вида функции (4)), таким образом, чтобы сориентировать и вписать в «облако измеренных точек» координатную поверхность с требуемой точностью. Неопределенность определения координат точек x_k, y_k, z_k , лежащих на координатной поверхности, в основном обусловлена неопределенностью измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности, и методом в соответствии с которым оценивают c_j .

Реальная поверхность отличается от номинальной поверхности за счет неточности ее изготовления. Реальная поверхность условно содержит высокочастотные и низкочастотные «неровности», вызывающие их источники имеют регулярный и нерегулярный характер. Реальную поверхность можно представить в следующем виде:

$$z_p = g(\mathbf{C}, y) = \sum_{j=1}^{\infty} k_j F_j^{pean}(\mathbf{C}, y), \quad (6)$$

где $F_j^{real}(\underline{C}, \underline{y})$ – базисные функции реальной поверхности; k_j – коэффициенты модели, $j = \overline{1, \infty}$. Вид функции $g(\underline{C}, \underline{y})$ не известен, но до начала измерений существует некая модель реальной поверхности, ее теоретическое представление.

Информацию о реальной поверхности можно получить по результатам измерений координат точек, лежащих на ней. Математическая модель измеренной поверхности представляет собой аппроксимацию реальной поверхности по результатам измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности.

$$z_{изм} = \sum_{j=1}^w t_j F_j^{изм}(\underline{C}, \underline{y}), \quad (7)$$

где $F_j^{изм}(\underline{C}, \underline{y})$ – базисные функции модели измеренной поверхности; t_j – коэффициенты модели.

Уравнение нормали от точки с координатами x_k, y_k, z_k , лежащей на координатной поверхности (5), имеет вид:

$$\frac{x - x_k}{\frac{\partial h_k}{\partial x_k}(\underline{C}_k, \underline{y}_k)} = \frac{y - y_k}{\frac{\partial h_k}{\partial y_k}(\underline{C}_k, \underline{y}_k)} = \frac{z - z_k}{-1}, \quad (8)$$

Точка пересечения нормали (8) и аппроксимированной реальной поверхности имеет координаты x_p, y_p, z_p , которые определяются системой уравнений (8) и (7). Неопределенность определения координат точки x_p, y_p, z_p в основном обусловлена неопределенностью измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности; методом в соответствии с которым определяют t_j модели (7); заменой реальной поверхности ее аппроксимирующей моделью; алгоритмами в соответствии с которыми определяют коэффициенты нормали (5); и реализованными в СИ ГП отклонений формы СПП алгоритмами (7) и (8).

В работе получены аналитические выражения, связывающие неопределенность измерений координат точек реальной поверхности с неопределенностью измерений ГП отклонений формы СПП, заданной в общем виде и для конкретных поверхностей.

Основные положения разработанных методических основ легли в основу комплекса алгоритмов и программного обеспечения в области измерений ГП отклонений формы СПП.

Третья глава посвящена разработке и теоретическому обоснованию исходных по точности СИ ГП отклонений формы СПП. Были проанализированы существующие исходные по точности СИ в области измерений ГП конкретных поверхностей: плоскости, тела вращения, эвольвентные поверхности. Были установлены общие элементы воспроизведения единицы длины в области измерений отклонений формы конкретных СПП, заключающиеся в следующем:

- основой эталонной базы прецизионного машиностроения для воспроизведения единицы длины в области измерений ГП отклонений формы конкретных поверхностей являются специальные эталоны, построенные на базе интерферометров Майкельсона, Тваймана–Грина, Фабри–Перо и др;

- исходные по точности СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей имеют общие принципы измерений, заключающиеся в задании и поддержании в процессе измерений криволинейной системы координат, в прецизионном измерении локальных отклонений формы поверхности как длин отрезков по нормали от координатной поверхности к реальной; в реализации алгоритмов, в соответствии с которыми вычисляются ГП отклонений формы поверхностей и вводятся поправки на известные систематические эффекты;

- координатная поверхность и нормаль к ней могут быть реализованы механически - поверхность гранитного моста, плоскость поверхности ртути, вращение высокоточного шпинделя кругломера и «виртуально–механически» путем механической реализации декартовой (и/или полярной) системы координат и программного обеспечения;

- анализ бюджетов неопределенности исходных по точности СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей показал, что доминирующая составляющая неопределенности измерений ГП отклонений формы обусловлена точностью реализации криволинейной системы координат. Наибольший вклад в результирующую неопределенность измерений ГП отклонений формы вносят

систематические эффекты механической реализации системы координат. Установлено, что в случае реализации системы координат в виде материальной координатной поверхности систематические эффекты достаточно сложно или вообще невозможно скомпенсировать.

Анализ существующих исходных по точности СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей и анализ выражения (1) показал, что для воспроизведения единицы длины в области измерений ГП СПП отклонений формы необходимо обеспечить следующие условия:

- воспроизвести единицу длины в области измерений координат точек в пространстве;
- обеспечить точность вычисления ГП отклонений формы СПП по результатам измерений координат.

Разработка обобщенного критерия позволила сформулировать основные требования к исходному по точности СИ отклонений формы СПП. Критерий выбора исходного по точности СИ отклонений формы СПП имеет вид:

$$u_{ГПф} \rightarrow \left| \min \left\{ \left\{ u_{СК}, u_L, u_{алг} \right\} \right\} u_{\delta} \right|, \quad (9)$$

где \cup - знак объединения неопределенностей измерений, $u_{ГПф}$ - неопределенность измерений ГП отклонений формы, $u_{СК}$ - неопределенность, обусловленная материализацией криволинейной системы координат, u_L - неопределенность воспроизведения единицы длины вдоль координатных осей системы координат, $u_{алг}$ - неопределенность, обусловленная алгоритмом в соответствии с которым вычисляются ГП отклонений формы, u_{δ} - допустимая неопределенность измерений исходного по точности СИ отклонений формы СПП.

Исходное по точности СИ ГП отклонений формы СПП должно обеспечивать материализацию системы координат, воспроизведение единицы длины вдоль координатных осей и алгоритм вычисления ГП, которые обеспечивают минимальную неопределенность при измерениях ГП отклонений формы СПП при заданных ограничениях, вызванных количеством звеньев в поверочной схеме.

Макет исходного по точности СИ предлагается построить на базе КИМ портального типа ZMC-550 фирмы Carl Zeiss, с улучшенными метрологическими характеристиками. КИМ реализует процедуру измерений координат точек реальной поверхности в декартовой системе координат. В результате анализа бюджета неопределенности и математической модели КИМ разработаны варианты реализации исходного по точности СИ ГП СПП на базе КИМ ZMC-550.

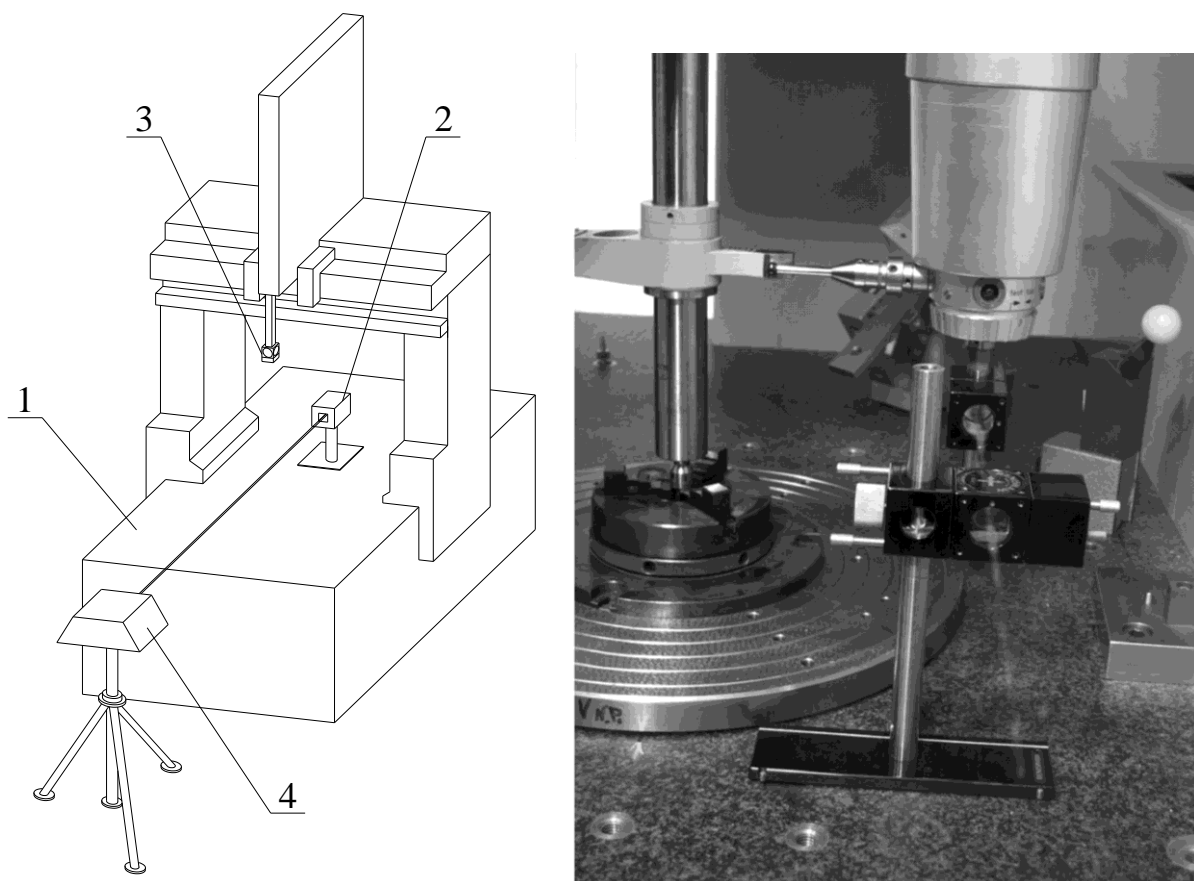


Рис. 2 Структурная схема и внешний вид исходного по точности средства измерений ГП СПП на базе интерферометров Майкельсона:

- 1 – КИМ ZMC 550; 2 – интерферометр;
3 – уголкового отражатель; 4 – лазер

Для реализации макета исходного по точности СИ ГП СПП в состав КИМ ZMC-550 (рис.2) была включена лазерная интерференционно измерительная система фирмы Renishaw, выявлены и устранены систематические эффекты механической реализации системы координат путем многократных измерений; реализовано программное обеспечение, в соответствии с разработанными в ра-

боте математическими моделями. Привязка КИМ ZMC-550, как СИ координат, к первичному эталону единицы длины осуществляется с помощью лазерной интерференционной измерительной системы, передающей для КИМ единицу длины ее шкалам, а также измеряющей систематические эффекты механической реализации системы координат КИМ. Исходное по точности СИ ГП отклонений формы СПП обеспечивает хранение единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП и передачу ее размера соподчиненным СИ с помощью мер.

В четвертой главе для решения задачи передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП был проведен анализ существующих средств и методов поверки, калибровки и испытаний СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей: плоскости, тела вращения, эвольвентные поверхности. Проведенный анализ выявил общие элементы, связывающие их и заключающиеся в передаче формы криволинейной системы координат, единицы длины вдоль координатных осей и оценке неопределенности алгоритмов в соответствии с которыми вычисляются ГП отклонений формы.

Размер единицы длины в области измерений ГП отклонений формы конкретных поверхностей в основном передается при помощи мер – материальных артефактов, представляющих собой механические реализации номинальных поверхностей, для которых передается размер единицы длины. При передаче размера единиц длины обычно проверяется близость формы координатной поверхности, воспроизводимой СИ, и номинальной поверхности, воспроизводимой мерой.

Разработка обобщенной модели средств и методов передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП позволила сформулировать выполнение укрупнено двух операций при передаче размера единицы длины:

- проверка правильности реализации криволинейной системы координат;
- проверка правильности передачи размера единицы длины вдоль оси, совпадающей с направлением нормали от реальной координатной поверхности.

Проведенный анализ показал, что проверка правильности реализации криволинейной системы координат может быть разделена на две операции:

- проверка близости реальной координатной поверхности к номинальной поверхности;
- проверка ортогональности координатной оси от координатной поверхности, вдоль которой производятся измерения ГП отклонений формы.

Размер единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП предлагается передавать двумя методами: прямым и косвенным.

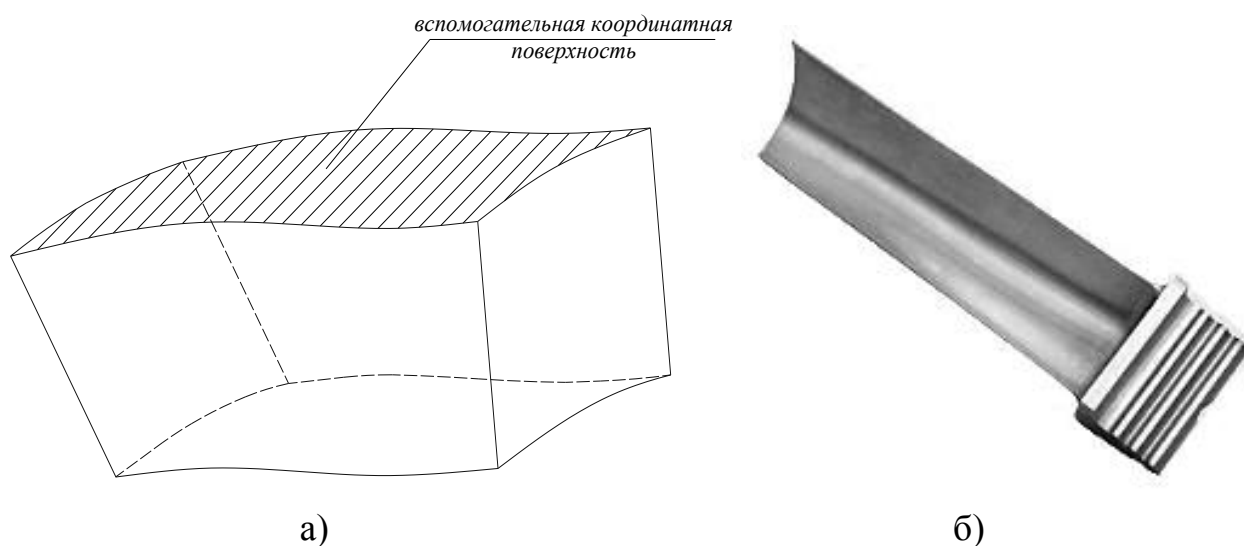


Рис. 3 Мера со вспомогательной координатной поверхностью:

- а) схематическое изображение; б) реализация меры как координатной поверхности турбинной лопатки

Передача размера единицы длины средствам измерений, в которых реализована материальная координатная поверхность, предлагается осуществлять только прямым методом с помощью мер, основная задача которых заключается в задании и поддержании координатной поверхности, имеющей форму номинальной. Меры могут содержать как нулевое отклонение формы (рис.3), так и определенное (заранее аттестованное) отклонение формы по диапазону измерений СИ ГП отклонений формы (рис.4).

Передача размера единицы длины СИ, в которых реализована «виртуально-материальная» координатная поверхность, целесообразно осуществлять прямым и косвенным методами. При прямом методе передачи размера единицы

длины в области измерений отклонений формы универсальное СИ рассматривается как специализированное, на входе которого измеряются меры ГП отклонений формы СПП. При косвенном методе передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП отдельно рассматривают передачу размера единицы длины в области измерений координат и точность реализации алгоритмов, в соответствии с которыми определяются ГП отклонений формы.

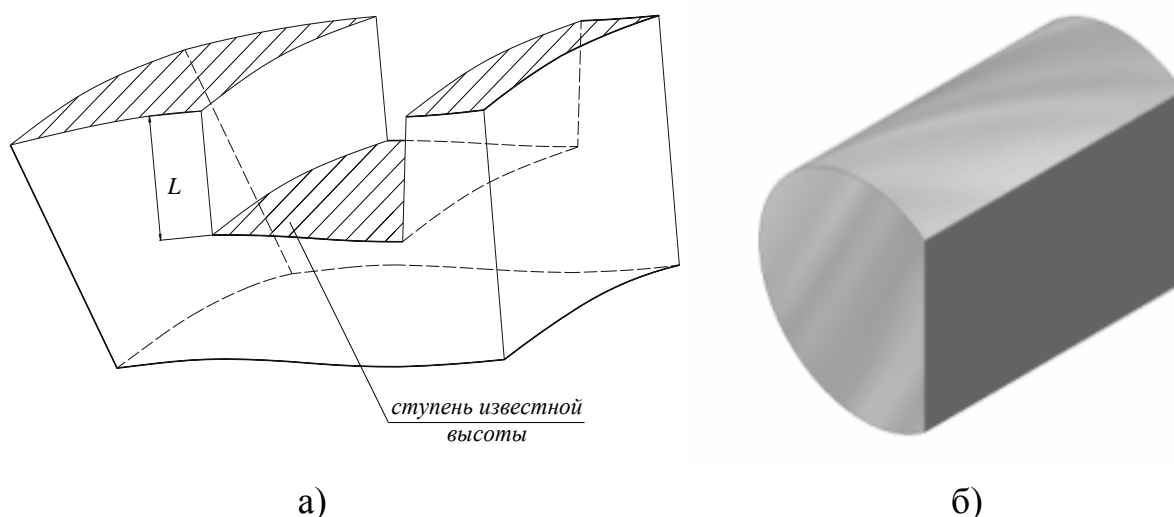


Рис. 4 Мера со вспомогательной координатной поверхностью, с аттестованной ступенью: а) схематическое изображение; б) реализация меры для измерений геометрических параметров отклонения от круглости

Существует также два альтернативных способа передачи размера единицы длины в области измерений координат: прямой метод и косвенный. Точность реализации алгоритмов определяется путем их аттестации с оценкой неопределенности измерений ГП отклонений формы СПП по результатам измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности. При прямом методе передачи размера единицы длины в области измерений координат используют меры определенной системы координат, которая реализована в проверяемом СИ или с помощью лазертрекера, с помощью которого во множестве точек рабочего объема можно передать размер единицы длины в области измерений координат.

Альтернативой прямому методу передачи размера единицы длины в области измерений координат является математическое моделирование неопределенностей измерений координат и создание мер или средств калибровки, однозначно выявляющих составляющие неопределенности. Например, с помощью лазерной интерференционной измерительной системы или плит с отверстиями (со сферами) можно оценить неопределенность измерений шкал, их неортогональности, неопределенности первичных преобразователей, и затем с помощью математических моделей спрогнозировать неопределенность измерений координат в любой точке рабочего объема КИМ.

В результате проведенных исследований, были предложены новые средства поверки и калибровки СИ отклонений формы СПП:

- меры СПП, специально адаптированные для применения при испытаниях и поверке координатных СИ;
- набор параметрических мер, предназначенных для поэлементной аттестации и поверки элементов координатных СИ.

Были разработаны алгоритмы для тестирования ПО СИ ГП отклонений формы СПП, в соответствии с которыми вычисляются ГП отклонений формы, суть которых заключается в следующем: алгоритмы генерируют координаты реальной поверхности, содержащие известные отклонения формы, затем осуществляется смещение и поворот системы координат в пространстве, полученный файл вводится в ПО СИ. По разности отклонений судят о неопределенности алгоритма.

Пятая глава посвящена разработке системы поверочных схем в области измерений ГП отклонений формы СПП. Проведенный анализ состояния обеспечения единства измерений показал необходимость разработки поверочных схем в области измерений ГП отклонений формы СПП, например, таких как турбинные лопатки, которые в настоящее время отсутствуют.

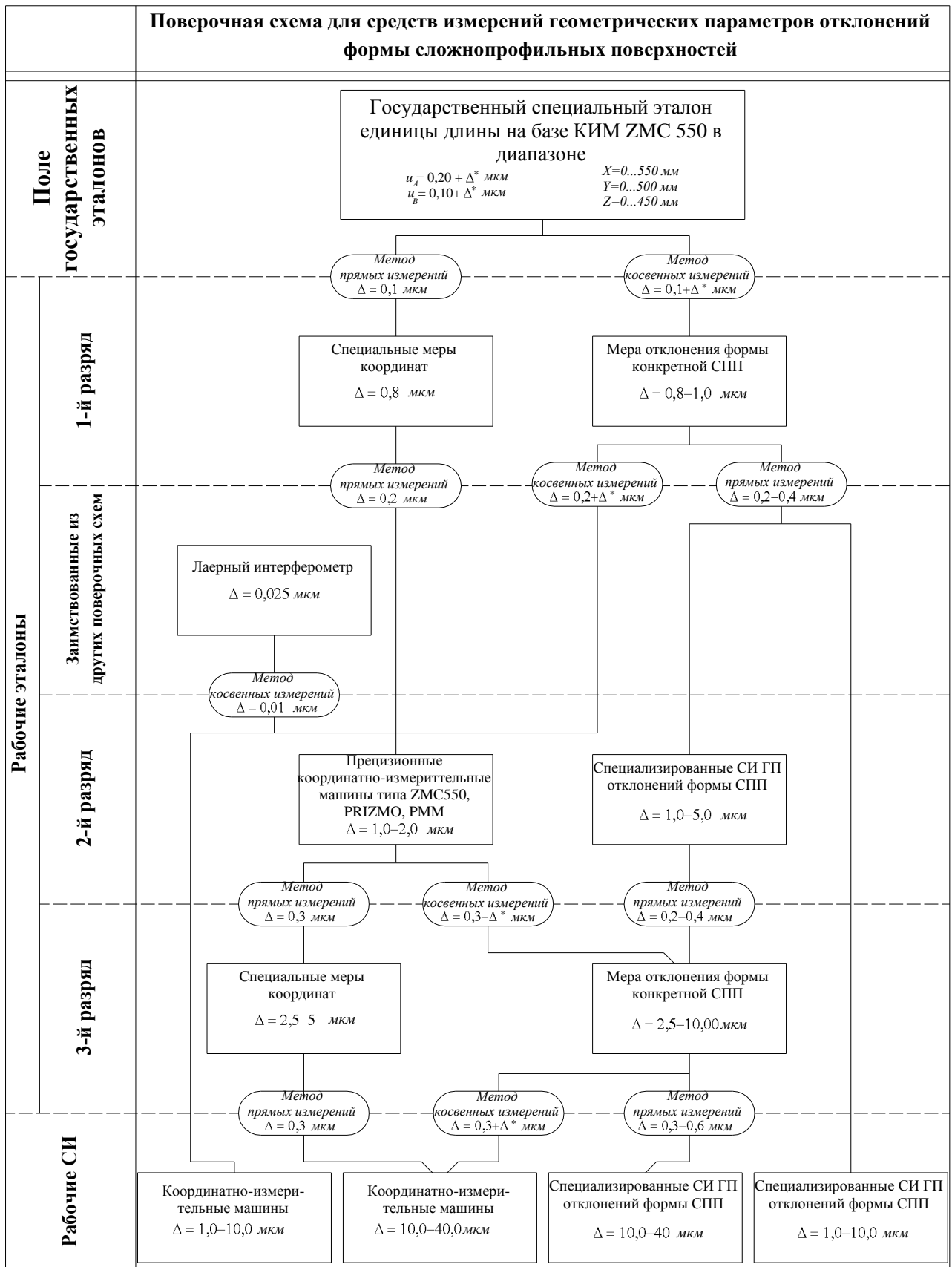
Проведенный анализ систем воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера средствами определенных ГП конкретных поверхностей выявил общие элементы, связывающие их. Системы воспроизведения и хране-

ния единицы длины и передачи ее размера в области измерений конкретных поверхностей имеют, как правило, четыре разряда: специальный эталон, рабочие эталонные меры 1-го разряда, рабочие эталоны 2-го разряда, рабочие эталонные меры 3-го разряда, рабочие средства измерений. Хотя, в общем случае, количество разрядов определяется такими факторами, как общее количество применяемых СИ, метрологические характеристики рабочих СИ, территориальное распределение СИ и т.д. и может отличаться от четырех. Установлено, что существующие поверочные схемы в основном разработаны для специализированных СИ ГП отклонений формы СПП.

На основании анализа систем воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера СИ ГП отклонений формы конкретных поверхностей и разработанных в работе средств и методов воспроизведения, хранения и передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП разработана обобщенная поверочная схема для СИ ГП отклонений формы СПП (рис. 5).

Универсальность разработанной схемы заключается в возможности применения ее для обеспечения единства измерений отклонений формы любого вида поверхностей, используемых в прецизионном машиностроении. В работе разработана поверочная схема для СИ отклонений формы конкретных СПП – турбинных лопаток. Разработанная поверочная схема может составить нормативно-методическую основу обеспечения единства измерений ГП отклонений формы турбинных лопаток (рис.6).

В шестой главе излагается процедура разработки нормативно-методических документов по обеспечению единства измерений ГП отклонений формы СПП. Приведенные выше разработки и исследования методологии пространственных измерений ГП отклонений формы СПП позволили разработать методики поверки СИ ГП отклонений формы СПП, составляющие основу нормативно-методической базы обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП.



Примечание – Δ^* зависит от вида ПСФ

Рис. 5 Поверочная схема для СИ ГП отклонений формы СПП

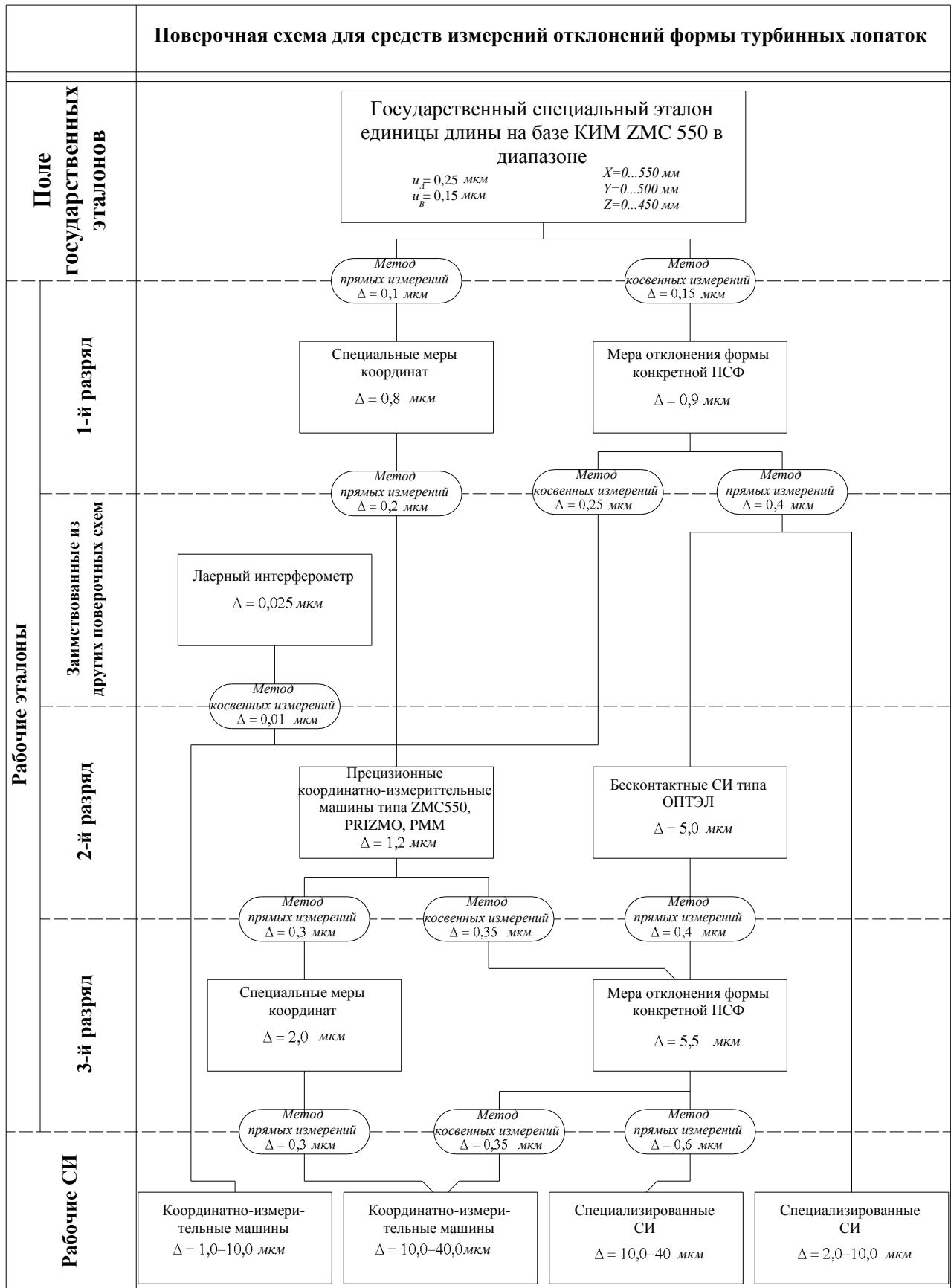


Рис. 6 Поверочная схема для СИ ГП отклонений формы турбинных лопаток

В седьмой главе в целях подтверждения теоретических положений и проверки основных метрологических характеристик описаны экспериментальные исследования макета исходного по точности СИ на базе КИМ ZMC550, методов и средств передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП, а также разработанных методических основ.

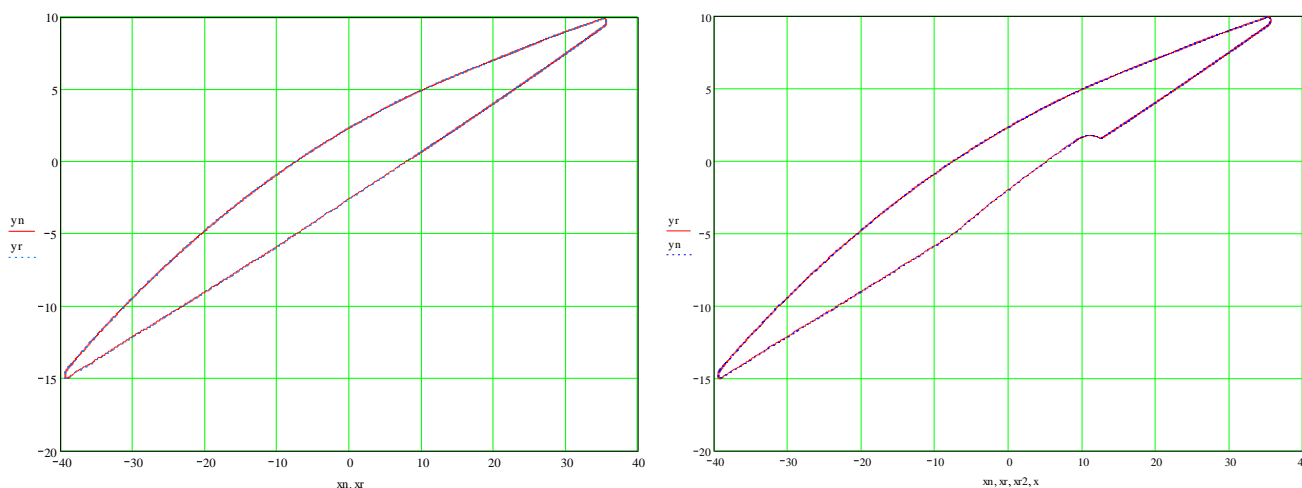


Рис. 7 Номинальный и реальный профили турбинной лопатки GT750 с нулевым и заданным отклонением формы

Методами имитационного моделирования оценена точность разработанных методических основ пространственных измерений ГП отклонений формы СПП. В качестве номинальной поверхности турбинной лопатки была выбрана поверхность рабочей лопатки GT750, заданная набором дискретных точек в сечении $z=150$ мм. Проверка адекватности разработанных моделей проводилась для смоделированных реальных поверхностей с нулевым и с заданными отклонениями формы турбинной лопатки от номинальной (рис. 7). Отклонения формы задавались с шагом 0,1 мм, 0,25 мм, 0,5 мм, 1,0 мм, 1,5 мм. Установлено, что стандартная неопределенность результатов измерений отклонений формы, вызванная неопределенностью измерений координат точек, лежащих на реальной поверхности, не превышает 0,25 мкм.

Экспериментально исследован макет исходного по точности СИ на базе КИМ ZMC-550, с целью определить его действительные метрологические характеристики. Были определены реальные систематические ошибки механической реализации системы координат: трансляционные неопределенности шкал,

отклонения от прямолинейности направляющих, ротационные неопределенности портала, каретки и пиноли, а также отклонения от перпендикулярности осей координат КИМ ZMC-550. Полученные систематические ошибки механической реализации системы координат компенсировались путем введения поправок в ПО КИМ ZMC-550 и после компенсации повторно измерялись.

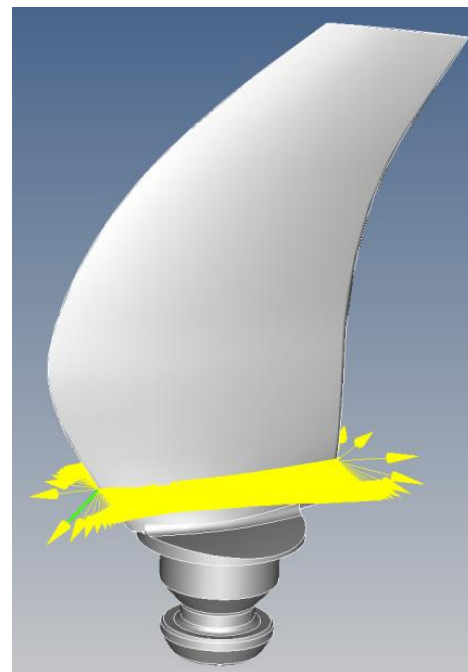
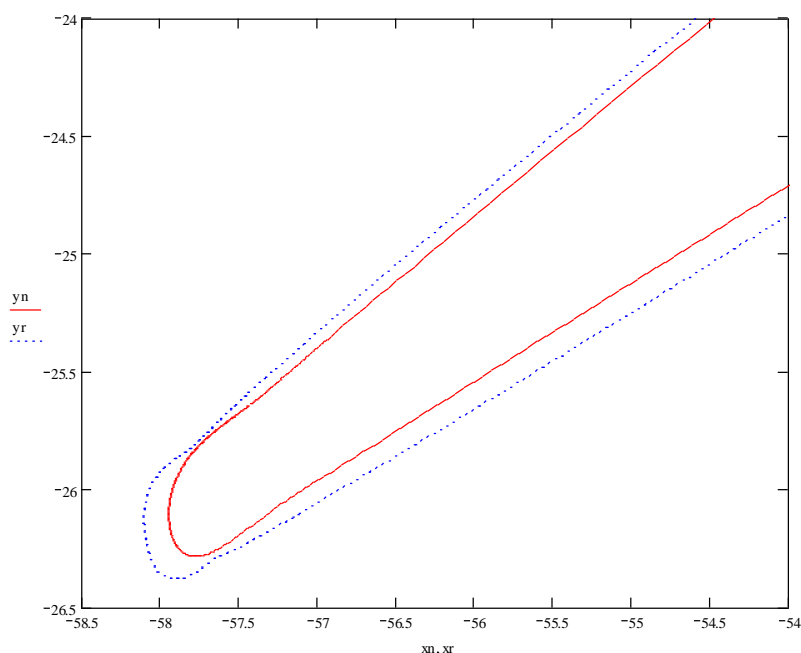


Рис. 8 Номинальный и действительный профили турбинной лопатки GT750

Было установлено, что макет исходного по точности СИ воспроизводит единицу длины в области измерений координат с стандартной неопределенностью типа А, не превышающей 0,20 мкм, и стандартной неопределенностью типа В не более 0,10 мкм. Неопределенность воспроизведения единицы длины в области измерений ГП отклонений формы, определяется видом СПП, например, для турбинных лопаток было установлено что стандартная неопределенность типа А не превышает 0,25 мкм, стандартная неопределенность типа В, не превышают 0,15 мкм.

В работе проведены экспериментальные исследования предложенных мер турбинных лопаток для передачи размера единицы длины в области измерений отклонений формы СПП. В результате экспериментальных исследований мере турбинной лопатки присвоены действительные значения локальных отклонений формы поверхности от номинальной и максимальное отклонение формы

(рис.8). Указанная мера измерялась на КИМ УРМС 850. В результате экспериментальных исследований установлено, что отличие результатов измерений полученных на КИМ УРМС 850 от действительных значений отклонений формы турбинной лопатки GT750 не превышает 2,5 мкм.

В Заключении приводятся основные результаты работы:

1. На основании анализа и исследования основных проблем измерений ГП отклонений формы СПП, которые необходимо решить для обеспечения их единства, систематизированы и обоснованы актуальные задачи научного, технического и нормативно-методического характера по разработке системы обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП.

2. Разработанные в работе математические модели объектов, методы и процедуры координатных измерений отклонений формы, а также модели, связывающие неопределенность измерений координат точек реальной поверхности и неопределенность измерений ГП отклонений формы СПП были проверены на адекватность и экспериментально подтверждены.

3. Разработанный макет исходного по точности СИ ГП отклонений формы СПП позволяет осуществлять воспроизведение, хранение единицы длины и передачу ее размера в области измерений ГП отклонений формы СПП и осуществить привязку СИ ГП отклонений формы СПП к эталону единицы длины с помощью лазерной интерференционной измерительной системы.

4. Разработанные методы и средства передачи размера единицы длины в области измерений ГП отклонений формы СПП позволяют осуществлять хранение и передачу размера единицы длины для существующей номенклатуры СИ ГП отклонений формы СПП.

5. Универсальность разработанных поверочных схем заключается в возможности их применения для обеспечения единства измерений ГП отклонений формы поверхностей, используемых в прецизионном машиностроении.

6. Разработанные в работе принципы и теоретические положения позволили создать реальные МИ на методику поверки мер ГП отклонений формы СПП и методику поверки СИ ГП отклонений формы СПП.

7. Проведенные исследования позволили создать в целом систему обеспечения единства измерений ГП отклонений формы СПП.

Таким образом, поставленные цели и задачи исследований выполнены.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гоголев Д.В. Проблемы метрологического обеспечения сложных измерительных каналов систем. 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ - 2005. Сборник научных трудов. Том. VII. Международная конференция «Метрология и измерительная техника».- Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2005. – 289 с.
2. НИР 06-201-1. Разработка способов описания и методов определения метрологических характеристик сложных измерительных каналов систем.
3. Гоголев Д.В., Лысенко В.Г. Особенности воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера системам измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы, V-ая международная научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение измерительных систем», Пенза 6 – 9 октября 2008г.
4. Кононогов С.А., Гоголев Д.В., Лысенко В.Г. Особенности воспроизведения, хранения и передачи размера единицы длины при измерениях геометрических параметров поверхностей сложной формы, 10-я Всероссийская научно-техническая конференция «СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ», МГТУ им. Н. Э. Баумана 21 - 25 апреля 2008 г.
5. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В. Исходные по точности средства измерений в области высокотехнологичных производств машино- и приборостроения, Всероссийская научно-техническая конференция «Машиностроительные технологии» с международным участием, посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 16-17 декабря 2008 г.

6. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В., Золотаревский С.Ю. Методические основы 3-D измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы.// Приборы. 2008. – №12. – С. 12 – 18.
7. Нормативно-техническая база обеспечения единства измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко, Д.В. Гоголев; ФГУП «ВНИИМС». – М.: 2009. – 20 с.: ил. – Библиогр.: 18 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 16.01.09 № 17-В2009.
8. Состояние эталонной базы наукоемких производств прецизионного машиностроения/ С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко, Д.В. Гоголев.; ФГУП «ВНИИМС». – М.: 2009. – 64 с.: ил. – Библиогр.: 67 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 16.01.09 № 18-В2009.
9. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В. Эталонная база прецизионного машиностроения. // Метрология. 2009. - №3. (в печати).
10. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В. Методические и технические основы 3-D измерений рельефа прецизионных оптических поверхностей в нанометровом диапазоне.// Мир измерений. 2009. – № 2.
11. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Гоголев Д.В. Обеспечение единства измерений отклонений формы поверхностей сложной формы.// Главный метролог. 2009. - № 1.
12. МИ 3184-2009 ГСИ. Меры геометрических параметров отклонений формы сложнопрофильных поверхностей. Методика поверки.
13. МИ 3185-2009 ГСИ. Средства измерений геометрических параметров отклонений формы сложнопрофильных поверхностей. Методика поверки.