

*На правах рукописи*



**Зеленкова Марина Викторовна**

**КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ  
ФОРМЫ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ**

Специальность:

05.11.15 –

Метрология и метрологическое обеспечение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**Научный руководитель:** Сычев Виктор Васильевич  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Обухов Игорь Васильевич  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
открытый университет», профессор

Скрибанов Евгений Васильевич  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
индустриальный университет», доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное казенное учреждение  
«Главный научный метрологический центр»  
Министерства обороны Российской Федерации  
(ФГКУ «ГНМЦ» Минобороны России).

Защита состоится «10» октября 2013 г. в 14.30 на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.18 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба  
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок: 8 (499) 267 09 63.

Автореферат разослан «2» сентября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.18,  
доктор технических наук,  
профессор



Цветков Ю.И.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2034323

Зеленкова М.В. Калибровка

2851

АН 1314

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В соответствии с утвержденной стратегией «Обеспечение единства измерений в России до 2015 года» парк используемых в Российской Федерации средств измерений (СИ) составляет более 1 млрд единиц и ежегодно пополняется на 14-15 млн единиц. Из них около 1 млрд требуют периодической поверки. Ежегодной поверке должно подвергаться не менее 150 млн единиц и должно калиброваться порядка 200 млн СИ. Объемы поверочно-калибровочных работ, заданные в нормативно-технической документации с учетом коэффициентов запаса, предполагают большие трудозатраты и изъятие средств измерений из обращения на длительное время. Это снижает готовность устройств к применению, а следовательно, и эффективность их эксплуатации. Эталонная база при этом стремительно морально и физически устаревает, что осложняет качественное проведение поверочно-калибровочных работ.

Учитывая, что 80-90% всех измерений в приоритетных областях машиностроения (космонавтика, авиа- и автомобилестроение и др.) составляют линейно-угловые измерения, в том числе измерения сложнопрофильных поверхностей, исследование и разработка новых подходов к калибровке СИ формы сложнопрофильных поверхностей на базе использования современных информационных технологий является своевременной и перспективной.

В сложившейся ситуации представляется актуальным использование прогрессивных принципов и современных научно-технических достижений для осуществления поверки и калибровки в необходимом объеме с требуемым качеством как существующих, так и – особенно – вводимых в эксплуатацию новых СИ.

### **Цель диссертационной работы**

Разработка новой прогрессивной технологии совершенствования поверочно-калибровочных работ средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей.

### **Задачи исследования**

1. Выявление рациональных путей повышения эффективности поверочно-калибровочных работ СИ сложнопрофильных поверхностей;
2. Разработка варианта калибровки СИ формы сложнопрофильных поверхностей через удаленный канал обслуживания при использовании комплексной контрольной меры (ККМ);
3. Разработка алгоритмов формирования опорных значений для комплексной контрольной меры (ККМ) в виде цифровых идентификационных моделей (ЦИМ) физической реализации ККМ;
4. Экспериментальное исследование возможности и целесообразности применения полученных опорных значений для проведения калибровки СИ формы сложнопрофильных поверхностей;

5. Определение областей рационального использования предложенного варианта реализации калибровки средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей.

#### **Объект исследования**

Методы и средства проведения поверочно-калибровочных работ средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей.

#### **Предмет исследования**

Способ калибровки через удаленный канал обслуживания, позволяющий дистанционно оценивать соответствие метрологических характеристик СИ сложнопрофильных поверхностей опорным значениям, основанный на использовании комплексной контрольной меры.

#### **Методы и средства исследования**

В работе применялись эмпирические и теоретические методы исследования (методы анализа и синтеза, абстрагирование, планирование эксперимента, метрологические испытания и пр.). Теоретические исследования осуществлялись методами математического моделирования с использованием аппарата математической статистики, численных методов математического анализа, аналитической геометрии и теории клеточных автоматов, которые послужили основой для разработки и реализации программных алгоритмов в среде MathCAD. Эмпирические исследования проводились в ФГУП «ВНИИМС» и в ООО «ОПТЭК» и базировались на сравнении полученных теоретических выводов с экспериментальными результатами метрологических исследований, проводимых на контрольных образцах изделий сложной формы, на рабочих эталонах государственной поверочной схемы и современных СИ.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые:

1. Предложен новый вариант калибровки средств измерений сложнопрофильных поверхностей через удаленный канал обслуживания, основанный на использовании комплексной контрольной меры (ККМ), что позволит производить калибровку в условиях эксплуатации СИ;
2. Разработана с использованием аппарата клеточных автоматов цифровая идентификационная модель (ЦИМ) для формирования опорных значений комплексной контрольной меры и обработки результатов калибровки средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей, позволяющая повысить производительность калибровки с требуемой точностью;
3. Экспериментально подтверждена возможность применения ЦИМ для формирования опорных значений, используемых при проведении калибровки средств измерений.

**На защиту выносятся:**

1. Структура калибровки средств измерений геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей через удаленный канал обслуживания с использованием комплексной контрольной меры;
2. Метод построения и ЦИМ формирования опорных значений для проведения калибровки СИ формы сложнопрофильных поверхностей;

3. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность и целесообразность создания образцов ККМ сложнопрофильных поверхностей для калибровки СИ формы эвольвентных зубчатых колес и газотурбинных лопаток.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что полученные результаты позволяют усовершенствовать процедуру калибровки контактных и бесконтактных СИ сложнопрофильных поверхностей за счет возможности дистанционного сравнения их метрологических характеристик с соответствующими опорными значениями, что позволяет:

- сократить затраты на проведение калибровки вследствие снижения стоимости рабочих эталонов и процедуры проведения калибровки, а также за счет выполнения калибровки в условиях эксплуатации СИ и повышения производительности труда при проведении поверочно-калибровочных работ;
- по единой ККМ осуществлять калибровку различных по метрологическим характеристикам СИ, используемых на предприятии для однотипных целей;
- формировать и сохранять опорные значения ККМ для различных условий измерений, соответствующих реальным условиям эксплуатации калибруемого СИ;
- расширить использование рабочих эталонов высоких разрядов для калибровки технических СИ.

Разработанный вариант калибровки перспективен не только для калибровки контактных и бесконтактных СИ геометрических характеристик сложнопрофильных поверхностей, но и для ряда других областей измерений.

**Достоверность и обоснованность** научных положений подтверждаются корректностью применения логического и математического аппарата и обоснованностью принятых допущений; использованием для формирования опорных значений ККМ и проведения экспериментальных метрологических исследований высокоточных СИ, входящих в государственную поверочную схему, и незначительным расхождением полученных результатов с результатами калибровки по референтным методикам; стандартными оценками соответствия предлагаемого варианта калибровки требованиям, предъявляемым к методикам поверки и калибровки, показателям правильности и прецизионности методов и результатов измерений; результатами экспериментальной апробации варианта осуществления калибровки, основанного на использовании ККМ и модели формирования опорных значений ЦИМ (ОЗ).

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы опробованы в ФГУП «ВНИИМС» и ООО «ОПТЭК» (КИМ Carl Zeiss) и имеют практическое значение для выполнения контрольно-поверочных операций, что подтверждено соответствующими актами внедрения. Полученные результаты создают предпосылки для модернизации элементов существующей организационной структуры осуществления поверочно-калибровочных работ для сложнопрофильных поверхностей и ряда других областей измерений, сокращения затрат на проведение

работ, повышения производительности труда при проведении этих работ и могут быть использованы при разработке новых методов поверки и калибровки СИ, в частности на предприятиях машиностроительного комплекса.

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались на трех всероссийских конференциях и совещаниях-семинарах и на одной международной научно-практической конференции: XI Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» 26-28 апреля 2011 г., Москва; X Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» 17-19 апреля 2012 г., Москва; XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» 4-6 февраля 2013 г., Москва; Международной научно-практической конференции «Стратегия «Казахстан-2050»: долгосрочное устойчивое развитие и приоритеты дальнейшего развития партнерства с Россией» 29 марта 2013 г., Москва.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 10 научных работах, из которых 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК [1-5].

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка литературы из 142 наименований. Общий объем диссертации изложен на 136 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 17 таблиц и 3 приложения.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснован выбор темы диссертации, показана ее актуальность, сформулирована цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна исследования и практическая значимость результатов работы, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения об апробации работы.

**В первой главе** произведен анализ состояния вопроса осуществления поверочно-калибровочных работ в России и путей повышения их эффективности. Посредством изучения нормативной документации, научной литературы и других источников проанализировано состояние научных, методических и инструментальных основ обеспечения единства измерений геометрических характеристик сложнопрофильных поверхностей и поверочно-калибровочных работ соответствующих СИ. Проведенный анализ показал, что:

- большинство научных исследований сосредоточены на создании высокоточных СИ, государственных первичных и специальных эталонов нового уровня при возрастающей потребности в менее точных рабочих эталонах, что в достаточной мере не находит отражения в современной научной литературе;
- ряд научных работ (например, Левина С.Ф., Сулеймана И.А. и др.) посвящены вопросам совершенствования методик поверки и калибровки,

оценке погрешностей неадекватности и др. с использованием современных информационных технологий (программные комплексы «ММИ-Поверка 2.0», «ММИ-градуировка», «ММК СТАТ М»), которые, обладая научной и практической ценностью, носят общий характер и не всегда обеспечивают возможность их использования для конкретных поверочно-калибровочных работ СИ формы сложногопрофильных поверхностей;

- в работах, посвященных вопросам обеспечения единства измерений и составляющих погрешностей при оценке метрологических характеристик СИ формы сложногопрофильных поверхностей (Лысенко В.Г., Гоголева Д.В., Кононогова С.А., Маркова Н.Н., Whitehouse D.J, Tang W. и др.) отмечена целесообразность и сложность разработки единого подхода к проведению поверочно-калибровочных работ в данной области, что связано как с моделированием сложногопрофильных поверхностей, так и с организационными затруднениями при реализации такого подхода. Несмотря на отдельные успехи проведения поверочно-калибровочных работ СИ формы сложногопрофильных поверхностей в некоторых отраслях машиностроения, как правило, опыт их осуществления весьма сложно распространить даже на подобные СИ, применяемые в других случаях;
- в настоящее время отсутствуют исследования возможностей интенсификации поверочно-калибровочных работ, а практические попытки обеспечения требуемых темпов их реализации, в основном, сводятся к проведению этих работ по сокращенным программам и методикам, к недостаточно обоснованному увеличению интервалов между калибровками (поверками), к оснащению рабочих СИ автоматическими самокалибраторами и к делегированию государственных полномочий в области метрологического надзора и контроля частным организациям, однако это позволяет лишь частично сократить проблемы в процессе осуществления поверочно-калибровочных работ.

Для решения большинства из вышеуказанных вопросов был предложен вариант осуществления поверочно-калибровочных работ через удаленный канал обслуживания, основанный на базе современных информационных технологий и принципах диагностирования состояния технических систем.

**Во второй главе** представлены теоретические обоснования возможности и целесообразности использования предложенного варианта калибровки СИ геометрических характеристик сложногопрофильных поверхностей через удаленный канал обслуживания с использованием ККМ, которая представляет собой совокупность физической реализации меры и соответствующих ей цифровых опорных значений ЦИМ (ОЗ).

Общая структура системы калибровки через удаленный канал обслуживания представлена на Рис.1, а схема калибровки посредством ККМ показана на Рис. 2. (предложенный вариант калибровки СИ сложногопрофильных поверхностей позволяет выполнять калибровку и в условиях эксплуатации СИ).

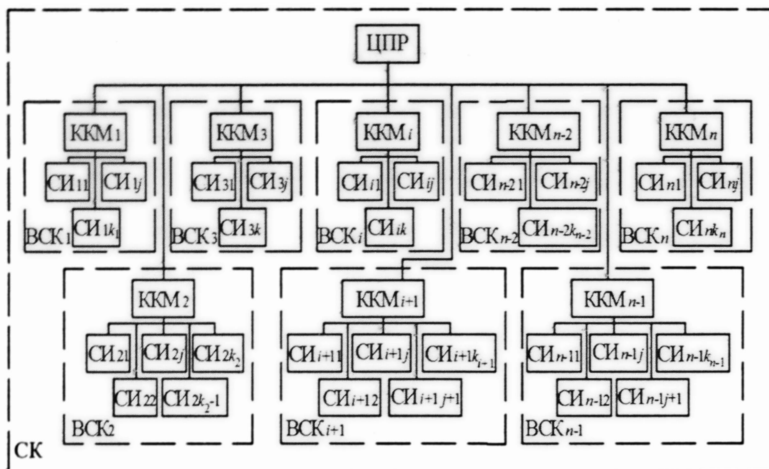


Рис. 1.

Структура системы калибровки через удаленный канал обслуживания

ЦПР – центр принятия решений,

ККМ – комплексная контрольная мера,

СИ<sub>ij</sub> – средства измерений калибруемые по *i*-й ККМ,

СК – самопроверяемая система калибровки,

ВСК – встраиваемая система калибровки

Сущность предложенного варианта заключается: в изготовлении из износостойкого материала образца элемента сложнопрофильной поверхности (ККМ) с геометрической точностью, соответствующей требованиям подлежащей контролю продукции; в последующем многократном измерении этого образца входящими в поверочную схему высокоточными СИ; в цифровой реконструкции по измеренным значениям ЦИМ его реальной поверхности и использовании этой модели в качестве опорного значения ЦИМ (ОЗ) для проведения поверочно-калибровочных работ. Совокупность опорных значений аттестуется и хранится в органе государственной метрологической службы, а физическая реализация ККМ передается потребителю и по мере необходимости обмеряется предназначенными для контрольно-измерительных операций СИ сложнопрофильных поверхностей.

Опорные значения формируются посредством измерений высокоточными СИ, входящими в поверочную схему (иерархию калибровки) на основании аттестованных методик выполнения измерений в организациях государственной метрологической службы в нормальных условиях или при условиях соответствующих эксплуатации СИ. Посредством программно-алгоритмического комплекса полученные результаты преобразуются из совокупности оцифрованных координат реперных точек измеренной поверхности в модель меры, воспроизводящую ее конфигурацию с заданной точностью.



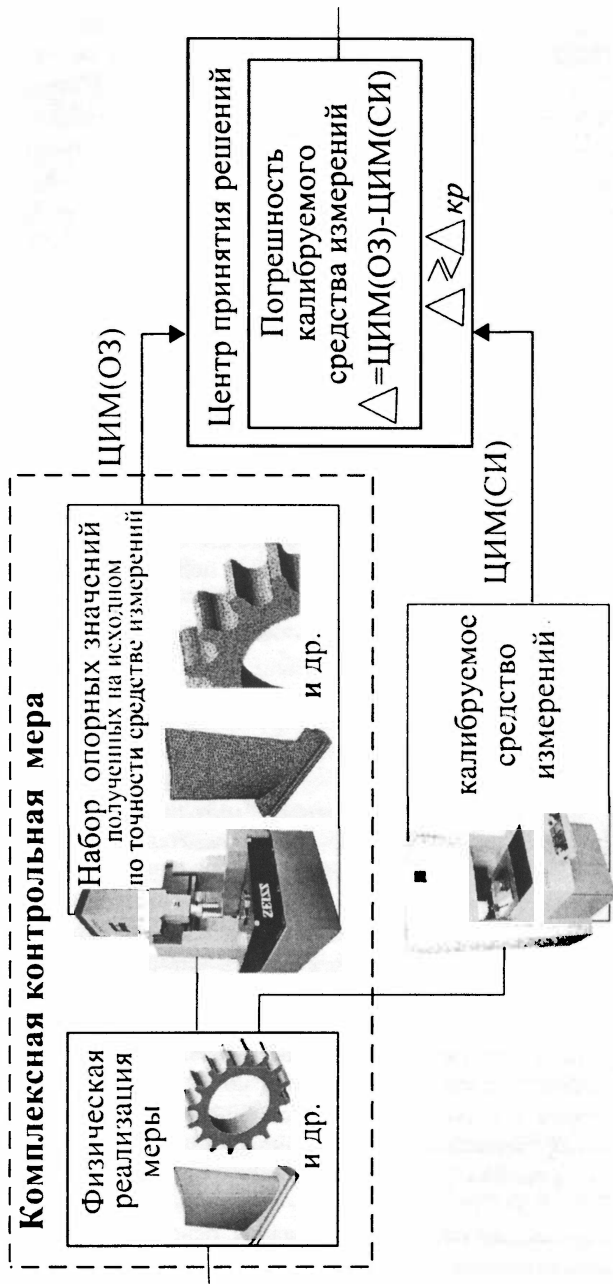


Рис. 2.

Схема калибровки СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей посредством ККМ  
 ККМ – комплексная контрольная мера (Мера + опорные значения ОЗ),  
 ЦИМ(ОЗ) – ЦИМ, сформированная по результатам измерений ККМ исходным по точности СИ,  
 ЦИМ(СИ) – ЦИМ, сформированная по результатам измерений ККМ калибруемым СИ.

Особенностью осуществления калибровки СИ геометрических характеристик сложнопрофильных поверхностей предложенным способом является дистанционная передача измерительной информации по удаленным каналам обслуживания и сравнение полученных калибруемым и исходным по точности СИ ЦИМ в центре принятия решений (ЦПР). ЦПР представляет собой человеческий и/или машинный ресурс (программный комплекс), используемый для принятия решений о результатах калибровки и реализуемый организацией, аккредитованной в российской системе калибровки РСК, что обеспечивает прослеживаемость передачи единиц измерения от национальных эталонов к калибруемым СИ.

Использование номинальных значений меры для калибровки СИ формы сложнопрофильных поверхностей неоправданно, так как количественные значения отклонений реальной формы объекта от номинальной не обеспечивают модели требуемой для калибровки точности, а разнообразие и неоднозначность возможных алгоритмов и вычислительных операций, используемых при построении моделей сложнопрофильных объектов, приводит к получению различных по точности моделей сложнопрофильных поверхностей, что затрудняет обеспечение единства измерений. Кроме того, имеет место существенное затруднение унификации поверочно-калибровочных работ однотипных СИ при необходимости индивидуального подхода к идентификации сложнопрофильных поверхностей каждого изделия.

С учетом того, что возможность использования предлагаемого варианта осуществления поверочно-калибровочных работ во многом определяется точностью аппроксимации реальной поверхности физического элемента ККМ, был проведен анализ традиционных методов аппроксимации сложнопрофильных поверхностей исходя из специфики задач формирования опорных значений. При анализе основное внимание было уделено:

- возможности использования конкретного метода интерполяции при наличии большого числа (тысяч) экспериментально определенных значений реперных точек (узлов «сетки»);
- чувствительности к погрешности измерений координат точек и обеспечению инвариантности их положения в узлах модельной «сетки»;
- простоте вычислительных алгоритмов и сокращению временных затрат на их компьютерную реализацию.

Показано, что существующие методы интерполяции не предназначены для моделирования функций по тысячам реперных точек, каждая из которых определена не только координатами точки, но и замкнутым объемом пространства, в котором с заданной вероятностью находится данная точка, и требуют значительных вычислительных мощностей, а следовательно, их использование для решения поставленной задачи затруднительно или нецелесообразно.

Поэтому был предложен метод моделирования, основанный на построении *цифровой идентификационной модели* (ЦИМ) ККМ, учитывающий основные источники погрешности калибровки (погрешность измерений, конфигурацию

«реперной сетки», под которой понимается совокупность измеряемых точек поверхности и их взаимное расположение).

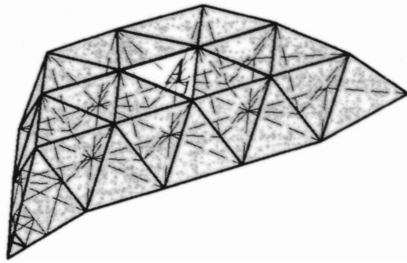


Рис. 3.

Окрестности точки пересечений линий сетки в виде топологии клеточного автомата

Метод основан на теории клеточных автоматов. Каждая точка сложнопрофильной поверхности представляется в виде области – ячейки клеточного автомата (Рис.3), в которой с заданной вероятностью находится измеряемая реперная точка. Данное допущение позволяет исключить погрешности рассогласования, ограничить число рассматриваемых вариантов топографии поверхности в зависимости от множества конечных размеров ячеек, а также

не требует использования высокопроизводительных вычислительных систем и упрощает сравнение результатов моделирования. Размер ячейки определяется точностью позиционирования координаты реперной точки и инвариантностью её положения, поэтому переход из одной группы точности в другую осуществляется при значении погрешности оценки координат ячейки  $\Delta$  большем критического значения  $\Delta_{кр}$ . При погрешности оценки координат ячейки  $\Delta = A_j^{(n)ОЗ} - A_j^{(n)изм}$ , не превышающей критического значения для первой группы  $\Delta_{кр1}$ , достоверность параметров ЦИМ не вызывает сомнений, в противном случае происходит скачкообразный переход к недостоверности этих параметров. Степень недостоверности определяется соответствующей группой точности. В каждой группе точность ячейки, а следовательно, и её характерные размеры могут меняться в диапазоне, заданном данной группой точности. Причинами перехода в следующую по точности группу может служить как относительно невысокая точность измерения параметров контрольного образца, так и структура взаимосвязи с соседними ячейками. Таким образом, формируется разнотолщинная трехмерная «сеть» (Рис. 3), наибольшая частота реперных точек в которой будет сконцентрирована в местах с наибольшей кривизной поверхности. Показано, что оптимальной формой многогранника является тетраэдр, так как в него всегда можно вписать сферу и ограничить область неопределенности положения кривой между точками без дополнительных геометрических построений.

Ячейки сети характеризуются мерой кривизны поверхности – градиентом (1) и характеристическим размером ячейки (2), связанными общими параметрами шага измеряемого СИ  $\Delta l$  и угла между векторами касания  $\Delta \varphi$ .

$$Grad_i = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l / \Delta l_{СИ}} = \frac{\arccos\left(\frac{U_i \cdot U_{i+1} + V_i \cdot V_{i+1} + W_i \cdot W_{i+1}}{\sqrt{U_i^2 + V_i^2 + W_i^2} \cdot \sqrt{U_{i+1}^2 + V_{i+1}^2 + W_{i+1}^2}}\right)}{\sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2 + (Z_i - Z_{i+1})^2}} \sim \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \Delta l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\varphi_i}{4k}\right) \quad (2)$$

где  $\Delta l$  – действительное расстояние между точками,  $\Delta l_{СИ}$  – заданное расстояние между точками;  $\Delta\varphi$  – угол между векторами касания в соседних точках,  $X_i, Y_i, Z_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}$  – координаты по осям  $OX, OY, OZ$   $i$ -й и  $i+1$ -й точки соответственно,  $U_i, V_i, W_i, U_{i+1}, V_{i+1}, W_{i+1}$  – координаты, задающие вектор касания в  $i$ -й и  $i+1$ -й точке соответственно;  $T_i$  – характеристический размер ячейки,  $k$  – число групп точности.

Критерий перехода ячеек из одной группы в другую определяется следующими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{j-1}{k} \Delta Grad \leq Grad_i \leq \frac{j}{k} \Delta Grad, \quad j = 1 \dots k - 1\text{-я группа,} \\ \qquad \qquad \qquad j\text{-я подгруппа ячеек,} \\ \frac{j-1}{k} \Delta Grad \leq Grad_i \leq \frac{j}{k} \Delta Grad, \quad j = k+1 \dots 2k - 2\text{-я группа,} \\ \qquad \qquad \qquad j\text{-я подгруппа ячеек,} \\ (j-1) \cdot \Delta Grad \leq Grad_i \leq j \cdot \Delta Grad, \quad j = 2k+1 \dots k^2 - (j/k)\text{-я группа ячеек,} \\ (j-1) \cdot \Delta Grad \leq Grad_i \leq 2k^2, \quad j = k^2+1 - (k+1)\text{-я группа ячеек.} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\Delta Grad = \frac{1}{k} \left( \frac{\Delta\varphi}{\Delta l_{\max} / \Delta l_{СИ}} \right) \quad (4)$$

$$k = \frac{T_1}{\Delta_{СИ}} = \left\lceil \frac{0,5 \cdot \Delta l_{СИ} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\varphi}{4}\right)}{\Delta_{СИ}} \right\rceil^+ \quad (5)$$

где  $\Delta_{СИ}$  – погрешность калибруемого СИ, «+» – знак округления до ближайшего большего целого числа.

Относительная погрешность определения градиента  $\delta(Grad) \cong \Delta_{СИ} / \Delta l$  и её значение полностью соответствует метрологическим требованиям.

Графическая интерпретация соотношений (3)-(5) представлена на Рис. 4.

Кроме того, во второй главе, сформулировано **условие достаточности точек**, разработаны программы и представлены алгоритмы вычислений при построении ЦИМ сложнопровильных поверхностей и при оценке соответствия

полученных результатов измерений калибруемым СИ (ЦИМ (СИ)), сформированным опорным значениям (ЦИМ(ОЗ)).

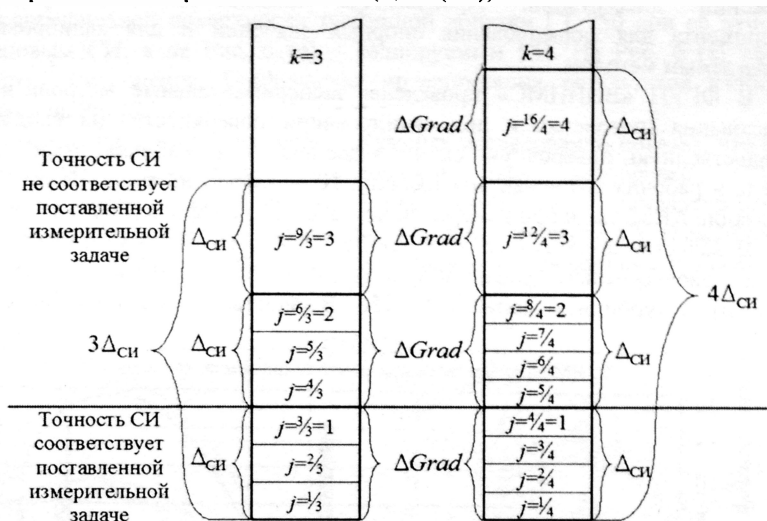


Рис. 4.

Разбиение поверхности на группы точности при  $k=3$  и  $k=4$ , где  $j$  – номер группы ячеек.

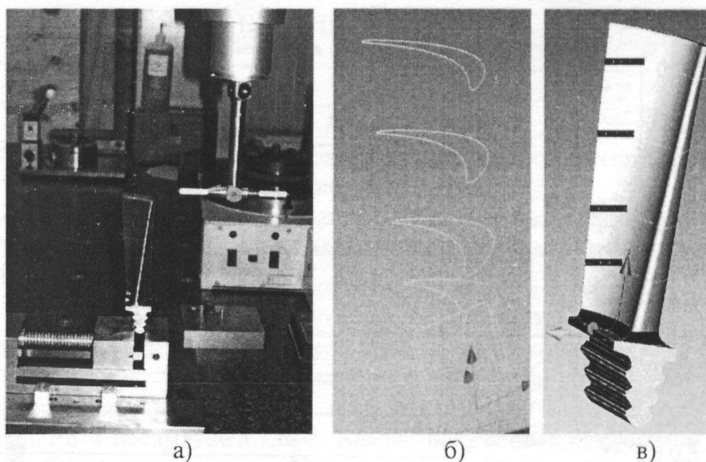


Рис. 5.

Измерение ККМ турбинной лопатки ГТ 750:

- а) базирование ККМ на КИМ ZMC 550; б) измерение неизвестного сечения; в) измерение при сравнении с геометрической моделью меры.

Третья глава посвящена экспериментальной оценке теоретических положений диссертации. Произведены планирование и организация эксперимента для формирования опорных значений и для калибровки СИ предлагаемым методом.

В ФГУП «ВНИИМС» проведены экспериментальные метрологические исследования (поточно и при сканировании поверхности) на входящих в государственную поверочную схему эталонных СИ: рабочих эталонах 2-го разряда и рабочих СИ – как при наличии геометрических моделей физической реализации ККМ, так и при измерении неизвестного профиля (Рис. 5).

В качестве физического компонента ККМ были использованы зубчатые колеса с эвольвентным профилем зуба ( $z=30$ ,  $m=6$ ,  $d_a=200$  мм) и ( $m=2,5$ ,  $z=34$ ,  $d_a=72$  мм) и турбинная лопатка ГТ 750. В качестве примера на Рис. 6 (а)

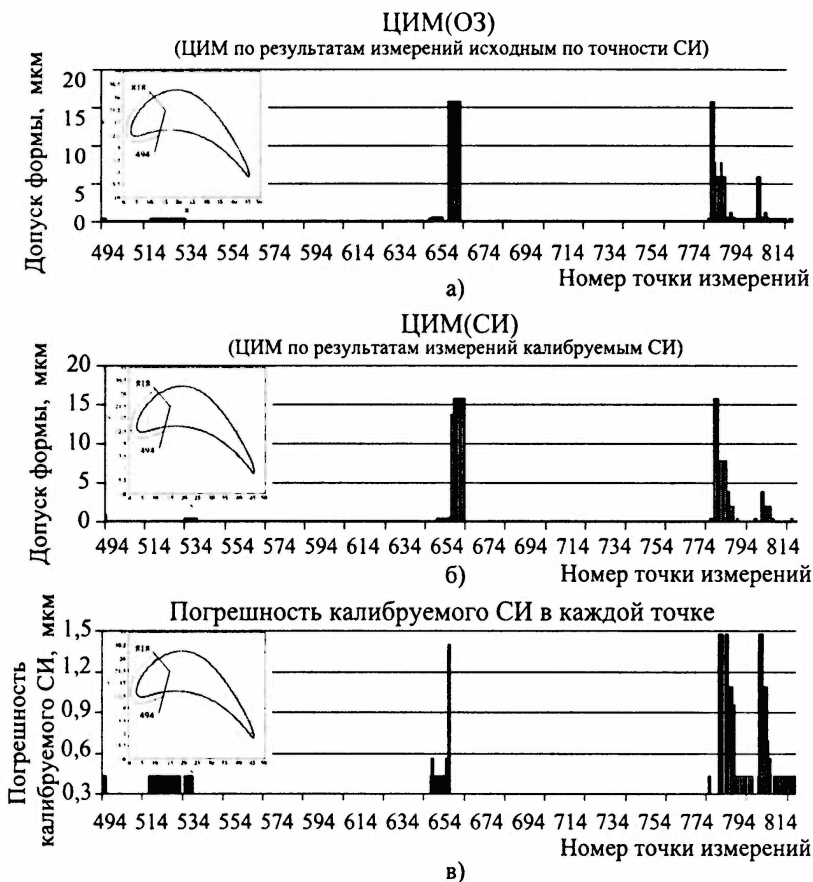


Рис. 6.

Результаты формирования ЦИМ для ККМ турбинной лопатки ГТ 750,

сечение  $z=25\text{ мм}$

представлены результаты оценки действительного профиля реальной сложнопрофильной поверхности турбинной лопатки ГТ 750 при её измерении образцовым СИ, а на Рис. 6 (б) – калибруемым СИ. На Рис. 6 (в) показана разность этих оценок. Графическая интерпретация результатов калибровки показано на Рис. 7.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что они не противоречат результатам, полученным при калибровке СИ по стандартизованным методикам. Расхождение со стандартизованными отечественными и международными методиками измерений СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей составляло менее 3 %.

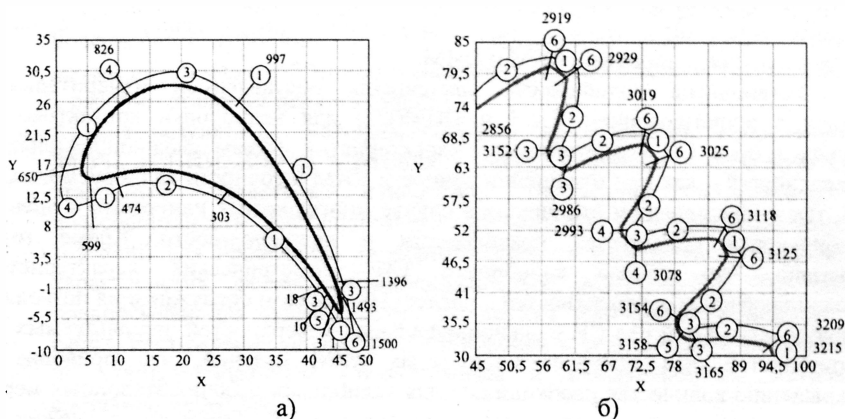


Рис. 7.

Результаты калибровки СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей:

а) ККМ турбинной лопатки ГТ 750, сечение  $z=48\text{ мм}$ ;

б) ККМ зубчатого колеса. Зубья 3...5

① ... ⑥ – характеристические размеры ячеек

Проведены экспериментальные исследования возможности использования ЦИМ в качестве опорных значений для калибровки СИ формы сложнопрофильных поверхностей при реализации варианта калибровки, предложенного в предыдущей главе. Анализ полученных результатов показал, что для обеспечения погрешности меры не превышающей  $0,30\text{ мкм}$  с доверительной вероятностью  $P=0,99$  необходимо провести не менее 8 измерений меры калибруемым СИ.

Экспериментальная проверка теоретических положений диссертации показала принципиальную возможность получения достоверной модели ККМ и

целесообразность её использования при калибровке СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей.

Также экспериментально установлено, что разработанный вариант осуществления калибровки позволяет калибровать СИ, на которые нет аттестованных методик поверки, например, системы рентгеновской и компьютерной томографии, сканирующих головок и других бесконтактных СИ.

**В четвертой главе** определены ограничения на применение предложенного варианта осуществления калибровки, рассмотрены перспективы применения предложенного варианта и распространение его для других областей измерений.

Определены области рационального использования способа калибровки СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей. Установлены ограничения на применение предложенного варианта осуществления калибровки, ККМ и ЦИМ.

Установлена возможность выполнения поставленной измерительной задачи с использованием ККМ и ЦИМ(ОЗ) для калибровки контактных и бесконтактных СИ геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей – как при отношении точности ККМ к точности калибруемого СИ 1:5, так и при меньшем отношении в случае многократных измерений и оценки стабильности показателей правильности и прецизионности. Кроме того, показано, что способ калибровки СИ геометрических характеристик сложнопрофильных поверхностей с удаленным каналом обслуживания позволяет калибровать целый ряд СИ сложнопрофильных поверхностей, используемых на производстве, для контроля идентичных ККМ изделий, что приводит к сокращению количества необходимых для калибровки рабочих эталонных мер и к уменьшению затрат, связанных с их аттестацией. Отмечена возможность использования предлагаемого способа и для некоторых других областей измерений.

## **ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Проведенными исследованиями показаны возможность и целесообразность проведения калибровки средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей при дистанционной оценке соответствия калибруемых средств метрологическим требованиям через удаленный канал обслуживания, что является основой для создания новой прогрессивной технологии проведения поверочно-калибровочных работ посредством использования современных информационных технологий.

1. Изучение литературных источников, патентной, нормативной и технической документации показало перспективность совершенствования поверочно-калибровочных работ на основе совместного использования рабочих эталонов (или заменяющих их объектов) и их цифровых модельных представлений, что позволяет дистанционно проводить ряд технологических операций при упрощении проведения этих работ.



2. В результате проведенных исследований разработан вариант калибровки средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей через удаленный канал обслуживания при использовании комплексной контрольной меры, что позволяет существенно повысить технологичность традиционной системы проведения поверочно-калибровочных работ.
3. С использованием современных достижений в области математического моделирования на базе аппарата теории клеточных автоматов разработаны алгоритмы формирования опорных значений в виде цифровых идентификационных моделей физической составляющей комплексной контрольной меры, что дает возможность практической реализации удаленного канала обслуживания для проведения поверочно-калибровочных работ. Оценка адекватности формируемых опорных значений показала, что с вероятностью 99% погрешность комплексной контрольной меры для поверхностей турбинной лопатки и эвольвентной поверхности зубчатого колеса не превышает 0,30 мкм и соответствует требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам первого разряда.
4. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в ФГУП «ВНИИМС» на входящих в государственную поверочную схему эталонных средствах измерений, подтвердил возможность и целесообразность дистанционного использования полученных опорных значений для проведения калибровки средств измерений геометрических характеристик формы сложнопрофильных поверхностей, что создает предпосылки для существенного улучшения технологии проведения этих работ. Расхождение результатов калибровки с результатами, полученными по стандартизованным отечественным и международным методикам, составило менее 3%.
5. Предлагаемый вариант калибровки полностью соответствует существующей системе проведения поверочно-калибровочных работ, что создает предпосылки для его использования при проведении других видов измерений.
6. Показана практическая ценность и возможность использования предлагаемого подхода и комплексных контрольных мер в случае калибровки средств измерений формы сложнопрофильных поверхностей, а также перспективность его применения для других областей измерений.

**Основные публикации по теме диссертации, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:**

1. Зеленкова М.В., Скрипка В.Л. Перспективы совершенствования калибровки средств измерений геометрических параметров пространственных поверхностей // Метрология. 2013. № 3. С. 3 – 10.
2. Скрипка В.Л., Зеленкова М.В. Виртуальные опорные значения для калибровки средств измерений топографии пространственных поверхностей // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 30 – 34.

3. Назаров Н.Г., Зеленкова М.В. Формирование оптимального плана эксперимента для статистической оценки вероятности случайного события с использованием случайной последовательной выборки // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 13 – 15.
4. Nazarov N.G., Zelenkova M.V. Forming an optimum experimental design for statistical estimation of the probability of a random event using random sequential sampling // Measurement Techniques. 2013. V. 55, I. 10. P. 1131 –1136.
5. Назаров Н.Г., Зеленкова М.В. Методика выбора значений параметров, обеспечивающих выполнение заданных ограничений на безусловные вероятности ошибок 1-го и 2-го рода при оценке качества изделия, характеризующегося скалярной величиной // Метрология. 2013. № 5. С. 3-13.  
**в других изданиях:**
6. Скрипка В.Л., Зеленкова М.В. Усовершенствование поверочно-калибровочных работ для контрольно-измерительных средств оценки геометрических параметров сложнопрофильных поверхностей // Состояние и проблемы измерений: Сборник материалов XI Всерос. научно-технической конф. Москва. 2011. С. 74 – 75.
7. Скрипка В.Л., Зеленкова М.В. Современные информационные технологии – элемент совершенствования поверочно-калибровочных работ // Инженерно-физические проблемы новой техники: Сборник материалов X Всерос. совещания-семинара. Москва. 2012. С. 121–124. (0,25 п.л.)
8. Скрипка В.Л., Зеленкова М.В. Использование цифровых телекоммуникационных сетей – перспективный путь усовершенствования системы организации поверочно-калибровочных работ // Инженерный вестник: электронное научно-техническое издание. ИНФОРМРЕГИСТР 77-48211/465908. 2012. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/465908.html>
9. Скрипка В.Л., Зеленкова М.В. Экспериментальная оценка точности виртуальных моделей пространственных поверхностей // Состояние и проблемы измерений: Сборник материалов XII Всерос. научно-технической конф. Москва. 2013. С. 72-75.
10. Скрипка В.Л. Зеленкова М.В. Использование виртуальных рабочих эталонов – перспективный путь обеспечения единства измерений в едином таможенном пространстве // Стратегия «Казахстан-2050»: устойчивое развитие и приоритеты дальнейшего развития партнерства с Россией: Сборник материалов Междунар. научно-практической конф. Москва. 2013. Ч. 2. С. 331 – 336.