

Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями

Игорь Васильевич Сурков ¹⁾, Анастасия Игоревна Буртовая ²⁾

¹⁾ ЗАО „ЧелябНИИконтроль“, Россия, 454008, г. Челябинск, Свердловский тракт 38, e-mail: suiv@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

²⁾ ЗАО „ЧелябНИИконтроль“, Россия, 454008, г. Челябинск, Свердловский тракт 38, e-mail: nii@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

Резюме: Приведено описание разработанного оборудования, методического и программного обеспечения для контактных и бесконтактных координатных измерений геометрических параметров прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями. Рассмотрены вопросы практического применения методики объемной калибровки координатно-измерительных машин, приборов и систем с последующей программной компенсацией выявленных систематических погрешностей, а так же особенности размерно-точностного анализа результатов координатных измерений.

Ключевые слова: координатно-измерительные машины и системы, программное обеспечение для координатных измерений, контроль деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями

1. Введение.

Анализ современных тенденций развития машиностроительного комплекса показал, что обеспечение качества выпускаемой продукции в современном многономенклатурном производстве невозможно без гибких систем автоматизированного контроля. Большая проблема возникает при измерениях геометрических параметров прецизионных изделий со сложнопрофильными поверхностями: зубчатые колёса различного профиля, резьбовые калибры, железнодорожные шаблоны, червячные фрезы, долбяки и т.д. Эти изделия широко используются в производственных цехах и лабораториях машиностроительных предприятий (в том числе, оборонных), на предприятиях металлургии и нефтегазового комплекса. Например, конические резьбовые калибры являются основным средством контроля резьбовых поверхностей элементов буровых и эксплуатационных колонн и оборудования, используемых при нефте- и газодобыче. От точности и износостойкости резьбовых калибров зависит герметичность соединений и, как следствие, надежность и безопасность работы. Поэтому для

резьбовых калибров и других прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями требуется 100 % контроль их геометрических параметров не только в процессе изготовления, но и в период эксплуатации. До сих пор на большинстве российских предприятий для контроля используют широкую номенклатуру устаревших средств измерения: ручные универсальные (с низкой степенью автоматизации) приборы или специализированное оборудование, предназначенное для измерения 1-2 размеров.

На машиностроительных предприятиях необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные машины (КИМ), приборы и системы (КИС) различных компоновок и типоразмеров [1]. Положенный в основу работы КИМ и КИС координатный метод измерения является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля практически всех требуемых геометрических параметров

широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе со сложнопрофильными поверхностями).

2. Принципы координатных измерений.

Принципиальная основа координатного метода измерения заключается в том, что любую поверхность или профиль можно представить состоящей из бесконечного числа отдельных точек и если известно положение в пространстве какого-то ограниченного числа этих точек (массив точек), т. е. определены их координаты, то по соответствующим формулам (алгоритмам) можно рассчитать размеры этих поверхностей (профилей) и отклонения формы, а также определить расположение поверхностей (профилей) в пространстве и между собой (координатные размеры и отклонения расположения) [2].

Можно выделить два взаимосвязанных технических комплекса, необходимых для выполнения координатных измерений и оказывающих влияние на их точность:

1. Аппаратная часть – это комплекс из оборудования, на основе интегрированных мехатронных модулей (механические узлы, электронные компоненты, программное обеспечение низшего уровня), измерительных устройств, калибровочной и вспомогательной оснастки, которые обеспечивают получение массивов значений координат отдельных точек, принадлежащих контролируемому поверхностям детали. В машиностроении широко используют КИМ и КИС различных типов с контактными и/или оптическими головками, а также контактные и лазерные измерительные головки для решения технологических задач при обработке на станках с ЧПУ. Качество проектных решений, точность изготовления и сборки измерительного оборудования напрямую влияет на величину погрешности определения координат измеряемых точек.

2. Программно-методическая часть – это, прежде всего, базовый комплекс информационно-методических материалов (стандарты, технические условия, эксплуатационная документация, методики выполнения измерений), интеллектуальных

ресурсов (уровень подготовки, практический опыт и навыки инженеров-метрологов и операторов КИМ и КИС), математических моделей и алгоритмов для управления измерительным оборудованием, анализа измеренных данных и расчета заданных линейно-угловых параметров. Для эффективной реализации каждой составляющей базовой части комплекса применяют специализированное метрологическое программное обеспечение (ПО) для координатных измерений.

3. Разработка и производство оборудования для координатных измерений.

В соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») выполняется разработка новой серии многофункциональных измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями, по сути специализированных КИС. На стадиях проектирования, изготовления и испытаний новых приборов проводятся исследовательские работы и выполняются мероприятия для снижения нормируемой погрешности координатных измерений (рис.1).

Для проведения предварительного анализа кинематики приборов, особенностей закрепления различных конструкций и типоразмеров измеряемых деталей специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» выполняют компьютерное моделирование новых вариантов структур и компоновок измерительных систем. Широко используются принципы сквозного компьютерного проектирования (CALS технологии). Сокращение времени разработки и снижение себестоимости изготовления новых измерительных приборов достигается за счет обеспечения

модульности конструкций механических узлов, электронных блоков и программного обеспечения. Унификация модулей позволяет получить широкую гамму измерительных приборов и систем различного назначения и компоновки из ограниченного числа функциональных модулей и узлов. Используются модули и узлы собственной разработки, комплектующие ведущих мировых производителей (Renishaw, Siemens, INA и др.), а также модернизированные узлы существующих конструкций приборов. Замена механических модулей мехатронными позволяет значительно сократить длину кинематических, функциональных и размерных цепей, повысить точность и степень автоматизации процессов контроля.

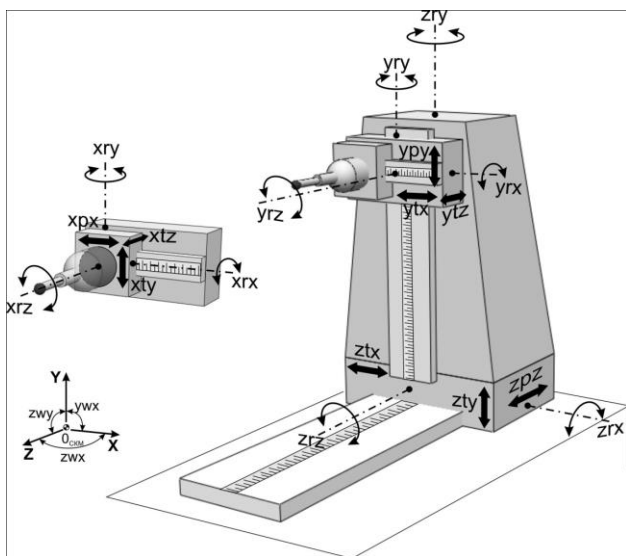


Рис. 1. Расчетная схема калибровки геометрических погрешностей специализированной КИС НИИК-483

В 2006-2008 гг. изготовлены и внесены в Госреестр средств измерения двухкоординатный измерительный прибор НИИК-481КМ2 (для контроля резьбовых калибров нефтегазового сортамента) и трехкоординатная многофункциональная измерительная система НИИК-484 (для контроля параметров зубчатых колес, червячных фрез, долбяков). Управление приборами, перемещение узлов осуществляет оператор, съём измерительной

информации, расчеты, оформление протоколов автоматизированы за счет использования ПО «ТЕХНОкоорд».

Для реализации полностью автоматизированного цикла координатных измерений высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями в 2008-2012 гг. выполнен большой объем НИОКР, изготовлены и испытаны несколько прототипов новой четырехкоординатной измерительной системы с компьютерным управлением НИИК-483. КИС НИИК-483 (рис.2) является многофункциональной и гибкой базовой платформой для создания целого комплекса координатно-измерительных приборов, машин и систем. В зависимости от требований заказчиков для сборки готовой системы используются типовые функциональные модули, узлы и электронные блоки собственной разработки, комплектующие ведущих мировых производителей (энкодеры и измерительные головки Renishaw, привода и контроллеры Siemens, линейные направляющие и подшипники INA и др.). Разработанное ПО «ТЕХНОкоорд-4К» с дополнительными модулями обеспечивает выполнение автоматизированных циклов контроля геометрических параметров насадных и валковых зубчатых колес, резьбовых калибров (рис.3), червячных фрез и других высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями.

Возможность бесконтактных измерений сложнопрофильных поверхностей (железнодорожные шаблоны, формообразующие кромки режущих инструментов) обеспечивает разработанная оптико-электронная измерительная система НИИК-890 «ОптИС» [2]. Система может быть использована как самостоятельное средство измерения, так и в качестве дополнительного модуля при модернизации различного измерительного оборудования (микроскопы, КИМ, КИС, приборы для размерной настройки режущего инструмента вне станка, навесная система для настройки и диагностики состояния режущего инструмента на станке с ЧПУ). Разработана

методика 2D калибровки ПЗС-матрицы видеокамеры, которая позволяет применять высокопроизводительные многоточечные стратегии координатных оптических измерений.

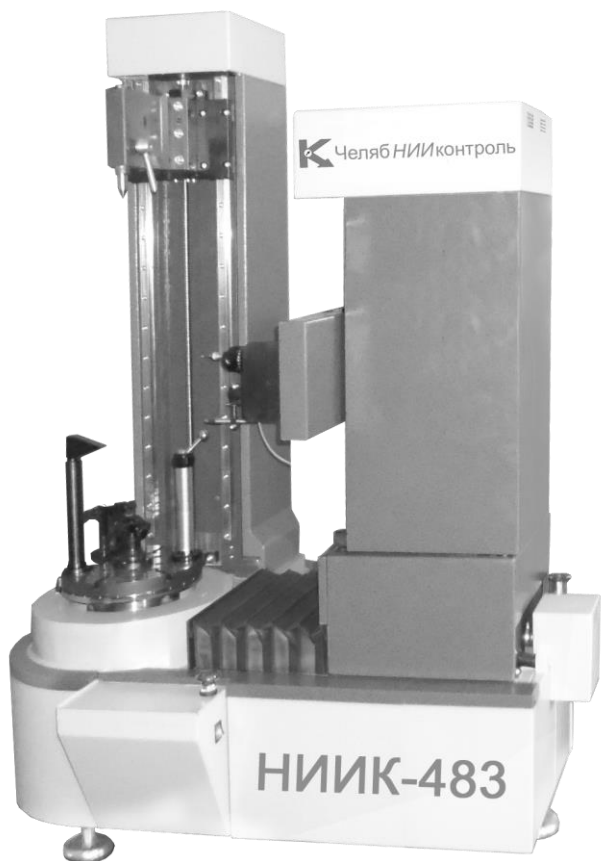


Рис.2. Четырехкоординатная измерительная система НИИК-483

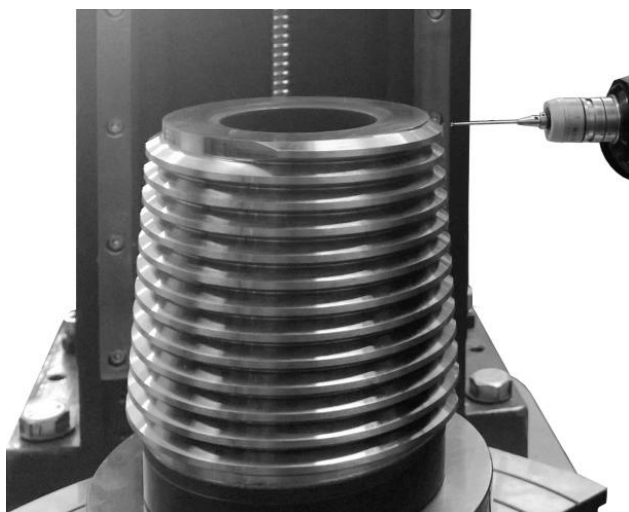


Рис.3. Контроль конического резьбового калибра на КИС НИИК-483

4. Разработка программного обеспечения для координатных измерений.

Новые и модернизированные приборы оснащаются специализированным метрологическим ПО собственной разработки, которое включает в себя не только модули для получения, обработки и анализа измерительной информации, но и удобные графические интерфейсы пользователя, настраиваемые на конкретную операцию измерения, а также средства для формирования подробных отчетов, для статистической обработки результатов измерения. Разработанное программистами института ПО для КИМ «ТЕХНОкоорд» (Технология Координатных Измерений) обеспечивает работу с трехмерными моделями измеряемых деталей в соответствии со стандартами CALS-технологий. В зависимости от функционального назначения КИМ или КИС в базовое ПО «ТЕХНОкоорд» включаются дополнительные программные модули: «ТЕХНОкоорд-ОпТИС» (работа с «системой технического зрения»), «ТЕХНОкоорд-Эвольвента» (измерение зубчатых колес), «ТЕХНОкоорд-4К» (управление четырехкоординатными измерительными системами с поворотным столом (типа НИИК-483)) и др.

ПО «ТЕХНОкоорд» может быть использовано не только для непосредственного управления работой КИМ в on-line режиме. При дополнительной установке лицензионного ПО на автономные компьютеры появляется возможность работать в off-line режиме (без подключения к КИМ). Виртуальная 3D-среда обеспечивает полную симуляцию процесса измерения, позволяет разработать, проверить и откорректировать управляющую программу, которая в дальнейшем может быть запущена на реальной КИМ (рис.4).

В ПО «ТЕХНОкоорд» разработанные математические модели и расчетные алгоритмы реализованы в виде модуля размерно-точностного анализа результатов координатных измерений [3].

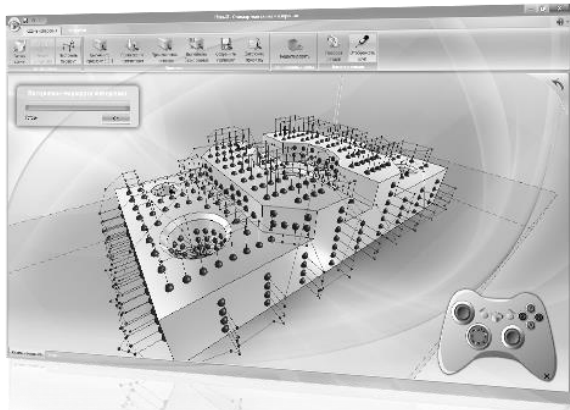


Рис.4. Программирование процесса измерения в off-line режиме

По координатам измеренных точек, принадлежащих реальным геометрическим элементам детали (первичная информация о реальной геометрии), рассчитывается ассоциированная (числовая) модель детали в виде комплекта заменяющих элементов, упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат. Для анализа действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали разработаны комплекты типовых размерно-точностных моделей. Наглядные трехмерные структурно-геометрические схемы облегчают выбор адекватной модели и снижают вероятность ошибок.

ПО «ТЕХНОкоорд» дает возможность пользователю создавать нестандартные размерно-точностные модели, например, применять для расчета параметров заменяющей поверхности другие критерии аппроксимации или использовать для одной поверхности несколько критериев одновременно.

Для комплексного анализа контролируемой детали из набора упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат стандартных и пользовательских структурно-геометрических схем создается размерно-точностная модель детали. Кроме простейших функций технического контроля (разбраковка или сортировка по группам), эта модель может эффективно применяться для целей управления технологическими

операциями обработки деталей или сборки изделий, например, для анализа операционных размеров и припусков, сборочных размеров, расчета фактических натягов и зазоров.

Для автоматизации проектирования циклов измерения контактными датчиками заготовок, обрабатываемых на станках с ЧПУ, циклов диагностики состояния режущих инструментов, подпрограмм для автоматической коррекции управляющих программ и параметров настройки станка (адаптивное управление процессами обработки) разрабатывается специальная версия ПО «ТЕХНОкоорд-CNC».

5. Обеспечение точности координатных измерений.

Повышение точности и достоверности координатных измерений заданных размеров, отклонений формы и расположения поверхностей контролируемых деталей и инструментов в основном обеспечивается за счет использования КИМ и КИС с минимально возможной нормируемой погрешностью определения координат измеряемых точек, а также за счет правильного выбора стратегии измерений (количество точек и их расположение на измеряемой поверхности), адекватности применяемых математических моделей и точности расчетных алгоритмов.

Обеспечение необходимой точности аппаратной части выпускаемых приборов и измерительных систем достигается как за счет качества изготовления и сборки, так и с помощью разработанных процедур объемной калибровки рабочего пространства [4]. С помощью лазерного интерферометра Renishaw ML10 для каждого узла линейных координатных перемещений определяются систематические погрешности позиционирования и остаточная криволинейность направляющих (рис.1). Отклонения от перпендикулярности осей рассчитываются при выполнении «диагонального» теста или при калибровке с помощью специальной наладки для лазерного интерферометра. Для калибровки узлов угловых координатных перемещений

(поворотные столы, делительные головки) также применяется специальная наладка для лазерного интерферометра. Хорошие результаты калибровки (при значительно меньшей стоимости) обеспечивают аттестованные эталоны (рис.5), разработанные и изготовленные специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Полученные значения систематической погрешности в исследованных точках рабочего пространства при линейных и угловых движениях узлов прибора интерполируются на весь диапазон перемещений и используются для внесения поправок в величину измеренных координат точек.

В ПО «ТЕХНОкоорд» интегрированы модули для выполнения процессов калибровки аппаратной части, учета результатов калибровки при определении и коррекции координат измеренных точек.

Кроме того, для уменьшения влияния методических и расчетных погрешностей на точность координатных измерений проводятся исследования, разрабатываются новые алгоритмы и программные модули для ПО «ТЕХНОкоорд», обеспечивающие проектирование оптимальных стратегий измерения и расчет геометрических (линейно-угловых) параметров типовых деталей и инструментов (в т.ч. с поверхностями сложного профиля).

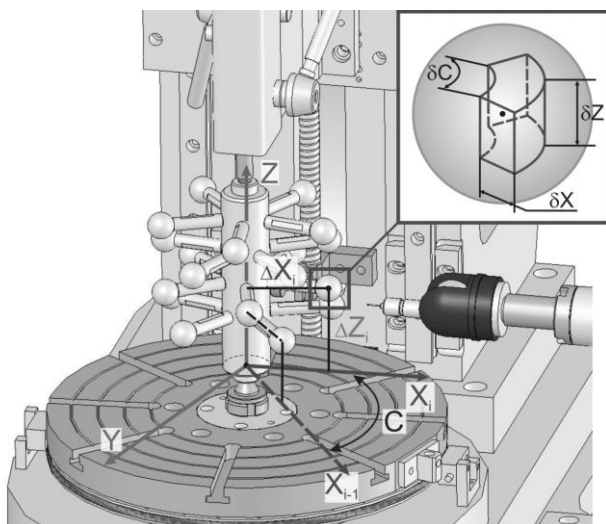


Рис.5. Специальный эталон для калибровки поворотного стола КИС НИИК-483

6. Заключение.

Большой объем НИОКР, выполненных специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль», позволил запустить в производство серию новых многофункциональных координатно-измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для контроля высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями. Разработано современное ПО, обеспечивающее управление оборудованием в автоматическом цикле и размерно-точностной анализ результатов координатных измерений.

Более подробную информацию можно получить на сайте [www. toolmaker.ru](http://www.toolmaker.ru) или посылать запрос по e-mail: suiv@toolmaker.ru.

7. Литература:

- [1] *Coordinate measuring machines and systems* / editors, Robert J. Hocken and Paulo H. Pereira. -- 2nd ed. CRC Press, 2011. – 574 p.
- [2] **Surkov, I.V.** *Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments* / Measurement Techniques: Volume 54, Issue 7 (2011), Page 758-763.
- [3] **Surkov, I.V.** *Razrabotka matematicheskogo obespecheniya dlya razmerno-tochnostnogo analiza rezultatov koordinatnih izmereniy* / I.V. Surkov, A.I. Burtovaya. // *Progressivnie tehnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr.* – Chelyabinsk: Izdatelskiy centr YUUrGU, 2012. – S. 101 – 104.
- [4] **Surkov, I.V.** *Razrabotka metodiki ob'emnoy kalibrovki koordinatno-izmeritel'nykh mashin, priborov i sistem* / I.V. Surkov, A.S. Kurochkin, V.A. Plusnin // *Progressivnie tehnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr.* – Chelyabinsk: Izdatelskiy centr YUUrGU, 2010. – S. 187 – 190.

Сведения об авторах:

Игорь Васильевич Сурков. Инженер-механик, специальность «Технология машиностроения. Станки и инструменты», закончил Челябинский политехнический институт (в настоящее время Южно-Уральский государственный университет) в 1986 г. Кандидат технических наук (1995 г.), доцент кафедры технологии машиностроения Южно-Уральского государственного университета, член-корреспондент метрологической Академии РФ (2005 г.), Почетный машиностроитель РФ (2009 г.). Директор ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Область научных интересов – исследование методов координатных измерений геометрических

параметров прецизионных деталей и инструментов и управления точностью обработки на станках с ЧПУ.

Анастасия Игоревна Буртовая. Магистр техники и технологии по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», закончила Южно-Уральский государственный университет в 2007 г. Заместитель директора ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Область научных интересов – исследование методов координатных измерений геометрических параметров прецизионных деталей и инструментов и управления точностью обработки на станках с ЧПУ.

Development of Equipment and Software for Coordinate Measurement of High-Precision Parts and Tools with Complex Geometry Surfaces

Igor Vasilyevich Surkov¹⁾, Anastasiya Igorevna Burtovaya²⁾

¹⁾ CJSC ChelyabNIIkontrol, 38 Sverdlovskiy trakt, Chelyabinsk, Russia, 454008,
e-mail: suiv@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

²⁾ CJSC ChelyabNIIkontrol, 38 Sverdlovskiy trakt, Chelyabinsk, Russia, 454008,
e-mail: nii@toolmaker.ru, Web: www.toolmaker.ru

Abstract: This paper gives a brief description of the developed equipment, methodology and software for contact and non-contact coordinate measurement of geometric parameters of high-precision parts and tools with complex geometry surfaces. Issues on practical application of comprehensive calibration of CMM (coordinate measuring machines), instruments and systems with subsequent software compensation of detected systematic errors, as well as special aspects of dimensional and accuracy analysis of coordinate measurement results, are described.

Key-Words: coordinate measuring machines and systems, coordinate measuring software, inspection of parts and tools with complex geometry surfaces