



**Ключевые слова:**  
программное обеспечение для координатных измерений, методика координатных измерений, координатно-измерительные машины и системы, конструкторско-метрологическая модель детали, конструкторско-метрологический элемент

**Keywords:**  
coordinate measuring software; coordinate measurement methodology; coordinate measuring machines and systems; design and metrological model of part; design and metrological feature

# ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТОВ

Игорь СУРКОВ, Анастасия БУРТОВАЯ

Приведено описание разработанного оборудования и программного обеспечения для координатных измерений. Рассмотрены вопросы повышения степени автоматизации процессов проектирования технологий контроля.

This paper gives a description of the developed co-ordinate measuring software. The questions of increasing the degree of automation of processes planning of inspection technologies, are described.

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ современных тенденций развития машиностроительного комплекса показал, что обеспечение качества выпускаемой продукции в современном многономенклатурном производстве невозможно без гибких систем автоматизированного контроля. На машиностроительных предприятиях необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные машины (КИМ), системы (КИС) и приборы 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 необходимых геометрических параметров широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе со сложнопольными поверхностями).

## ПРИНЦИПЫ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Принцип координатного метода измерения состоит в том, что любую поверхность или профиль можно представить состоящей из бесконечного числа отдельных точек. Если известно положение в пространстве какого-то ограниченного числа этих точек (массив точек), то есть 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, 3].

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

1. Аппаратная часть — это комплекс оборудования на базе интегрированных мехатронных моду-

лей (механические узлы, электронные компоненты, программное обеспечение низшего уровня), измерительных устройств, калибровочной и вспомогательной оснастки, обеспечивающий получение массивов значений координат отдельных точек, принадлежащих контролируемым поверхностям детали. В машиностроении широко используются 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, объединяющий информационно-методические материалы (стандарты, технические условия, эксплуатационная документация, методики выполнения измерений), интеллектуальные ресурсы (уровень подготовки, практический опыт и навыки инженеров-метрологов и операторов КИМ и КИС), специализированное метрологическое программное обеспечение (ПО) для координатных измерений. Современное ПО для координатных измерений является многофункциональным, объединяет возможности САИ (computer-aided inspecting — автоматизированный контроль размеров) по обеспечению режима управления измерительным оборудованием в реальном времени, функции получения и анализа измеренных данных, расчета заданных линейно-угловых параметров и САИР (computer-aided inspection planning — автоматизированное планирование (проектирование) процессов контроля) в части разработки и отладки технологий контроля.

Очевидно, что эффективность и достоверность процессов координатных измерений в равной степени зависит от технических и метрологических характеристик базовой аппаратной части КИМ и КИС и функциональности специализированного метрологического ПО.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

В рамках выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по проектированию новой серии многофункциональных модульных измерительных систем и приборов в Челябинском научно-исследовательском и конструкторском институте средств контроля и измерений в машиностроении (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») проводится разра-

ботка координатно-измерительного оборудования, а также методического, математического, информационного и программного обеспечения процессов координатных измерений. В соответствии с планами НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» на 2006–2015 годы уже разработаны и серийно производятся координатные измерительные приборы и системы НИИК-481КМ2 (рис. 1), НИИК-484 (рис. 2), НИИК-701, НИИК-703 (рис. 3), НИИК-483 (рис. 4) [4, 5]. Продолжаются испытания опытного экземпляра четырехкоординатной измерительной системы НИИК-485.

Новые измерительные системы и модернизированные приборы оснащаются специализированным метрологическим ПО собственной разработки, которое включает в себя все модули, необходимые для настройки и управления работой координатно-измерительного оборудования, средства для получения, обработки и анализа измерительной информации, удобные графические интерфейсы пользователя, настраиваемые на конкретную операцию измерения, а также средства для формирования подробных отчетов и статистической обработки результатов измерения. Разработанное ЗАО «ЧелябНИИконтроль» ПО для КИМ «ТЕХНОкоорд» (Технология координатных измерений) обеспечивает работу с трехмерными моделями измеряемых деталей в соответствии со стандартами CALS-технологий [6]. В ПО интегрированы модули для выполнения процессов калибровки аппаратной части, учета ее результатов при определении и коррекции координат измеренных точек.

В зависимости от функционального назначения КИМ или КИС в базовое ПО «ТЕХНОкоорд» включаются дополнительные программные модули [7, 8, 9, 10]: «ТЕХНОкоорд-ОпТИС» (работа с «системой технического зрения»), «ТЕХНОкоорд-Эвольвента» (измерение зубчатых колес), «ТЕХНОкоорд-4К» (управление четырехкоординатными измерительными системами с поворотным столом типа НИИК-483 или НИИК-485) и др.

ПО «ТЕХНОкоорд» может быть использовано не только для непосредственного управления работой КИМ в режиме онлайн (функции САИ-системы). Функции САИР-системы дают возможность работать в офлайн-режиме (без подключения к КИМ). Виртуальная 3D-среда обеспечивает полную симуляцию процесса измерения, позволяет разработать, проверить и откорректировать управляющую программу (УП), которая в дальнейшем может быть запущена на реальной КИМ или КИС (рис. 5).

Разработанная УП включает в себя: набор измерительных циклов, вспомогательные траектории, служебные функции (калибровка, математическое базирование, смещение системы координат детали



Рис. 1. Двухкоординатный измерительный прибор НИИК-481КМ2

(СКД), смена измерительного наконечника (ИН) и т.д.), расчетные подпрограммы, дополнительные модули (шаблон оформления протокола, статистический анализ и т.д.). Реальные кодированные кадры УП скрыты от пользователя графическим интерфейсом, что значительно упрощает процесс проектирования, снижает количество ошибок. Сам процесс проектирования траектории рабочих и вспомогательных перемещений ИН полностью автоматизирован. Однако, как и в большинстве САПР-систем других производителей, в ПО «ТЕХНОкоорд» ответственность за правильный выбор методики координатных измерений (МКИ) лежит на инженере-метрологе.

МКИ включает в себя стратегию измерения (число точек, их расположение на контролируемых поверхностях и последовательность обхода при координатных измерениях) и расчетную модель, математически описывающую взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми линейно-угловыми параметрами. Адекватность МКИ — это основа процесса проектирования эффективных УП для координатно-измерительной техники.

В ПО «ТЕХНОкоорд» автоматически рекомендуется предварительная стратегия измерения, но она не привязана к особенностям геометрии и точности поверхности, так как большинство исход-

ных 3D-моделей не содержит информации о параметрах точности. Графический интерфейс дает возможность оператору вручную корректировать расположение точек и вид траектории, вводить в рабочем пространстве КИМ зоны, запретные для перемещений ИГ (например, в местах расположения элементов установочных приспособлений или калибровочной оснастки). Например, в качестве стратегий измерения цилиндра могут быть выбраны траектории движения «спираль», «по сечениям», «по образующим» с различной плотностью расположения измеряемых точек. Аналогично для других геометрических элементов (плоскость, сфера, конус) также существуют различные варианты стратегий измерения. Однако «ручной» выбор окончательного варианта стратегии измерения каждого геометрического элемента (ГЭ) детали значительно снижает производительность процессов проектирования.

Используя рекомендации [11] и результаты собственных научных исследований [7, 12], для новой версии ПО «ТЕХНОкоорд» был разработан программный модуль для автоматизированного выбора стратегии измерения типовых ГЭ. Выбор зависит от площади измеряемой поверхности, а также от точности лимитирующих размеров и геометрических отклонений. Определение площади поверхности ГЭ осуществляется автоматически при анализе исходной 3D-модели детали. К сожалению, большинство конструкторских САД-систем сохраняют спроектированные 3D-модели детали в форматах файлов, в которых отсутствуют данные о геометрических размерах, допусках, отклонениях формы и расположения каждого ГЭ. Это значительно усложняет возможности полной автоматизации процесса проектирования.

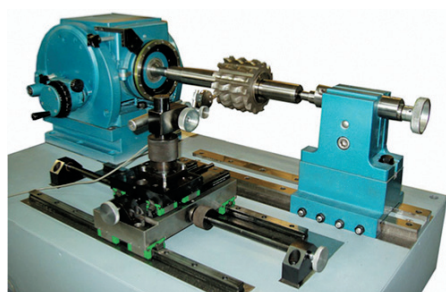


Рис. 2. Координатно-измерительная система НИИК-484

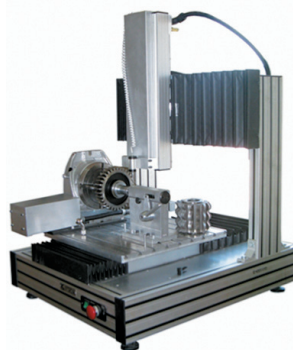


Рис. 3. Учебная координатно-измерительная машина с поворотным столом НИИК-703



Рис. 4. Четырехкоординатная измерительная система НИИК-483



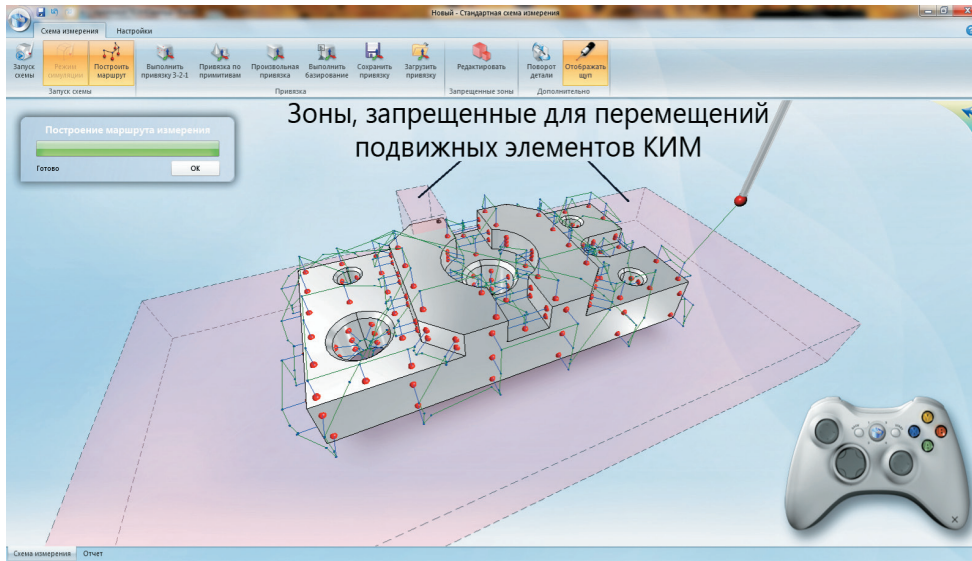


Рис. 5. Программирование процесса измерения в офлайн-режиме ПО «ТЕХНОкоорд»

Определение заданных линейно-угловых параметров в ПО «ТЕХНОкоорд» производят с помощью модуля размерно-точного анализа результатов координатных измерений (рис. 6).

По координатам измеренных точек, принадлежащих реальному геометрическому элементу детали (первичная информация о реальной геометрии), рассчитывается ее ассоциированная (числовая) модель в виде комплекта заменяющих элементов, упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат. Заменяющий элемент — это поверхность или линия номинальной формы, аппроксимирующая реальную поверхность или линию и рассчитанная по координатам точек изме-

рения в соответствии с принятым условием аппроксимации. ПО «ТЕХНОкоорд», как и большинство других программных пакетов, предоставляет пользователю возможность выбора метода математической аппроксимации заменяющих элементов: среднеквадратичная, по условию максимума или минимума материала (критерий прилегания заменяющей поверхности), по методу минимальной зоны, сплайновая [12]. Каждый вариант аппроксимации дает разный результат расчета действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали.

Пользователь — инженер-метролог — сам отвечает за правильность выбора МКИ, ориентируясь на служебное назначение детали. Большие трудности возникают из-за неоднозначности нормативной базы. С 1 января 2012 года в Российской Федерации параллельно действуют два стандарта [13, 14], в которых по-разному трактуются методы расчетного определения однотипных геометрических размеров и отклонений. Например, в ГОСТ 28187-89 в основном предлагается использовать методику, основанную на критерии прилегания поверхностей по условию максимума материала, а в ГОСТ Р 53442-2009 для расчета тех же параметров рекомендуют среднеквадратичную аппроксимацию.

Опыт эксплуатации существующей версии базового ПО «ТЕХНОкоорд» и дополнительных программных модулей показал, что выбор МКИ для каждой измеряемой детали является наиболее трудоемким и длительным этапом в проектировании технологий координатных измерений. Повышение степени автоматизации этого этапа обеспечит значительный рост производительности процессов проектирования, снизит влияние субъективных факторов.

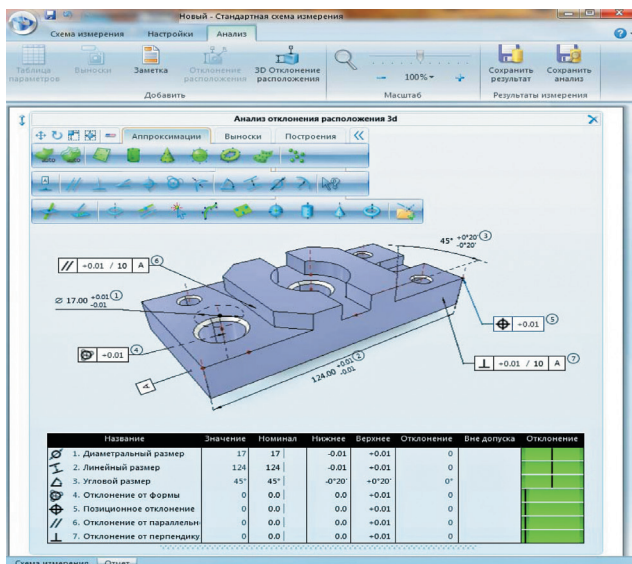


Рис. 6. Модуль размерно-точного анализа результатов координатных измерений ПО «ТЕХНОкоорд»

## РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ КОНСТРУКТОРСКО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ

В соответствии с планом НИОКР, специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» проводят разработку новой версии базового ПО «ТЕХНОкоорд».

Основной упор делается на превращение CAIP/CAI системы «ТЕХНОкоорд» в полноценную часть единого информационного пространства в рамках концепции CALS технологий (рис. 7). В области информационных технологий уже длительное время используется и успешно развивается концепция конструкторско-технологической модели детали (КТМ). КТМ — это информационная система взаимосвязанных конструкторско-технологических элементов (КТЭ), расположенных в единой конструкторской системе координат в соответствии со своим служебным назначением. Помимо математического описания номинальной геометрии объемного тела детали — 3D-модель, — КТМ содержит формализованное описание ее служебного назначения и технологических ограничений при обработке каждого КТЭ.

Авторами разрабатывается концепция конструкторско-метрологической модели детали (КММ) [15]. Первичная КММ — это результат кон-

структорского проектирования. Помимо описания номинальной геометрии (3D-модель), КММ должна содержать данные о геометрических размерах, допусках, отклонениях формы и расположения каждого конструкторско-метрологического элемента (КМЭ), а также о конструкторской системе координат, в которой все КМЭ детали упорядочено расположены в соответствии со своим служебным назначением. Данные могут кодироваться в соответствии со стандартными требованиями GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing — геометрические размеры и допуски), которые частично описаны в действующем с 1 января 2012 года в Российской Федерации ГОСТ Р 53442-2009 [14]. Более полное описание размерно-точностных параметров КМЭ и типовых структур базовых систем координат КММ разрабатывается с использованием зарубежной нормативной базы GD&T [16, 17, 18, 19].

Для кодирования КММ используются инструменты унификации представления данных в виде прикладных протоколов STEP (Standard for Exchange of Product model data — стандарт обмена данными модели изделия) [20]. Помимо существующей в ПО «ТЕХНОкоорд» возможности импорта 3D-модели в устаревшем формате STEP AP203 [21], в настоящий момент разрабаты-

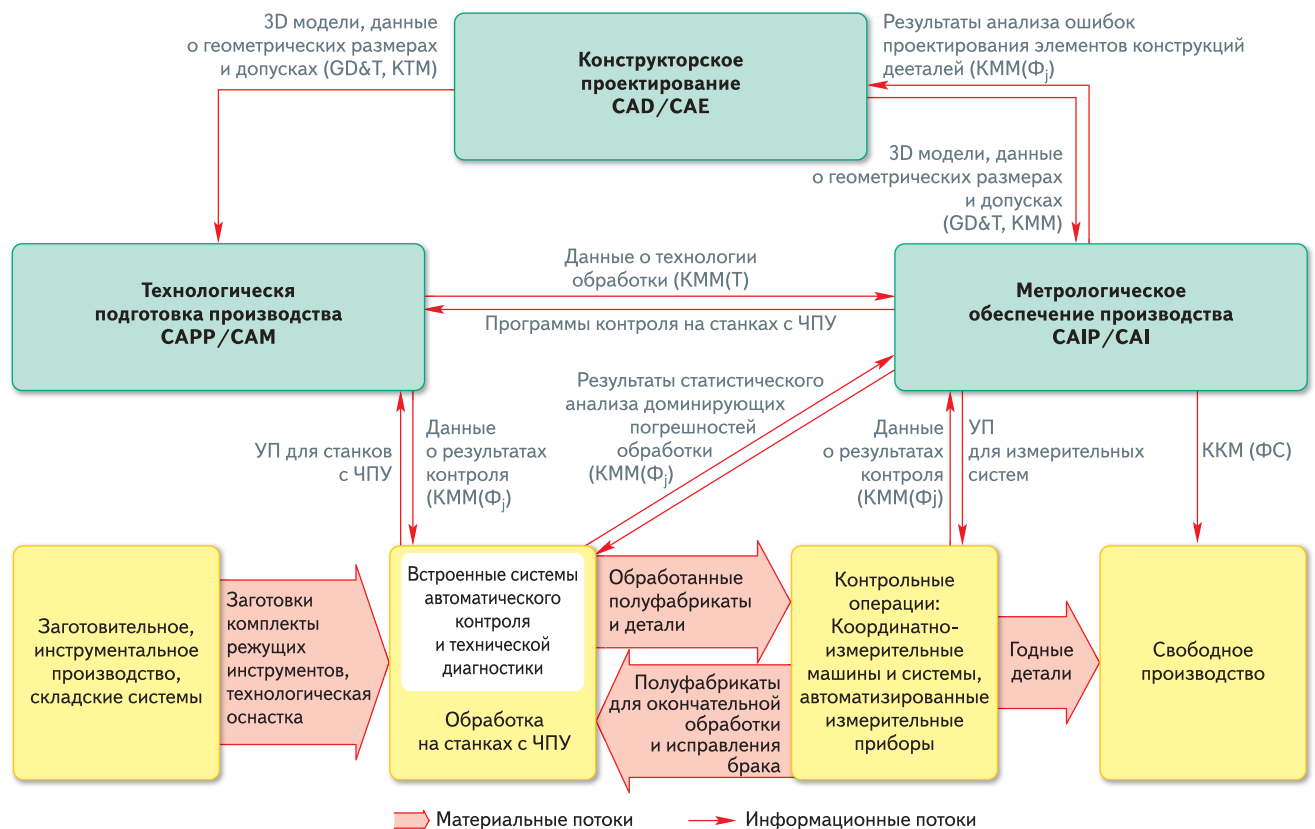


Рис. 7. Схема концепции единого информационного пространства современного машиностроительного производства

ваются новые модули импорта и экспорта моделей по современному протоколу AP242 [22], который объединил форматы STEP AP203 и STEP AP214 [23]. В структуре файла по протоколу STEP AP242 есть возможность передачи данных о GD&T-параметрах. С помощью внутренних редакторов CAPP/CAM или CAIP/CAI систем в ручном или автоматическом режиме можно обеспечить корректировку параметров или дополнить структуры данных.

На выставке «Металлообработка-2016», которая проходила в Москве с 23 по 27 мая 2016 года, руководством и техническими специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» были проведены переговоры с разработчиками CAD/CAM системы АДЕМ и достигнута предварительная договоренность о включении в ПО «ТЕХНОкоорд» и АДЕМ интерфейсов обмена данными о КММ и КМЭ.

При технологической подготовке производства в CAPP/CAM-системах первичная КММ может быть дополнена данными о контролируемых технологических размерах и преобразована в КММ(Т) (конструкторско-метрологическая модель с технологическими размерами). Для каждого КМЭ, кроме окончательного технологического размера, обычно совпадающего с конструкторским, может задаваться последовательность из нескольких промежуточных операционных размеров, контролируемых между технологическими операциями или переходами.

В новой версии ПО «ТЕХНОкоорд» предусмотрена возможность по результатам координатных измерений создавать разнообразные варианты КММ(Фj) (конструкторско-метрологическая модель с фактическими размерами, полученными в результате выполнения j-ого процесса измерения/контроля). Эти модели могут 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. Например, КММ(ФС) — конструкторско-метрологическая модель с фактическими размерами для селективной сборки.

Разрабатывается модуль анализа параметров GD&T КММ для автоматизации выбора оптимальной методики координатных измерений типовых деталей и геометрических элементов. Создается структурированная база данных типовых КМЭ. К каждому элементу могут быть привязаны одна или несколько типовых МКИ в виде фрагментов УП (содержит кадры, описывающие траекторию перемещения ИН для оптимальной стратегии измерения, и подпрограммы расчета заданных GD&T-параметров). Автоматизированный анализ КММ позволяет идентифицировать контролируе-

мые КМЭ и синтезировать общую УП для координатных измерений. Выбранные в соответствии с заранее назначенным для каждого КМЭ приоритетом МКИ можно скорректировать в ручном режиме после предварительного просмотра спроектированной УП. Наглядные трехмерные структурно-геометрические схемы облегчат выбор адекватной модели и снизят вероятность ошибок.

Новая версия ПО «ТЕХНОкоорд» даст возможность пользователю создавать и привязывать к КМЭ нестандартные размерно-точностные модели, например, применять для расчета параметров заменяющей поверхности другие критерии аппроксимации или использовать для одной поверхности несколько критериев одновременно.

## **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 и постоянно совершенствуется современное ПО, обеспечивающее управление оборудованием в автоматическом цикле и размерно-точностной анализ результатов координатных измерений. Для повышения степени автоматизации процессов проектирования технологий координатных измерений, включения ПО «ТЕХНОкоорд» в единое информационное пространство машиностроительного производства разработана и практически применяется концепция конструкторско-метрологической модели детали.

## **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 co-ordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / Measurement Techniques. 2011. V. 54. Issue 7. P. 758–763.
3. *Сурков И.В.* Применение КИМ для контроля линейно-угловых параметров в машиностроении / И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. 2007. № 5. С. 88–91.
4. *Сурков И.В., Буртовая А.И.* Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных



- измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями // Metrology and metrology assurance 2013: тезисы докл. 23-го национального научного симпозиума с международным участием (Созополь (Болгария), 9–13 сентября 2013 г.). — Созополь (Болгария), 2013. С. 186–191.
5. Каталог продукции ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Измерительные приборы, системы автоматизированного контроля и управления. 2015. — URL: <http://www.toolmaker.ru/docs/Katalog.pdf> (дата обращения 10.03.2016).
  6. Руководство пользователя по работе с ПО ТЕХНОкоорд. — Челябинск: ЗАО «ЧелябНИИконтроль». — URL: <http://www.toolmaker.ru/download.htm?path=docs/Manual.pdf> (дата обращения 10.03.2016).
  7. Сурков И.В. Разработка измерительного оборудования и программно-методического обеспечения для контроля параметров зубчатых колес и передач // Metrology and metrology assurance 2015: тезисы докл. 25-го национального научного симпозиума с международным участием (Созополь (Болгария), 7–11 сентября 2015 г.). — Созополь (Болгария), 2015. С. 177–184.
  8. Сурков И.В., Суркова Е.А., Буртовая А.И., Матрикова И.С. Разработка методики координатных измерений резьбовых конических калибров // Metrology and metrology assurance 2015: тезисы докл. 25-го национального научного симпозиума с международным участием (Созополь (Болгария), 7-11 сентября 2015 г.). — Созополь (Болгария), 2015. С. 478–486.
  9. Сурков И.В. Разработка методов и средств координатных измерений линейно-угловых параметров режущих инструментов // Измерительная техника. Ежемесячный научно-технический журнал. 2011. № 7. С. 13–17.
  10. Педь С.Е., Мастеренко Д.А., Панфилов П.В., Еськова А.В., Сурков И.В. Разработка модельного ряда аппаратно-программных комплексов для автоматизированных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов // Измерительная техника. Ежемесячный научно-технический журнал. 2013. № 12. С. 27–31.
  11. *Руководящий документ: РД 2 БВ00-9-90.* Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. — М.: ВНИИИзмерения, 1990. 28 с.
  12. Сурков И.В., Буртовая А.И. Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 101–104.
  13. ГОСТ 28187-89 (СТ СЭВ 6329-88). Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1989. 19 с.
  14. ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО 1101:2004). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. — М.: Стандартиформ, 2009. 73 с.
  15. Сурков И.В., Миронова Н.Е. Автоматизация проектирования технологий контроля на координатно-измерительных машинах и системах / Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектов изделий: сб. науч. тр. — Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2016. С. 124–131.
  16. ASME Y14.5.1M-1994 (R2004). Mathematical definition of dimensioning and tolerancing principles. — IHS, 1995. 82 p.
  17. ASME Y14.5-2009. Dimensioning and tolerancing. — Reversion ASME Y14.5.1M-1994 (R2004). — IHS, 2009. 215 p.
  18. ISO 1101:2012 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out. — Geneva: ISO, 2012. 110 p.
  19. ISO 5459:2011 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Datums and datum systems. — Geneva: ISO, 2011. 88 p.
  20. ISO 10303-1:1994. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles. — Geneva: ISO, 2010. 427 p.
  21. ISO 10303-203:2011. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies [заменен на 10303-242:2014] — Geneva: ISO, 2011. 526 p.
  22. ISO 10303-242:2014. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering. — Geneva: ISO, 2014. 4 p.
  23. ISO 10303-214:2010. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 214: Application protocol: Core data for automotive mechanical design processes [заменён на 10303-242:2014] — Geneva: ISO, 2010. 427 p.

---

**Игорь Васильевич СУРКОВ** —  
кандидат технических наук, доцент,  
директор ЗАО «ЧелябНИИконтроль»

**Анастасия Игоревна БУРТОВАЯ** —  
заместитель директора  
ЗАО «ЧелябНИИконтроль»