

# ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**И.В. Сурков, А.И. Буртовая, Н.Е. Миронова**

*ЗАО «ЧелябНИИконтроль», Южно-  
Уральский государственный университет*

Приведено описание разработанного программного обеспечения для координатных измерений. Рассмотрены вопросы повышения степени автоматизации процессов проектирования технологий контроля, а так же основные направления внедрения новой концепции конструкторско-метрологической модели, обеспечивающей обмен данными о размерно-точностных параметрах детали в едином информационном пространстве современного машиностроительного производства.


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

## **1. Введение.**

Анализ 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), 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 контролируемым 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), специализированного метрологического программного обеспечения (ПО) для координатных измерений. Современное ПО для координатных измерений является многофункциональным, объединяет возможности САИ (computer-aided inspecting (автоматизированный контроль размеров) – обеспечивает режим управления измерительным оборудованием в «реальном» времени, функции получения и анализа измеренных данных, расчета заданных линейно-угловых параметров) и САIP (computer-aided inspection planning (автоматизированное планирование (проектирование процессов) контроля) – выполняется разработка и отладка технологий контроля) систем.

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 ПО.

### **3. 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 разработка координатно-измерительного оборудования, а так же методического, математического, информационного и программного обеспечения процессов координатных измерений. В

соответствии с планами НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» на 2006-2016 гг. уже разработаны и внедрены координатные измерительные приборы и системы НИИК-481КМ2, НИИК-484, НИИК-701, НИИК-703, НИИК-483 [3]. 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 [4]. В ПО интегрированы модули для выполнения процессов калибровки аппаратной части, учета результатов калибровки при определении и коррекции координат измеренных точек.

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 или НИИК-485)) и др.

ПО «ТЕХНОкоорд» может быть использовано не только для непосредственного управления работой КИМ в on-line режиме (функции САИ-системы). Функции САИР-системы дают 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 (УП), которая в дальнейшем может быть запущена на реальной КИМ или КИС (рис. 1).

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

производителей, в ПО «ТЕХНОкоорд» ответственность за правильный выбор методики координатных измерений (МКИ) лежит на инженере-метрологе.

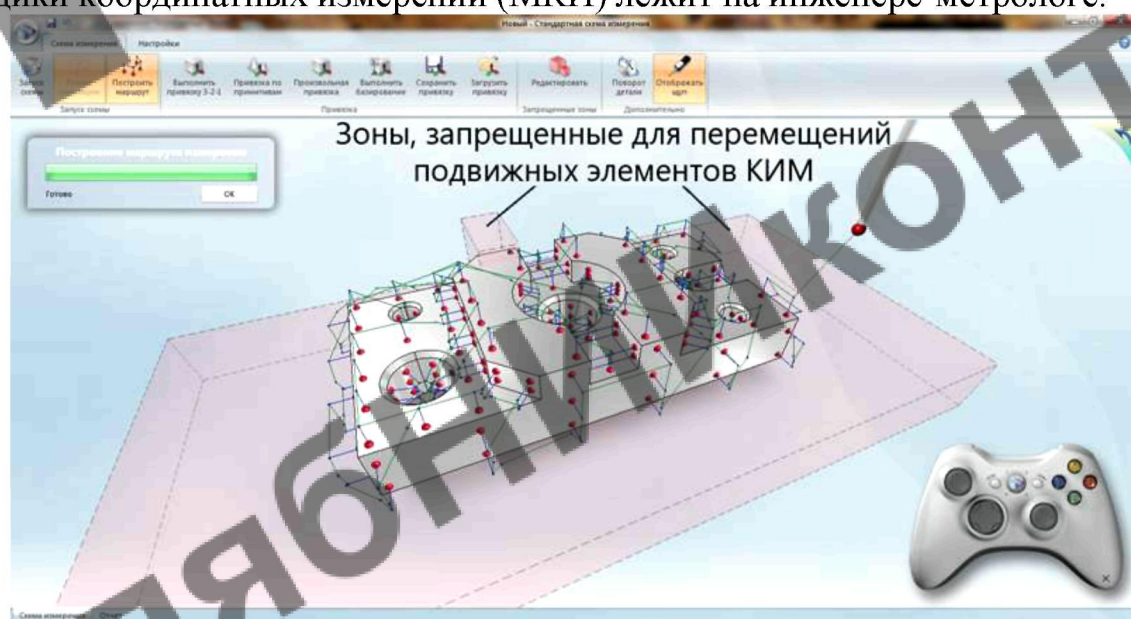


Рис. 1. Программирование процесса измерения в off-line режиме

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, т.к. большинство исходных 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. Проведенные научные исследования влияния стратегии измерения на погрешность определения типовых размерно-точностных параметров позволили разработать рекомендации и методику автоматизированного выбора оптимальной стратегии координатных измерений. Однако, эффективное использование этих разработок в ПО «ТЕХНОкоорд» сдерживается необходимостью ручного ввода данных о контролируемых размерах и геометрических отклонений.

Определение заданных линейно-угловых параметров в ПО «ТЕХНОкоорд» производят с помощью модуля размерно-точного анализа результатов координатных измерений (рис. 2).

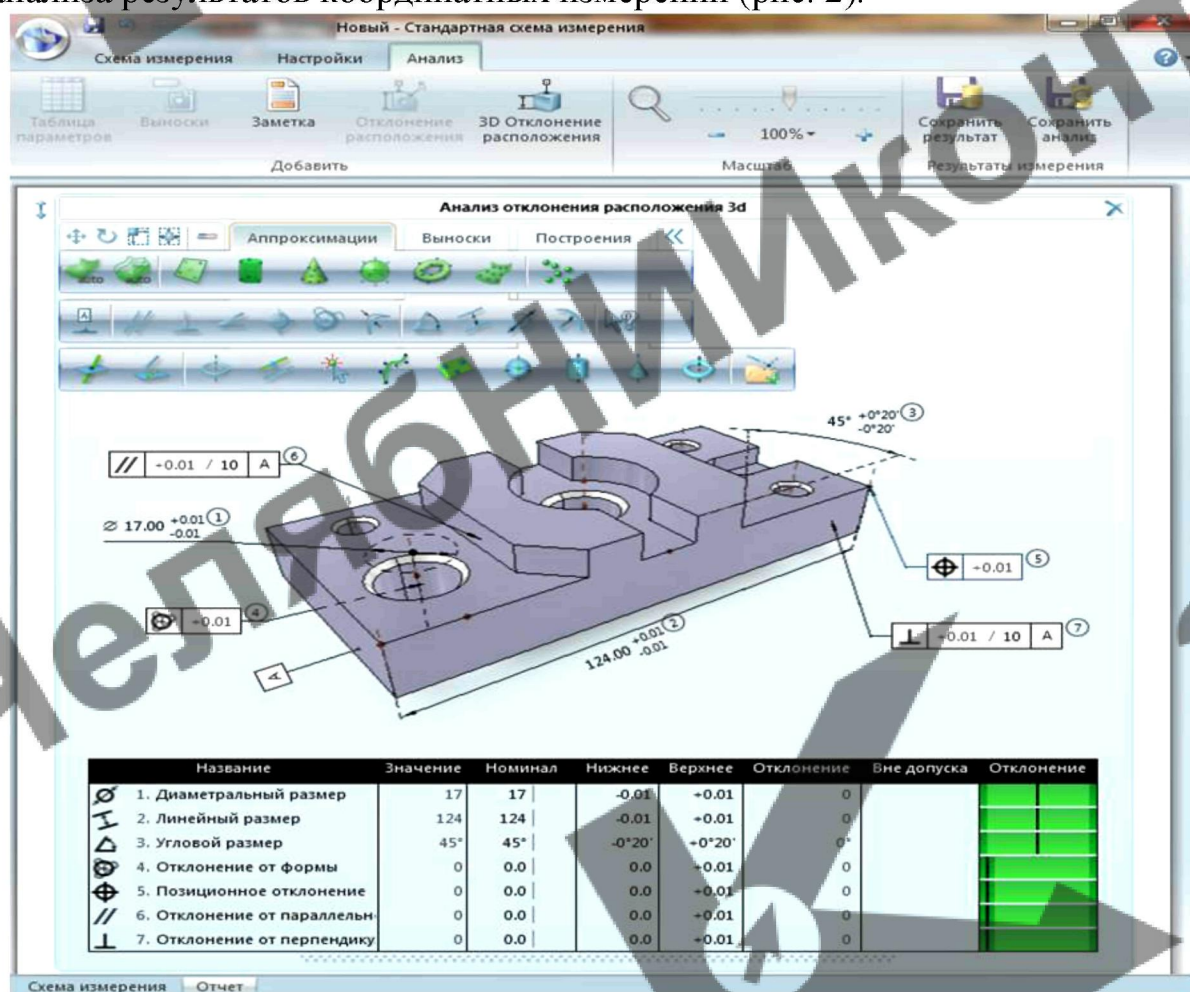


Рис.2. Модуль размерно-точного анализа результатов координатных измерений

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 (Заменяющий элемент – это поверхность или линия номинальной формы, аппроксимирующая реальную поверхность или линию и рассчитанная по координатам точек измерения, 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, по методу минимальной зоны, сплайновая [5]. 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 г в Российской Федерации параллельно действуют два стандарта [6, 7], 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, а в ГОСТ Р 53442-2009 для 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.

#### **4. Направления совершенствования программного обеспечения для координатных измерений.**

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. 3). Чтобы соответствовать требованиям сегодняшнего дня, процесс автоматизации проектирования технологий координатных измерений необходимо рассматривать в комплексе, как систему взаимосвязанных конструкторских (CAD/CAE), технологических (CAPP/CAM) и метрологических (CAIP/CAI) программных инструментов на всех стадиях машиностроительного производства. 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 её служебного назначения, технологических ограничений, инструментальных и кинематических стратегий при обработке каждого КТЭ.

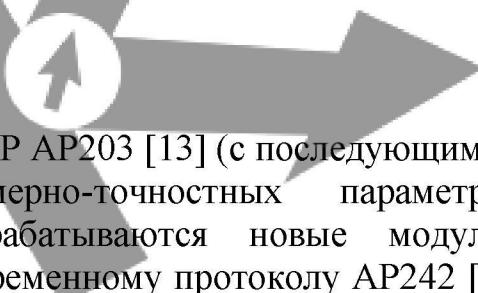
Авторами разрабатывается концепция конструкторско-метрологической модели детали (КММ) как основного элемента обмена данными о размерно-точностных параметрах детали в едином информационном пространстве машиностроительного предприятия [8]. В идеале первичная КММ должна быть результатом конструкторского проектирования в CAD/CAE-системах. Помимо описания номинальной

геометрии (3D-модель) файл с КММ должен содержать дополнительные данные о геометрических размерах, допусках, отклонениях формы и расположения каждого конструкторско-метрологического элемента (КМЭ), а так же о конструкторской системе координат, в которой все КМЭ детали упорядочено расположены. Данные необходимо кодировать в соответствии со стандартными требованиями GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing – геометрические размеры и допуски), большинство из которых описано в действующем с 1.01.2012 г. в Российской Федерации ГОСТ Р 53442-2009 [7]. Для полной кодировки всех стандартных размерно-точностных параметров КМЭ и типовых структур базовых систем координат КММ приходится использовать зарубежную нормативную базу GD&T [9, 10, 11, 12].



Рис.3. Схема концепции единого информационного пространства современного машиностроительного производства

К сожалению, в полном объеме обеспечить сквозную технологию проектирования в рамках единого информационного пространства пока не представляется возможным, т.к. отсутствует унификация форматов описания размерно-точностных параметров в большинстве распространенных форматов обмена данными. Для кодирования КММ наиболее рационально использовать инструменты унификации представления данных в виде прикладных протоколов STEP. Помимо существующей в последней версии ПО «ТЕХНОкоорд» возможности импорта 3D-модели в устаревшем формате



STEP AP203 [13] (с последующим ручным вводом данных о контролируемых размерно-точностных параметрах детали) в настоящий момент разрабатываются новые модули импорта и экспорта моделей по современному протоколу AP242 [14]. В структуре файла по протоколу STEP AP242 есть возможность передавать данные о GD&T параметрах, с помощью внутренних редакторов CAPP/CAM или CAIP/CAI систем в ручном или автоматическом режиме можно обеспечить корректировку параметров или дополнение структуры данных

На выставке „Металлообработка-2016“ (Москва, Экспоцентр, 23-27 мая 2016 г.) 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). В новой версии ПО «ТЕХНОкоорд» предусмотрена возможность по результатам координатных измерений создавать разнообразные варианты КММ(Ф<sub>j</sub>) (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 (библиотека) 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 контролируемые 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.

#### **5. 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 начинает практически применяться концепция конструкторско-метрологической модели детали.

#### **6. 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. Каталог продукции ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Измерительные приборы, системы автоматизированного контроля и управления [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/docs/Katalog.pdf> – 20.01.2016.

4. Руководство пользователя по работе с ПО «ТЕХНОкоорд» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/download.htm?path=docs/Manual.pdf> – 20.01.2016.

5. Сурков, И.В. Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений / И.В. Сурков, А.И. Буртовая // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 101–104.

6. ГОСТ 28187-89 (СТ СЭВ 6329-88). Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерения [текст]. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.

7. ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО 1101:2004). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски

формы, ориентации, месторасположения и биения [текст]. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 73 с.

8. Сурков И.В. Автоматизация проектирования технологий контроля на координатно-измерительных машинах и системах / И.В. Сурков, Н.Е. Миронова // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: сб. науч. тр. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2016. – С. 124–131.

9. ASME Y14.5.1M-1994 (R2004). Mathematical definition of dimensioning and tolerancing principles. – IHS, 1995. – 82 p.

10. ASME Y14.5-2009. Dimensioning and tolerancing. – Reversion ASME Y14.5.1M-1994 (R2004). – IHS, 2009. – 215 p.

11. ISO 1101:2012 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out. – Geneva: ISO, 2012. – 110 p.

12. ISO 5459:2011 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Datums and datum systems. – Geneva: ISO, 2011. – 88 p.

13. 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 [заменён на 10303-242:2014] – Geneva: ISO, 2011. – 526 p.

14. 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.