

**И.В. Сурков**

**Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении, Челябинск, Российская Федерация**

**E-mail: [suiv@toolmaker.ru](mailto:suiv@toolmaker.ru)**

**ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

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), 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).

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, 3].

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 САИР (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 метрологического ПО.

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 также методического, математического, информационного и программного обеспечения процессов координатных измерений. В соответствии с планами НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» на 2006-2018 гг. уже разработаны и серийно производятся координатные измерительные приборы и системы НИИК-481КМ2, НИИК-484, НИИК-701, НИИК-703, НИИК-483 [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 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 [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.

Базовое 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 базовом 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.

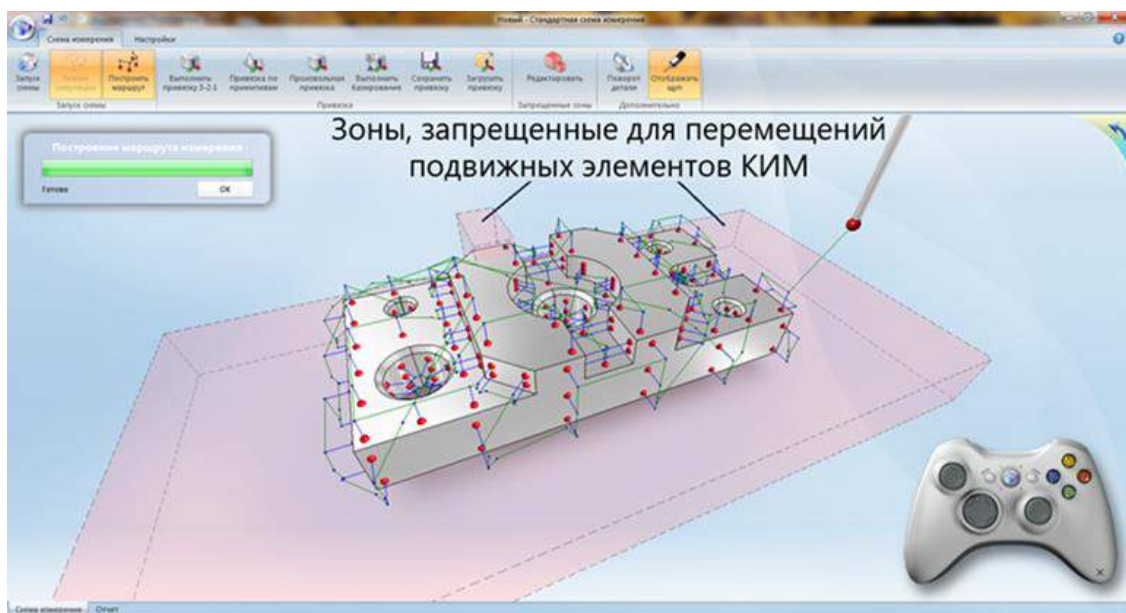


Рис. 1. Программирование процесса измерения в off-line режиме ПО «ТЕХНОКоорд»

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 (в том числе, 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 измерений 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» 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.

Определение заданных линейно-угловых параметров в ПО «ТЕХНОКоорд» производят с помощью модуля размерно-точностного анализа результатов координатных измерений, который включает в себя математическое «ядро» (программно реализует комплекс взаимосвязанных расчетных моделей) и графический интерфейс (рис. 2). Расчетная модель для анализа результатов координатных измерений: - часть методики координатных измерений, содержащая данные о методах аппроксимации, расчетных

алгоритмах и формулах, математически описывающую взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми линейно-угловыми параметрами.

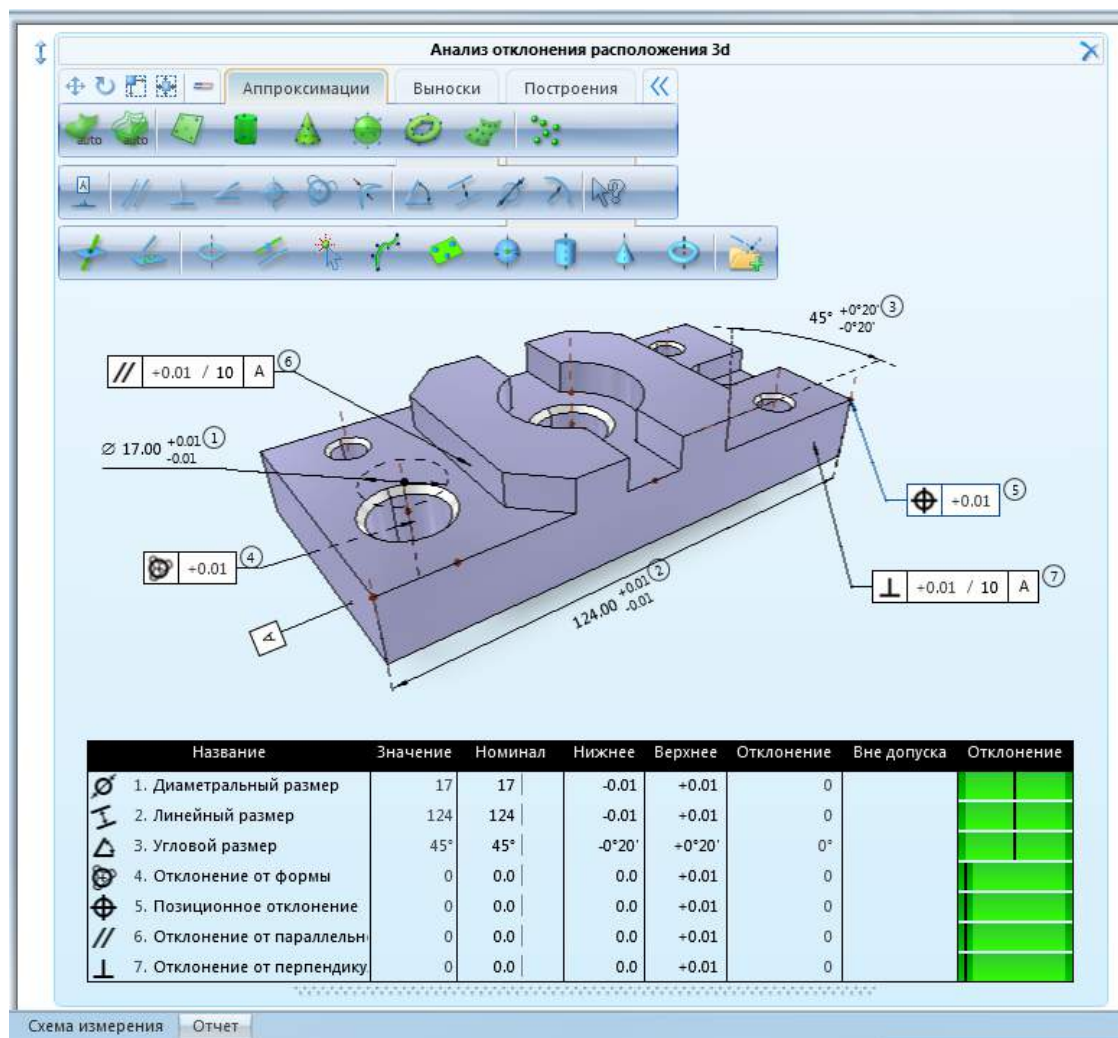


Рис. 2. Модуль размерно-точностного анализа результатов координатных измерений ПО «ТЕХНОкоорд»

По координатам измеренных точек, принадлежащих реальным геометрическим элементам детали (первичная информация о реальной геометрии), рассчитывается ассоциированная (числовая) модель детали в виде комплекта заменяющих и производных элементов, упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат. Заменяющий элемент – это поверхность или линия номинальной формы, с действительными размерами и расположением в системе координат детали, которая используются при анализе вместо реальной поверхности или реальной линии, и рассчитанная по координатам точек измерения в соответствии с принятым критерием математической аппроксимации. Аппроксимация – это математический метод, состоящий в приближенном представлении одних объектов другими, как правило, более простой природы, с некоторой долей погрешности и обеспечивающий получение заменяющего элемента, наилучшим образом согласованного с измеренными точками реальной геометрии детали в соответствии с выбранным критерием.

Если заменяющая поверхность является математическим описанием существующей (явной) реальной поверхности (цилиндрическое отверстие, плоскость торца детали, боковая сторона винтовой поверхности выступа резьбы и т.д.), на которой располагается

массив измеренных точек, то производная поверхность – это математическое описание скрытой (виртуальной) поверхности, которая определяется расчетным путем при анализе одной или нескольких заменяющих поверхностей (элементов). Примерами производных поверхностей являются плоскость симметрии, ось цилиндрической внутренней (отверстие) или наружной (вал) поверхности (в зависимости от метода расчета может быть в виде прямой или ломаной (состоящей из нескольких отрезков) линии), центр сферы. Производной от нескольких поверхностей (как заменяющих, так и уже выявленных производных) будет виртуальная плоскость, положение которой в системе координат детали задается комплексом ограничений (должна проходить через производную точку или прямую перпендикулярно (параллельно) заменяющей плоскости).

При контроле детали традиционными средствами измерения положение скрытых (виртуальных) поверхностей определяется с помощью механических узлов приборов, базирующих элементов измерительной оснастки или приспособления. Например, для определения положения оси цилиндрической поверхности используют самоцентрирующийся цанговый патрон или оправку, призмы обеспечивают фиксацию положения плоскости симметрии цилиндрической поверхности, положение контактного элемента измерительного наконечника при измерении диаметра конической поверхности в заданном осевом сечении достигается предварительной настройкой по образцовой детали или специальному шаблону и т.д.

При анализе результатов координатных измерений математическое описание производных поверхностей получают параллельно с расчетом параметров заменяющих поверхностей (координаты точки – центра окружности вычисляются одновременно с величиной ее радиуса в процессе выполнения математической аппроксимации по выбранному критерию) или используются дополнительные математические модели и расчетные алгоритмы.

Система заменяющих и производных элементов, используемая для расчета действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали – это математические формулы, уравнения, расчетные алгоритмы, а также массив фактических значений параметров и коэффициентов. Например, математическим описанием заменяющей или производной плоскости является уравнение:  $Ax + By + Cz + D = 0$ , в котором именно коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  определяют действительное положение плоскости в заданной системе координат (машины или детали).

В модуле размерно-точностного анализа результатов координатных измерений ПО «ТЕХНОкоорд» математическое описание скрыто от Пользователя (инженера-метролога или оператора КИМ). Оформление графического интерфейса и системы меню выполнено по аналогии с большинством распространенных в промышленности CAD/CAM систем (рис. 2). Трехмерная визуализация взаимного расположения анализируемых заменяющих и производных элементов, поверхностей, линий и точек, развитая система меню, привычные для CAD/CAM систем функциональные возможности значительно повышает эффективность и степень автоматизации процессов анализа результатов координатных измерений.

ПО «ТЕХНОкоорд» (как и большинство других программных пакетов для координатных измерений) предоставляет Пользователю систему меню для выбора метода математической аппроксимации заменяющих элементов: среднеквадратичная, по условию максимума или минимума материала (критерий прилегания заменяющей поверхности), по методу минимальной зоны, сплайновая [11]. Каждый вариант аппроксимации для одного и того же массива координат измеренных точек дает разный результат расчета действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали. Пользователь при выборе метода математической аппроксимации заменяющих элементов должен ориентироваться на рекомендации нормативной документации (стандарты, методики измерений) или самостоятельно проводить анализ служебного

назначения каждой измеряемой поверхности и детали в целом, то есть он сам отвечает за правильность выбора расчетной модели МКИ.

Большие трудности возникают из-за неоднозначности интерпретации понятий «размер» и «геометрическое отклонение» в существующей нормативной базе. В Российской Федерации параллельно действуют две группы стандартов, в которых по-разному трактуются методы расчетного определения однотипных геометрических размеров и отклонений.

Первая группа межгосударственных стандартов традиционна для стран СНГ, в том числе и для России и основана на положениях ГОСТ 24642-81 [12]. Хотя сам ГОСТ 24642-81 отменен на территории РФ с 1.01.2012 г. продолжает действовать ГОСТ 28187-89 [13] и введена новая редакция ГОСТ 2.308-2011 [14], в которых по умолчанию предполагается измерение от прилегающих поверхностей (т.е. основные принципы измерения основаны на положениях ГОСТ 24642-81).

Вторая группа стандартов (ГОСТ 31254-2004 (ИСО 14660-1:1999, ИСО 14660-2:1999) [15], ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012) [16], ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010) [17]) гармонизирована с международными стандартами ИСО. ГОСТ 25346-2013 по умолчанию рекомендует для измерения цилиндрических и призматических элементов (поверхностей) использовать двухточечный метод определения величины интервала от минимального до максимального значения действительного местного размера без учета влияния отклонений формы. В ГОСТ 31254-2004 и ГОСТ Р 53442-2015 для реализации в координатной метрологии рекомендованной по умолчанию двухточечной схемы измерения предлагается применять достаточно сложные расчетные модели, основанные на методах среднеквадратичной аппроксимации. В ГОСТ Р 53442-2015 (стандарт модифицирован на основе ИСО 1101:2012) приведены рекомендации по оформлению в чертежной документации однозначных требований о применении средств измерения и расчетных моделей, обеспечивающих определение геометрических параметров по условию максимума или минимума материала. Однако, в существующем ПО для координатных измерений (в том числе, в ПО «ТЕХНОкоорд») реализованы различные математические методы и расчетные модели, на которые нет однозначных требований в вышеперечисленных стандартах, действующих в РФ.

Неоднозначность рекомендаций приводит к ошибкам при выборе оптимальной расчетной модели для анализа результатов координатных измерений. Необходимо уже сейчас при оформлении чертежной документации и электронных моделей деталей и изделий применять однозначные требования международных стандартов ISO [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

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. Пользователь (инженер-метролог или оператор КИМ) сам отвечает за правильность выбора МКИ, ориентируясь на служебное назначение детали. Повышение степени автоматизации этого этапа обеспечит значительный рост производительности процессов проектирования, снизит влияние субъективных факторов.

В соответствии с планом НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» в настоящее время проводится разработка новой версии базового ПО «ТЕХНОкоорд».

Основной упор делается на превращение САП/САI системы «ТЕХНОкоорд» в полноценную часть единого информационного пространства в рамках концепции CALS технологий (рисунок 3). 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 и технологических ограничений при обработке каждого КТЭ.

Специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» разрабатывается концепция конструкторско-метрологической модели детали (КММ) [18]. Первичная КММ – это результат конструкторского 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. Данные могут кодироваться в соответствии со стандартными требованиями GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing – геометрические размеры и допуски), которые частично описаны в действующем с 1.07.2017 г. в Российской Федерации ГОСТ Р 53442-2015 [16]. Более полное описание размерно-точностных параметров КМЭ и типовых структур базовых систем координат КММ разрабатывается с использованием зарубежной нормативной базы GD&T [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].



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

Для кодирования КММ используются инструменты унификации представления данных в виде прикладных протоколов STEP [26]. В структуре файла по протоколу STEP AP242 [27] 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.

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 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-6.Х» 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.

### 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. 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. Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями / И.В. Сурков, А.И. Буртовая // 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 – 2018. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/docs/Katalog.pdf> (дата обращения 10.09.2018).

6. Руководство пользователя по работе с ПО ТЕХНОкоорд. – Челябинск: ЗАО «ЧелябНИИконтроль». – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/download.htm?path=docs/Manual.pdf> (дата обращения 10.09.2018).

7. Сурков И.В. Разработка измерительного оборудования и программно-методического обеспечения для контроля параметров зубчатых колес и передач / И.В. Сурков // 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. Разработка методики координатных измерений резьбовых конических калибров / И.В. Сурков, Е.А. Суркова, А.И. Буртовая, И.С. Матрикова // 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 / И.В. Сурков, // Измерительная техника. Ежемесячный научно-технический журнал. – 2011. – №7. – С. 13-17.

10. Педь С.Е. Разработка модельного ряда аппаратно-программных комплексов для автоматизированных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов / С.Е. Педь, Д.А. Мастеренко, П.В. Панфилов, А.В. Еськов, И.В. Сурков, // Измерительная техника. Ежемесячный научно-технический журнал. – 2013. – №12. – С. 27-31.

11. 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.

12. ГОСТ 24642-81 (СТ СЭВ 301-76). Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения [отменен с 1.01.2012] [текст]. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. – 70 с.

13. 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.

14. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации. Указания допусков формы и расположения поверхностей [текст]. – Москва: Стандартиформ, 2012. – 28 с.

15. ГОСТ 31254-2004 (ИСО 14660-1:1999, ИСО 14660-2:1999) Основные нормы взаимозаменяемости. Геометрические элементы. Общие термины и определения [текст]. – Москва: Стандартиформ, 2005. – 12 с.

16. ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения [текст]. – Москва: Стандартиформ, 2016. – 96 с.

17. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки [текст]. – Москва: Стандартиформ, 2014. – 42 с.

18. 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.

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

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

21. ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out. – Geneva: ISO, 2017. – 154 p.

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

23. ISO 14405-1:2016 Geometrical product specifications (GPS). Dimensional tolerancing. Part 1: Linear sizes. – Geneva: ISO, 2016. – 64 p.

24. ISO/FDIS 14405-2:2018 Geometrical product specifications (GPS). Dimensional tolerancing. Part 2: Dimensions other than linear or angular sizes. – Geneva: ISO, 2018. – 30 p.

25. ISO 14405-3:2016 Geometrical product specifications (GPS). Dimensional tolerancing. Part 3: Angular sizes. – Geneva: ISO, 2016. – 30 p.

26. 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.

27. 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.