

РАЗВИТИЕ КООРДИНАТНОЙ МЕТРОЛОГИИ В РОССИИ

И.В. Сурков

Выполнен анализ современного состояния и проблем координатной метрологии в России. Приведено описание разработанного оборудования, программного, методического и информационного обеспечения для координатных измерений. Рассмотрены вопросы повышения степени автоматизации процессов проектирования технологий контроля.

Ключевые слова: координатно-измерительные машины и системы; программное обеспечение для координатных измерений; методика координатных измерений; разработка межгосударственного стандарта; учебное оборудование для метрологии.

Произшедший в последние годы рост выпускаемой продукции предприятиями машиностроительного комплекса России требует не только обновления парка технологического оборудования, но и закупки новых приборов и систем технического контроля.

Очевидно, что на машиностроительных предприятиях необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные приборы (КИП), машины (КИМ) и системы (КИС) различных компоновок и типоразмеров. Положенный в основу их работы координатный метод измерения является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля широкой номенклатуры деталей (в том числе

со сложнопрофильными поверхностями: зубчатые колеса, червячные фрезы, турбинные лопатки, резьбовые калибры) [1].

Разработка современного координатно-измерительного оборудования, а также методического, математического, информационного и программного обеспечения процессов координатных измерений проводится в рамках нового научного направления – координатной метрологии. Координатная метрология – раздел прикладной метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения координатно-измерительной техники (оборудования), разработки координатных методов и технологий измерения.

Для определения приоритетных направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в периодически разрабатываемых планах развития ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») автор начиная с 2003 года проводит анализ текущих проблем координатной метрологии в России.

В настоящее время можно выделить несколько основных факторов, которые сдерживают развитие координатной метрологии в России:

1. Высокая стоимость новой координатно-измерительной техники (100...500 тыс. евро, уникальные КИМ могут стоить более 1 млн. евро) и программного обеспечения (примерно 15...25 тыс. евро за базовое ПО и по 5...10 тыс. евро дополнительно за каждый специализированный программный модуль, например, для контроля параметров зубчатых колес, резьбовых поверхностей, турбинных лопаток и т.д.).

2. Большая часть КИМ и ПО поставляются на наш рынок зарубежными производителями (DEA, Zeiss, Leitz и т. д.), что увеличивает время поставки оборудования и запчастей, ставит предприятия России (в том числе оборонные) в зависимость от политической конъюнктуры и законодательных ограничений других государств. Единственный российский производитель универсальных КИМ – фирма «ЛАПИК» (г. Саратов). Проектирование и производство специализированных КИМ и КИС осуществляется в ЗАО «ЧелябНИИконтроль», однако большинство важных узлов и модулей, необходимых для сборки (измерительные головки, преобразователи линейных и угловых перемещений, приводы, контроллеры, высокоточные подшипники и другие комплектующие), в России не производятся.

3. Слабо реализованы принципы сквозного проектирования (CALStехнологии, новая концепция «Индустрия 4.0»). Нет полноценного единого информационного пространства для российского программного обеспечения, не обеспечивается обмен данными о размерно-точностных параметрах деталей и результатах измерения.

4. Практически отсутствует нормативное и методическое обеспечение координатной метрологии: стандарты, руководящие материалы, методики выполнения координатных измерений типовых деталей.

5. Отсутствие на большинстве машиностроительных предприятий подготовленных кадров: инженеров-метрологов, контролёров, операторов-наладчиков КИМ. Нет целевых образовательных программ по подготовке и переподготовке специалистов в области автоматизации технического контроля и координатной метрологии.

Даже краткое перечисление факторов, сдерживающих внедрение методики координатных измерений в производство, наглядно демонстрирует, что обеспечение промышленных предприятий координатно-измерительной техникой – задача сложная, дорогостоящая и длительная.

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).

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 CAIP (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 НИОКР по проектированию новой серии многофункциональных модульных измерительных систем и приборов в 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 2006–2017 гг. уже разработаны и серийно производятся координатные измерительные приборы и системы НИИК-481КМ2, НИИК-484, НИИК-701, НИИК-703, НИИК-483 [2, 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-Резьба» (измерение конических резьбовых калибров), «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 CAIP-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, которая в дальнейшем может быть запущена на реальной КИМ или КИС.

Опыт эксплуатации существующей версии базового ПО «ТЕХНОкоорд» и дополнительных программных модулей показал, что выбор методики координатных измерений (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.

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

Основной упор делается на превращение САП/САИ системы «ТЕХНОкоорд» в полноценную часть единого информационного пространства в рамках концепции CALS технологий. Чтобы соответствовать требованиям сегодняшнего дня, процесс автоматизации проектирования технологий координатных измерений необходимо рассматривать в комплексе как систему взаимосвязанных конструкторских (САД/САЕ), технологических (САРР/САМ) и метрологических (САП/САИ) программных инструментов на всех стадиях машиностроительного производства [5].

В рамках плана НИОКР на стадиях проектирования, изготовления и испытаний новых измерительных приборов и систем проводятся масштабные теоретические и экспериментальные исследовательские работы:

- определяются факторы, влияющие на погрешность определения координат массива точек, принадлежащих измеряемым деталям (поверхностям);
- разрабатываются методики объемной калибровки КИМ и КИС для компенсации систематических погрешностей;
- проводятся исследования и разработки методик координатных измерений для определения геометрических параметров различных деталей и инструментов, в т. ч. со сложнопрофильными поверхностями;
- формируются рекомендации по выбору оптимальных стратегий и методов аппроксимации заменяющих поверхностей при многоточечных координатных измерениях.

Результаты научных исследований используются не только при проектировании и производстве новых измерительных приборов и систем, создании ПО для координатных измерений, но и для разработки нормативной документации: методик измерений, поверки и калибровки, технических условий, стандартов.

Для унификации стандартных средств и методов контроля геометрических параметров резьбовых и гладких конических калибров нефтегазового сортамента, а также внедрения в практику работы метрологических подразделений координатных методов измерения специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» был разработан проект межгосударственного стандарта «Калибры для соединений с конической резьбой обсадных, насосно-компрессорных,

бурильных и трубопроводных труб. Методика калибровки» [6]. В настоящее время окончательная редакция проекта стандарта проходит обсуждение и доработку в рабочей группе РГ5 «Контроль резьбовых соединений» подкомитета ПК7 «Трубы нарезные нефтяного сортамента» технического комитета по стандартизации ТК357 «Стальные и чугунные трубы и баллоны».

Проведя анализ достоинств и недостатков предыдущих стандартов, отраслевых методик измерения, нормативных документов передовых инструментальных предприятий, авторы проекта стандарта объединили в единый комплекс разнообразные традиционные средства и методы измерения геометрических параметров резьбовых калибров, а также добавили разработанные специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» типовые МКИ, включающие описание рекомендованных стратегий измерения и методов аппроксимации заменяющих поверхностей.

В проекте стандарта подробно описаны не только особенности координатных измерений резьбовых калибров на специализированных КИП и КИС производства ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Приведены варианты типовых МКИ, которые могут быть реализованы как на универсальных, так и специализированных координатных измерительных машинах, приборах и системах других производителей.

В последние 25 лет научно-практическая, учебная и справочная литература, посвященная современным проблемам координатной метрологии, средствам и методам координатных измерений геометрических параметров деталей, в России не издавалась. В рекламных каталогах приведены в основном общие рассуждения о «великолепных», «превосходных», «уникальных» качествах предлагаемых средств измерения, но мало данных для прямого сравнения технических характеристик координатных измерительных машин различных производителей и анализа метрологических возможностей программного обеспечения, очень много ошибок в терминологии. Например, в разных публикациях вместо термина «измерительная головка (ИГ)» используют «щуп», «сенсор», «датчик». «Щупом» могут называть также «измерительный наконечник», «удлинитель ИГ», «поворотный узел ИГ» и т. д. Отраслевой руководящий документ РД2 БВ00-9-90 «Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология» [7] был разработан в 1990 г. и не получил широкого распространения. Приведенные в нем термины и определения во многом устарели и не охватывают всех возможностей современных средств и методов координатных измерений.

Используя как базу положения РД2 БВ00-9-90, разработали и ввели в проект межгосударственного стандарта [6] основные понятия и термины координатной метрологии, а также термины, описывающие особенности измерений геометрических параметров резьбовых конических калибров.

Начиная с 2003 г. группа преподавателей кафедры технологии машиностроения Южно-Уральского государственного университета совместно со

специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» разрабатывают и изготавливают учебные лабораторные комплексы различной сложности и комплектации. Поставка и монтаж учебного оборудования в образовательные учреждения России и стран СНГ осуществляется через ООО НПП «Учтех-Профи» (г. Челябинск [8]). Комплектация лабораторий, количество и тематика лабораторных работ зависят от специфики учебных планов и рабочих программ изучаемых дисциплин.

Для получения навыков правильного обслуживания КИМ, умения самостоятельно программировать сложные измерительные циклы разработаны несколько вариантов учебных КИМ с числовым программным управлением в настольном исполнении. Оснащение базового варианта трехкоординатной учебной КИМ НИИК-701 или НИИК-702 (с утяжеленной виброустойчивой станиной) поворотным столом с ЧПУ НИИК-703 предоставляет возможность для изучения особенностей программирования четырехкоординатных циклов измерения деталей и инструментов с поверхностями сложной формы, в том числе зубчатых колес, червячных фрез, конических резьбовых калибров.

Для обучения студентов профильных учебных заведений особенностям технологий контроля типовых деталей в разных отраслях промышленности (нефтегазовый комплекс, трубопрокатные заводы, авиационная промышленность, предприятия ОАО «Российские железные дороги») выпускаются специализированные лабораторные комплексы.

Заключение. На основании анализа современного состояния и проблем координатной метрологии в России был разработан план НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Последовательная реализация этого плана позволила получить весомые результаты в разработке современного координатно-измерительного оборудования, а также методического, математического, информационного и программного обеспечения процессов координатных измерений.

Библиографический список

1. Coordinate measuring machines and systems / ed. Robert J. Hocken and Paulo H. Pereira. – 2nd ed. CRC Press, 2011. – 574 p.
2. 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, 2013. – С. 186–191.
3. Каталог продукции ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Измерительные приборы, системы автоматизированного контроля и управления. – 2017. – URL: <http://www.toolmaker.ru/docs/Katalog.pdf>.
4. Руководство пользователя по работе с ПО ТЕХНОкоорд. – Челябинск: ЗАО «ЧелябНИИконтроль». – URL: <http://www.toolmaker.ru/download.htm?path=docs/Manual.pdf>.

5. 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.

6. ГОСТ Калибры для соединений с конической резьбой обсадных, насосно-компрессорных, бурильных и трубопроводных труб. Методика калибровки. – Проект, окончательная редакция. – Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – URL: <http://www.toolmaker.ru/docs/gost.pdf>.

7. Руководящий документ: РД 2 БВ00-9-90. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. – М.: ВНИИИзмерения, 1990. – 28 с.

8. Учебное оборудование и наглядные пособия для учебы. Каталог ООО НПП «Учтех-Профи». Раздел «Метрология. Технические и электрические измерения Технология машиностроения». – URL: <http://labstand.ru/catalog/metrologiya>.

[К содержанию](#)