

Рис. 1. Окно ПО Zeiss Gear Pro

В большинстве современных изделий машиностроения и приборостроения используются зубчатые передачи, которые в конструктивном, технологическом и метрологическом отношении являются одними из наиболее сложных элементов машин и механизмов.

В №4,5/2007 г. авторы представили краткое описание наиболее распространенных, «традиционных» средств контроля зубчатых колес, провели анализ конструкций универсальных координатных измерительных машин, рассмотрели базовые понятия координатной метрологии. Данная статья посвящена особенностям контроля зубчатых колес на координатных измерительных машинах.

И.В. Сурков,

к.т.н., доцент, член-корреспондент
Метрологической Академии России, директор,

М.В. Мягкова,

магистр техники и технологии, ведущий специалист
по зубоизмерительным приборам и системам,
ЗАО «ЧелябНИИконтроль», г. Челябинск (Россия)

КООРДИНАТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Эффективность и достоверность процесса измерения на координатных измерительных машинах (КИМ) зависит как от технических и метрологических характеристик базовой аппаратной части КИМ, так и от функциональности программного обеспечения (ПО), адекватности применяемых методик координатных измерений (МКИ).

Программное обеспечение КИМ предназначено для выполнения следующих задач:

- ♦ выбора типовых стратегий измерения и разработки управляющей программы координатного контроля детали;
- ♦ управления циклом измерения координат заданного массива точек, принадлежащих реальным поверхностям детали;
- ♦ математической обработки результатов измерения и расчетов заданных линейно-угловых параметров (размеров, отклонений формы и расположения);
- ♦ проведения статистических расчетов, оформления протоколов, хранения и поиска метрологической информации;
- ♦ проведения типовых процедур координат-

ной метрологии: калибровки измерительных головок (ИГ) и измерительных наконечников (ИН), математического базирования для определения положения системы координат детали (СКД) в рабочем пространстве КИМ, поверки и калибровки для определения соответствия фактических метрологических характеристик КИМ нормируемым и т.д.

В своем развитии ПО для КИМ прошло несколько этапов. Основу ПО первых КИМ, оснащенных компьютером, составляла программа-интерпретатор. Программист-метролог или оператор КИМ разрабатывали управляющую программу (УП), в которой с помощью специализированного языка программирования (на первых порах каждый разработчик ПО использовал собственный вариант языка) кодировалась последовательность выполнения команд управления перемещениями узлов КИМ и необходимых расчетных процедур. В число этих процедур входили преобразования систем координат, присвоения значений координат измеренных точек переменным (массивам переменных), математическая обработка

результатов измерений и т.д. Программа-интерпретатор предназначалась для считывания кадров УП и формирования в машинных кодах команд управления электронными устройствами и узлами измерительного оборудования, выполнения расчетных и логических функций, проведения операций ввода-вывода информации. Впрочем, и сегодня большинство версий ПО для КИМ включает в себя программу-интерпретатор, однако к настоящему времени проведена унификация языков программирования, которые в основном соответствуют стандарту DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard).

Согласно официальному документу (DMIS Revision 04.0 ANSI/CAM-I 104.0-2001, Part 1) стандарт DMIS является словарем терминов, устанавливающим формат для программ и результатов измерений, а в расширенном виде – языком высокого уровня для измерительного оборудования. Термин «DMIS» часто применяется к программам-генераторам и интерпретаторам, а также к файлам текущего ввода-вывода. Все перечисленное образует DMIS-систему в целом. Производители используют термино-



логию и функциональные подмножества этого стандарта при разработке своих версий ПО, которые называются профилями DMIS (например, LAPIC-профиль языка DMIS является основой системы Samlso v.6 фирмы «ЛАПИК»).

Разработка исходного кода УП — задача сложная, трудоемкая, требующая высокой квалификации метролога или оператора КИМ. Последующие этапы развития ПО для КИМ характеризуются внедрением программных модулей, полностью или частично автоматизирующих процессы разработки УП.

Одной из первых стали использовать функцию автопрограммирования при измерении первой детали в наладочном режиме. Оператор с помощью пульта управляет перемещениями узлов КИМ и одновременно автоматически генерируется фрагмент УП, фиксирующий последовательность действий и траекторию перемещений. Далее, в ручном режиме оператор корректирует этот фрагмент, добавляя расчетные функции.

Увеличению скорости программирования и уменьшению количества ошибок способствовало внедрение программ-редакторов УП с функциями генерации фрагментов программы. Представив контролируемую деталь как набор типовых геометрических элементов, оператор с помощью меню выбирает для каждого элемента соответствующую экранную форму, вводит номинальные параметры элемента (например, диаметр и высоту цилиндрического отверстия, координатный размер), отклонения размеров. Затем — выбирает или задает стратегию измерения (число и расположение точек на контролируемой поверхности или траекторию движения), рассчитываемые линейно-угловые параметры, метод аппроксимации результатов многоточечных измерений и т.д. По введенным данным программа генерирует часть УП для контроля этого элемента. По аналогии генерируются остальные части УП. Программы большинства разработчиков дают возможность редактирования УП, имеют режим диагностики ошибок. Функция визуализации позволяет на экране монитора проконтролировать перемещения узлов КИМ при отработке УП в offline-режиме.

При разработке современных версий ПО для КИМ используются принципы сквозного проектирования в соответствии с требованиями стандартов CALS-технологий. В ПО интегрируется расчетное ядро и интерфейсы для работы с каркасными и твердотельными CAD моделями деталей. В таких ПО, как PC-DMIS CAD, PC-DMIS CAD++ (фирма Wilcox) и Calypso (фирма

Carl Zeiss) предусмотрена возможность загрузки и преобразования данных большинства наиболее популярных CAD-форматов: DWG, DXF, IGES, STEP, STL и др.

В развитых CAD-форматах, например, таких как STEP (серия стандартов ISO 10303), для передачи данных об изделии в файле с помощью стандартных протоколов кодируется информация о составе, конфигурации и геометрической модели изделия (детали), административные и специальные данные, в т. ч. — что очень важно — показатели точности линейно-угловых параметров: допуски размеров, отклонений формы и расположения поверхностей. Эта информация позволяет полностью автоматизировать процесс разработки УП для контроля на КИМ. Данные о геометрической модели уже содержат сведения по всей совокупности типовых элементов, из которых состоит контролируемая деталь, и об их взаимном расположении. В зависимости от компоновки КИМ, типа измерительной головки (ИГ) и заданной точности измеряемых параметров автоматически выбирается типовая стратегия измерения для каждого геометрического элемента, а также подпрограммы для расчета необходимых линейно-угловых параметров. Стратегия измерения графически отображается на экране монитора в виде точек или траектории движения измерительного наконечника, расположенных на поверхностях 3D-модели детали. Для удобства работы на экране может графически отображаться положение ИГ и узлов КИМ.

Графический интерфейс дает возможность оператору корректировать положение опорных точек и траекторий, вводить в рабочем пространстве КИМ зоны, запретные для перемещений ИГ (например, в местах расположения элементов установочных приспособлений или калибровочной оснастки). Трехмерная симуляция процесса измерения позволяет проводить предварительную проверку сгенерированного варианта УП в offline-режиме. Результаты измерений и расчетов фактических значений линейно-угловых параметров детали могут быть выведены на экран, сохранены в виде отчетов и протоколов на бумажных и электронных носителях или интегрированы в файл CAD-формата для использования в других САПР.

С каждой новой версией разработчики ПО для КИМ расширяют функциональные и метрологические возможности своих программных продуктов. Однако, большинство производителей универсальных координатных измерительных машин предлагают потребителю базовые версии ПО, предназначенные для кон-

троля типовых корпусных (призматических) деталей и тел вращения. Дополнительные опции и программные модули для контроля деталей со сложнопольными поверхностями (зубчатые колеса, турбинные лопатки, резьбовые калибры и т.д.) необходимо приобретать дополнительно.

Рассмотрев базовые понятия координатной метрологии, переходим к описанию особенностей процесса координатных измерений зубчатых колес.

МЕТОДИКА КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Для реализации методики координатных измерений (МКИ) зубчатых колес на универсальных КИМ разработчики ПО расширяют возможности базовых программ за счет специальных приложений и программных модулей.

Например, фирма Wilcox дополняет базовую конфигурацию PC-DMIS специальным приложением для координатных измерений зубчатых колес PC-DMIS Gear. Генерация кадров УП производится на основании последовательности экранных форм, заполняемой с помощью программы-мастера, с описанием параметров контролируемого зубчатого колеса.

КИМ фирмы Carl Zeiss для контроля зубчатых колес оснащаются ПО GearPro с возможностью программирования по CAD-модели (рис. 1).

Очевидно, что точность и достоверность значений линейно-угловых параметров, определяемых при координатных измерениях зубчатых колес, зависит как от погрешности определения фактических координат каждой измеряемой точки (у КИМ в соответствии с ISO 10360-2 нормируется предельное значение линейного измерения MPPE), так и от погрешности методики координатных измерений, положенной в основу программного обеспечения.

При анализе составляющих МКИ зубчатых колес достаточно просто оценить применяемые стратегии координатных измерений. Число точек, их расположение на контролируемых эвольвентных поверхностях и последовательность обхода (траекторию движения) при измерении на универсальных КИМ различных производителей можно оценить при открытой демонстрации на выставках, а также по свободно распространяемым рекламным видеофильмам, демонстрирующим процесс контроля зубчатых колес.

На КИМ с триггерной ИГ стандартное расположение контролируемых точек на эвольвентной поверхности соответствует схеме, приведенной на рис. 2, а. Для более точной оценки

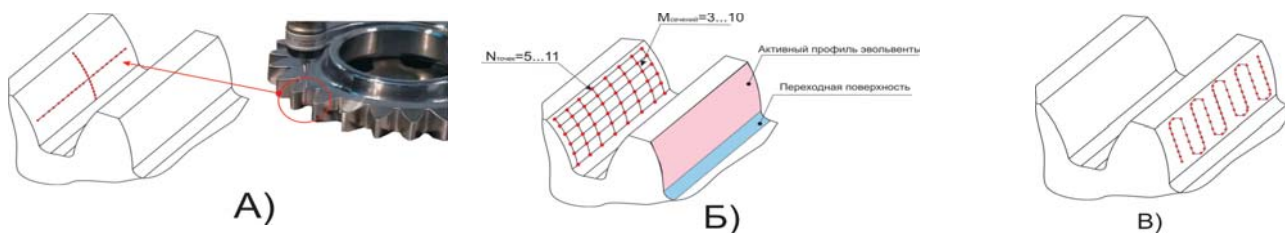


Рис. 2. Варианты стратегий координатных измерений эвольвентных поверхностей

погрешности выбирают стратегию, при которой точки располагаются в виде сетки (рис. 2, б). При использовании сканирующей ИГ координаты точек фиксируются с определенным шагом вдоль траектории, по которой измерительный наконечник контактирует с боковой поверхностью зуба (две скрещивающиеся линии (по аналогии с рис. 2 а) или петля (рис. 2 в)).

Значительно сложнее провести анализ расчетных методик и алгоритмов, математически описывающих взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми линейно-угловыми параметрами контролируемых зубчатых колес. Так как эта тематика является областью конкурентного преимущества фирм разработчиков, то и публикаций на данную тему крайне мало. Понятно, что затратив значительные финансовые и временные ресурсы на теоретические и экспериментальные исследования для выбора эффективной и достоверной методики, трудно заставить себя поделиться с потенциальными конкурентами информацией в открытой печати.

Дополнительной сложностью является тот факт, что судя по рекламным каталогам и материалам сайтов, ПО для координатных измерений зубчатых колес основных зарубежных разработчиков аттестовано на соответствие стандартам других стран (AGMA 2000-A88, DIN 3962, JIS B 1702, ISO 1328 и т. д.). При этом упоминаний об аттестации на соответствие рассчитываемых характеристик точности показателям, нормируемым по ГОСТ 1643-81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» авторы, к сожалению, не обнаружили (Заранее приносим свои извинения разработчикам, имеющим соответствующий российский сертификат об аттестации ПО для контроля зубчатых колес, но в качестве оправдания опять сошлемся на скудость открытой информации по этой теме).

В рамках выполнения НИОКР по проектированию новой серии многофункциональных модульных измерительных систем (подробнее об этом — чуть позже) специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» в настоящее время проводят разработку методического, математического, информационного и алгоритмического обес-

печения процессов координатных измерений на новых приборах. Результаты исследований используются для создания ПО «ТехноКоорд-Эвольвента». Расчетное ядро и библиотека подпрограмм контроля базового ПО «ТехноКоорд» (Технология Координатных Измерений) дополняется графическим интерфейсом, обеспечивающим возможность программирования по САД-модели зубчатого колеса, базой данных с информационным обеспечением по конструктивным и метрологическим параметрам зубчатых колес, а также расчетными программными модулями, которые на сегодня обеспечивают измерение следующих комплексных параметров:

1. Для контроля кинематической точности:

- ♦ Радиальное биение зубчатого венца (радиальная составляющая),
- ♦ Колебание длины общей нормали (тангенциальная составляющая),

2. Для контроля норм плавности:

- ♦ Отклонения шага,
- ♦ Погрешность профиля,

3. Для контроля норм контакта зубьев:

- ♦ Отклонения направления зубьев,

4. Для норм бокового зазора:

- ♦ Отклонения длины общей нормали.

Продолжается работа по созданию набора расчетных моделей, математически описывающих взаимосвязь координат измеренных точек с остальными линейно-угловыми параметрами, которые нормируются по ГОСТ 1643-81. В МКИ ПО «ТехноКоорд-Эвольвента» используется комбинированная стратегия контроля зубчатых колес (рис 3). Три пары боковых поверхностей зубьев, расположенных примерно через 120° друг от друга, контролируются по схеме «Сетка». Число точек зависит от точности и геометрических размеров колеса. Остальные боковые поверхности контролируются по упрощенной стратегии в виде более редкой «сетки» или по схеме рис. 2, а.

Следуя уже упоминавшейся традиции закрытости информации, не будем подробно описывать используемые математические модели и алгоритмы, положенные в основу ПО «ТехноКоорд-Эвольвента». Отметим только, что особенностью техпроцессов изготовления

зубчатых колес является сложный механизм взаимодействия отклонений точности инструмента, оборудования, погрешности установки заготовки, неточностей операций предшествующей обработки. Поэтому большинство показателей точности, нормируемых по ГОСТ 1643-81, носят комплексный характер и не дают полного представления о причинах и характере их возникновения. Основу предлагаемого математического обеспечения составляют модели, описывающие комплексные погрешности в виде совокупности типовых структурных составляющих: отклонений размеров, формы, расположения рабочих поверхностей контролируемых зубчатых колес.

Для текущего тестирования расчетных подпрограмм, а также для последующей оценки погрешности ПО при его аттестации в соответствии с п.5.5 МИ 2955-2005 разработана методика аттестации с использованием моделей исходных данных. Для генерации этих данных применяются наборы 3D моделей зубчатых колес, разработанных в формате STEP (серия стандартов ISO10303), в котором для описания схем данных используется специально введенный язык Express.

В формате STEP для передачи геометрических данных используется представление формы в виде усовершенствованной гранично-заданной модели (advanced bounded representation). При таком подходе пространственное тело представляется совокупностью ограничивающих его объем оболочек, граней и ребер, которые заданы параметрически, что позволяет моделировать объекты произвольной формы и сложности. В зависимости от выбранной стратегии измерения на поверхности модели выбирается упорядоченный массив точек, фиксируются их координаты относительно базовых поверхностей колеса (рис. 4, а). Модель может быть идеальной или с набором специально введенных погрешностей, значения которых известны (рис. 4, б). Координаты точек вводятся в подпрограммы, затем рассчитываются параметры зубчатого колеса и оценивается погрешность вычислений по выбранной МКИ.

Аналогичную методику тестирования можно предложить для оценки сопоставимости ре-



зультатов определения параметров, нормируемых по ГОСТ 1643–81, с помощью ПО различных производителей.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КИМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Кроме универсальных КИМ, в производственных цехах и метрологических лабораториях машиностроительных предприятий применяют современные зубоизмерительные приборы и системы, принцип работы которых также основан на координатном методе измерений. Характерной особенностью этих средств является обязательное наличие высокоточного поворотного стола, следовательно, измерения производятся в цилиндрической системе координат (для универсальных КИМ с декартовой системой координат поворотный стол является опцией). Такие измерительные приборы и системы можно классифицировать как специализированные КИМ для контроля зубчатых колес, хотя по большому счету на них можно контролировать и другие детали и инструменты со сложнопрофильными поверхностями, относящиеся к телам вращения: червяки, режущий инструмент, кулачковые валы и т. д.

В настоящее время наиболее известны специализированные зубоизмерительные машины фирм KLINGELNBERG, HÖFLER, OPTION (Германия), Gleason (США), Oerlikon (Швейцария).

Можно отметить также тот факт, что на выставке «Металлообработка-2004» (Экспоцентр, г. Москва) фирма STROJIRNY CELAKOVICE s.r.o. (Чехия) продемонстрировала широкую гамму своих зубоизмерительных приборов под торговой маркой GearSpect типа DO, в т.ч. трехкоординатную специализированную КИМ DO-3PC (рис. 5), предназначенную для высокоточных измерений зубчатых колес с помощью контактной сканирующей измерительной головки (рис. 6). Программное обеспечение DO-3PC позволяет по координатам измеренных точек рассчитать следующие параметры:

- ♦ погрешность профиля (эвольвенты) зуба,

- ♦ погрешности формы и наклона профиля зуба,
- ♦ погрешности направления зуба (полную, угловую, профильную),
- ♦ радиальное биение (зубчатого венца),
- ♦ накопленную погрешность шага (по зубчатому колесу),
- ♦ отклонение окружного шага,
- ♦ разность соседних шагов,
- ♦ диаметр впадин,
- ♦ размер через зуб/через ролики.

Полученные результаты выводятся на экран или принтер в виде отчетов, содержащих диаграммы отклонений измеренных параметров. Однако следует отметить, что нет сведений об аттестации ПО прибора DO-3PC в соответствии с российскими стандартами.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ КИМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ЗАО «ЧЕЛЯБИИКОНТРОЛЬ»

В первой части статьи было отмечено, что основная часть советских и российских зубоизмерительных станковых приборов «традиционной» конструкции выпускалась челябинскими инструментальщиками. Принимая во внимание этот факт, а также ряд следующих факторов:

1. Рынок «относительно дешевых» универсальных КИМ средней точности занят зарубежными производителями.
2. Рост потребности российских машиностроителей в качественных измерительных системах для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями: зубчатых колес, резьбовых калибров, червячных фрез, железнодорожных шаблонов и т. д.
3. Наличие собственных кадровых и производственных возможностей ЗАО «ЧелябНИИконтроль», — было принято решение сосредоточить усилия на разработке новой серии многофункциональных измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназна-

ченных для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями (по сути — специализированных КИМ) и разработан перспективный план НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль».

План научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ ЗАО «ЧелябНИИконтроль» включает в себя:

1. Разработку модульной многофункциональной координатно-измерительной системы и вариантов исполнений на её основе.

1.1. Разработку ручной двухкоординатной системы измерения для контроля резьбовых и гладких калибров (Прибор 481KM2) — 2005-2006 гг.

1.2. Разработку вариантов модульной многофункциональной координатной измерительной системы (ручной и с ЧПУ) для контроля калибров, эвольвентных поверхностей, валов (НИИК 482, НИИК 483, НИИК 484) — 2006-2008 гг.

1.3. Разработку комплексных систем автоматизированного контроля и управления для станков с ЧПУ (токарных, сверлильно-фрезерно-расточных, шлифовальных) — 2005-2008 гг.

2. Разработку модуля для бесконтактных оптических измерений на базе системы технического зрения — 2006-2008 гг.

3. Разработку базового специализированного программного обеспечения «ТехноКоорд» и дополнительных модулей для контроля типовых деталей и поверхностей — 2003-2008 гг.

4. Разработку новых стандартов, технических условий и методик выполнения измерений, утверждение их в органах Ростехрегулирования и метрологии.

5. Проведение государственных приёмочных испытаний, утверждение типа разработанных средств измерения.

6. Разработка учебно-методического обеспечения для подготовки и переподготовки квалифицированных специалистов в области координатной метрологии, в т.ч. учебных КИМ в настольном исполнении.

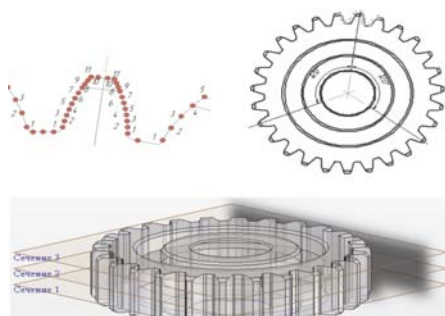


Рис. 3. Варианты стратегии координатных измерений в ПО «ТехноКоорд-Эвольвента»

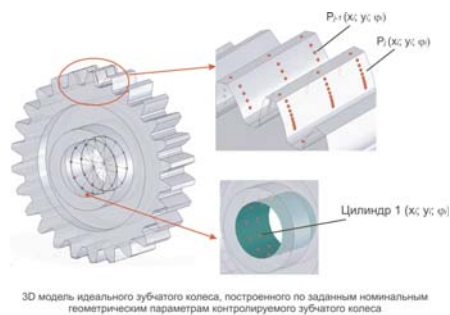


Рис. 4. Генерация наборов данных для аттестации ПО контроля зубчатых колес

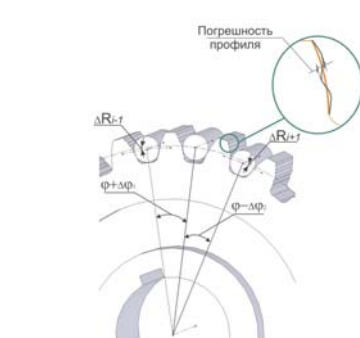




Рис. 5. Специализированная КИМ GearSpect DO-3PC



Рис. 6. Измерения на КИМ GearSpect DO-3PC

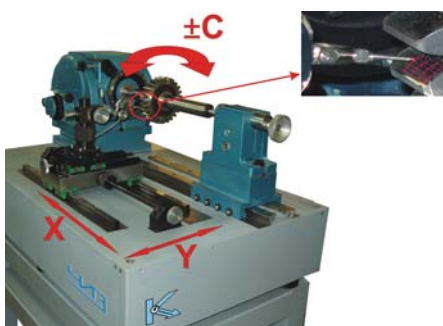


Рис. 7. Специализированная КИМ с горизонтальной осью НИИК484

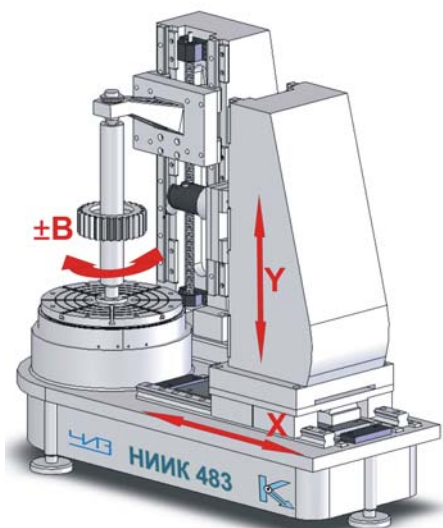


Рис. 8. Специализированная КИМ с ЧПУ НИИК 483



Рис. 9. Система технологического контроля при обработке зубчатого колеса на станке с ЧПУ

Поскольку государственного финансирования этих исследований не предусмотрено, работы ведутся за счет собственных средств ЗАО «ЧелябНИИконтроль» и заказов потребителей. В зависимости от реалий рынка и интересов потенциальных покупателей меняются приоритеты и, соответственно, корректируются сроки выполнения различных пунктов вышеприведенного плана.

При проектировании компоновок модульной многофункциональной координатно-измерительной системы и вариантов ее исполнений использовался модульный принцип. В зависимости от функциональных назначений в конструкцию приборов входят модули крепления (основание, гусак, измерительные каретки, центры и т.д.), модули перемещения (поворотный стол, делительная головка, вертикальные (горизонтальные) каретки, направляющие, двигатели), модули координатных измерений (поворотная головка, цифровые измерительные головки, цифровая камера, преобразователи линейных перемещений, угловой энкодер и т.д.).

Для проведения предварительного анализа кинематики прибора, особенности закрепления различных конструкций и типоразмеров зубчатых колес проведено компьютерное моделирование вариантов структур и компоновок измерительных систем. Для этого использовались принципы сквозного компьютерного проектирования (CAD/CAM/CAE/CALS технологии), выполнялся ретрофитинг существующих конструкций приборов, функциональных модулей и узлов, осуществлялась замена механических модулей мехатронными.

В октябре 2007 г. был изготовлен опытный экземпляр трехкоординатной многофункциональной измерительной системы НИИК-484 (рис. 7). Прибор предназначен для контроля параметров зубчатых колес, червячных фрез, долбяков. Управление прибором и перемещение узлов осуществляет оператор, съем изме-

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

На настоящий момент закончены проектные работы, идет изготовление узлов и деталей новой трехкоординатной измерительной системы с компьютерным управлением НИИК-483 (рис. 8). В этом приборе за счет использования приводов Siemens, энкодеров и ИГ Renishaw, электронных компонентов и ПО «ТехноКоорд» с дополнительными модулями полностью автоматизирован цикл измерения насадных и валковых зубчатых колес, резьбовых калибров и других высокоточных деталей со сложнопрофильными поверхностями. Сборку, отладку и госиспытания прибора НИИК-483 предполагается завершить в июне 2008 г.

Среди тенденций последнего времени, на которые стоит обратить внимание, отметим также, что с целью выполнения технологического контроля производители зубообрабатывающих станков стали устанавливать в рабочую зону датчики для контактных измерений обрабатываемых зубчатых колес (рис. 9). Используя циклы координатных измерений, встраиваемых в УП обработки, технологи и наладчики получили благодаря этому возможность корректировать процесс обработки в зависимости от фактического состояния заготовки, т.е. неточностей установки и распределения припуска. 

От авторов: В предложенном читателям цикле из трех статей в №№4-6/2007 г. были кратко изложены современные тенденции в развитии методик контроля зубчатых колес. В упомянутом в настоящей статье плане НИИ-ОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль» предусмотрены исследования и разработки и в других областях координатной метрологии. При наличии интереса со стороны читателей специалисты нашего предприятия могли бы продолжить цикл статей по проблемам метрологического обеспечения современного производства и в 2008 г.