

4. **Мастеренко Д. А.** Статистическое оценивание измеряемых величин по сильно дискретизованным наблюдениям при неизвестном параметре масштаба случайной составляющей // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 40—42; **Masterenko D. A.** Statistical estimation of measured quantities from strongly discretized observations with unknown scale parameter of the random component // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 6. P. 654—658.

5. **Мастеренко Д. А.** Выбор наилучшей оценки измеряемой величины по сильно дискретизованным наблюдениям // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 17—20; **Masterenko D. A.** Choice Of Best Estimate For The Measured Value From Strongly Discretized Observations // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. P. 764—768.

6. **Мастеренко Д. А.** Статистическое оценивание результатов наблюдений с учетом их дискретизации по уровню // Измерительная техника. 2008. № 7. С. 11—15; **Masterenko D. A.** Statistical evaluation of observations with level quantization // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 7. P. 711—717.

7. **Григорьев С. Н., Телешевский В. И.** Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7; **Grigoriev S. N., Teleshevskii V. I.** Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. P. 744—749.

8. **Григорьев и др.** Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29; **Grigoriev S. N. et al.** The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 526—529.

9. **Максин Ю. А., Телешевский В. И., Темников П. В.** Система автоматизированного проектирования и изготовления средств линейно-угловых измерений на основе трехмерного параметрического моделирования // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 13—16; **Maksin Y. A., Teleshevskii V. I., Temnikov P. V.** System for computer aided design and fabrication of means of linear-angular measurement based on three-dimensional parametric modelling // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 869—873.

10. **Григорьев С. Н. и др.** Опыт МГТУ «СТАНКИН» в разработке координатно-измерительных машин субмикронной точности // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 25—30.

11. **Емельянов П. Н., Педь С. Е., Холин И. Е.** Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 68—73.

Дата принятия 28.08.2013 г.

681.2

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*****

* Государственный инженеринговый центр МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия
e-mail: seped@mail.ru

** ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия

*** ЗАО «ЧелябНИИКонтроль», Челябинск, Россия

Представлены результаты работы по проектированию модельного ряда аппаратно-программных комплексов для автоматизированных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов. Приведены технические характеристики, конструктивные решения, особенности программно-математического обеспечения.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, зубообрабатывающий инструмент, субмикрометровая точность, специальное программно-математическое обеспечение.

The results of desing of the family of hardware-software complexes for automated measurement of gear treating instrument are presented. The technical specifications, desing solutions and software details are presented.

Key words: hardware-software complexes, gear treating instrument, submicrometer accuracy, special software.

Ужесточение требований к деталям с зубчатыми венцами существенно изменило технологию обработки и точность изготовления зубчатых колес. Это привело к улучшению эксплуатационных характеристик зубообрабатывающих инструментов, к которым относятся червячные фрезы для нареза-

ния зубчатых колес внешнего зацепления, долбяки для нарезания колес внутреннего зацепления, дисковые зубофрезерные головки для нарезания конических колес. Эти характеристики должны быть обеспечены современными методами, средствами измерений (СИ) и контроля [1—4].

Анализ тенденций развития машиностроительного комплекса показал, что в настоящее время наиболее эффективными средствами измерений и контроля являются координатные измерительные машины (КИМ), приборы и системы различных компоновок и типоразмеров, построенные на координатном методе измерения [5—8]. Этот метод является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов, в том числе со сложнопрофильными поверхностями такими, как у зубчатых колес, червячных фрез, долбяков и др.

Выполнение координатных измерений подразумевает две взаимосвязанные технические части [6, 7], образующие вместе единый аппаратно-программный комплекс (АПК).

Аппаратная часть — это комплекс оборудования на основе мехатронных модулей, измерительных устройств, калибровочной и вспомогательной оснастки, который обеспечивает получение массивов значений координат отдельных точек, принадлежащих контролируемым поверхностям детали.

Программная часть — это комплекс математических моделей, алгоритмов и программ для управления измерительным оборудованием, анализа измеренных данных и расчета заданных линейно-угловых параметров. Кроме того, сюда входит специализированное метрологическое программное обеспечение для проведения калибровочных работ и ввода компенсаций на систематические погрешности аппаратной части для повышения точности измерений.

Авторами выполнены работы по разработке модельного ряда АПК для автоматизированного измерения зубообрабатывающего инструмента. В данной статье приведены основные результаты этих работ.

Цель разработки — создание универсальных контрольно-измерительных средств для метрологического обеспечения изготовления зубообрабатывающего инструмента, предназначенных для замещения аналогичных зарубежных образцов и ликвидации критической импортной зависимости в

области СИ, отнесенных к технологиям двойного назначения. Внедрение данной разработки позволит оснастить отечественные машиностроительные предприятия и предприятия оборонно-промышленного комплекса универсальными метрологическими средствами для автоматизированного измерения параметров зубообрабатывающих инструментов [1, 2].

Модельный ряд контрольно-измерительных средств для автоматизированного измерения параметров зубообрабатывающих инструментов включает три взаимосвязанных АПК: БВ-5139 — комплекс для автоматизированного измерения червячных фрез; БВ-5140 — комплекс для автоматизированного измерения долбяков; БВ-5141 — комплекс для автоматизированного измерения дисковых зуборезных головок. Основные технические характеристики указанных АПК представлены в табл. 1.

В зависимости от модели АПК позволяют проводить измерения следующих параметров точности:

БВ-5139 — радиальное биение по вершинам зубьев; разность соседних окружных шагов; накопленная погрешность окружного шага стружечных канавок; направление стружечных канавок; толщина зуба; накопленное отклонение шага на длине любых трех шагов; винтовые линии фрезы от зуба к зубу на одном и на трех оборотах; погрешность зацепления от зуба к зубу и погрешность зацепления.

БВ-5140 — погрешность профиля немодифицированного участка не на режущей кромке; разность соседних окружных шагов и накопленная погрешность окружного шага.

БВ-5141 — отклонение профиля рабочей стороны резца, радиальное биение по вершинам резцов, биение резцов посередине режущих кромок относительно опорного торца корпуса.

Принципы построения и конструктивные решения являются общими для всего модельного ряда АПК. В работе подробно рассмотрен комплекс БВ-5139.

Анализ научно-технической информации и изучение опыта применения КИМ на передовых российских и зарубежных

Таблица 1

Технические характеристики аппаратно-программных комплексов

Технические характеристики	Модель АПК		
	БВ-5139	БВ-5140	БВ-5141*
Модуль измеряемого инструмента, мм	1—10		
Диаметр измеряемого инструмента, мм	40—250	40—400	150, 278, 450
Длина оправок или валов, мм	100—600	100—400	21, 45, 47**
Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	0,1—6		
Шаг измерения, мкм	1		
Основная погрешность измерения для модулей (m), мкм, не более	Группа точности 2 по [8]	при измерении профиля немодифицированного участка ± 2 $1 < m \leq 2$ мм ± 3 $2 < m \leq 10$ мм при измерении окружного шага ± 3 $1 < m \leq 2$ мм ± 4 $2 < m \leq 10$ мм	$\pm 4^{***}$

* — для зуборезных головок задается профиль рабочей стороны резца 0—5°; ** — ширина зуборезной головки; *** — для всех измеряемых параметров.

предприятиях показали, что для контроля прецизионных осесимметричных деталей и инструментов (особенно со сложнопрофильными поверхностями) применяют специализированные четырехкоординатные измерительные системы и машины. Поэтому при проектировании конструкции механической части комплекса БВ-5139 была выбрана компоновка с вертикальной осью вращения контролируемой детали.

Точное угловое позиционирование и круговое перемещение осуществляется на прецизионном измерительном столе с кольцевой шкалой Renishaw RESM, установленном на литой базовой станине. Для фиксации угловых перемещений стола на станине под углом 180° установлены две считывающие головки Renishaw Sr.

Линейные перемещения измерительной головки в рабочем пространстве выполняет смонтированный на станине комплект из трех взаимно перпендикулярных узлов координатных перемещений (УКП), каждый из которых обеспечивает движение вдоль одной из осей прямоугольной системы координат (линейные координаты X , Y , Z). Диапазоны перемещений составляют $0\text{--}300$ мм по координатам X , Z и ± 200 мм по координате Y от среднего положения.

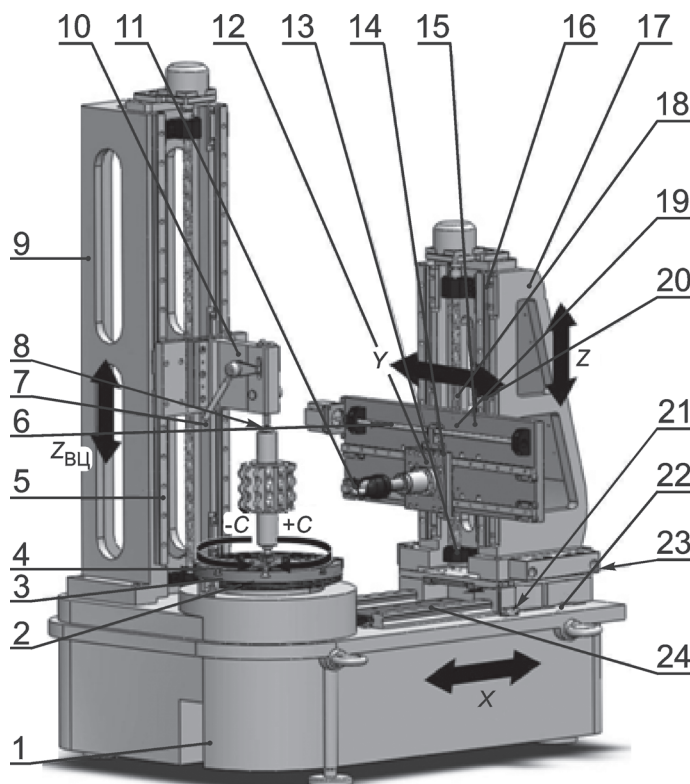
Для фиксации координат X , Y , Z используют линейные энкодеры. Металлические линейки энкодеров с нанесенной шкалой монтируют на подготовленных поверхностях неподвижных (при движении по соответствующей линейной координате) деталей УКП. Считывающие головки закрепляются на соответствующих подвижных элементах этих узлов.

Вращение (координата C) стола и перемещение по координатам Y , Z осуществляют серводвигателями SIEMENS, а перемещение по координате X — линейным двигателем установочные перемещения верхнего центра ($Z_{ВЦ}$) — вручную.

Такая конструкция отличается высокой жесткостью, удобна для установки исследуемых деталей на позицию измерения и контроля всех требуемых параметров зубоизмерительного инструмента. Комбинация прямоугольной (декартовой) и цилиндрической систем координат обеспечивает уменьшение длины траекторий линейных трехкоординатных перемещений в циклах измерений, что гарантирует рост производительности и снижение влияния геометрических погрешностей КИМ на суммарную точность. Компоновка основных частей комплекса БВ-5139 и направления координатных перемещений представлены на рисунке.

Перемещение исполнительных органов АПК, фиксацию координат измеряемых точек осуществляет управляющая вычислительная система (УВС). В состав УВС входит персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением (ПО) верхнего уровня (операционная система, комплект универсальных офисных и сервисных приложений, специализированное ПО «Зуборез»). Компьютер связан через сетевой интерфейс со специализированным контроллером SIMOTION D425 (SIEMENS) с ПО SIMOTION (низший уровень управления).

Сервоконтроллер каждой координаты работает в режиме управления скоростью соответствующего сервомотора с обратной связью по цифровым квадратурным сигналам соответствующего линейного или углового энкодера. В зависимости от вида траектории перемещения (линейная, круговая, спиральная, по сплайну и др.) для каждой управляемой координаты контроллер формирует сигнал задания скорости перемещения и обеспечивает замыкание обратной связи по положению, используя те же (буферизированные) сигналы энкодера.



Компоновка основных частей комплекса БВ-5139 с указанием направлений координатных перемещений:

1 — станина; 2 — кольцевая шкала Renishaw RESM; 3 — считывающие головки Renishaw Sr; 4 — поворотный стол; 5, 16, 24 — комплекты рельсовых направляющих и кареток с шариковыми элементами INA; 6, 7, 18 — шарико-винтовые передачи; 8 — измеряемая червячная фреза; 9, 17 — вертикальные колонны; 10 — верхний поджимной центр; 11 — измерительная головка; 12 — измерительная каретка; 13, 20, 21 — считывающие головки энкодеров; 14, 19, 22 — металлические линейки энкодеров; 15 — каретка; 23 — линейный двигатель координаты X

Аппаратная и программная части УВС обеспечивают два режима контактных измерений массива координат точек на контролируемой детали.

Режим *поточечных измерений* выполняется при помощи триггерной измерительной головки (ИГ) TP20 (Renishaw), оснащенной набором сменных измерительных наконечников (ИН) разных типоразмеров и конструкций (в том числе Г-образных, сборных типа «звездочка» и др.). В зависимости от выбранной методики измерений в ручном (от пульта управления) или автоматическом (по управляющей программе) режиме выполняется последовательность единичных измерительных циклов. Для уменьшения погрешности в каждом цикле измерений движение запрограммировано по нормали к контролируемой поверхности. При касании сферическим элементом ИН измеряемой поверхности происходит размыкание электронных контактов (срабатывание) внутри механизма ИГ, сигнал через интерфейс передается в специализированный контроллер SIMOTION D425, где считываются и фиксируются показания энкодеров для всех четырех осей. Информация передается в ПК УВС, и при помощи ПО «Зуборез» формируется массив со значениями координат измеренной последовательности точек.

Режим сканирования выполняется при помощи взаимозаменяемых (в ручном режиме) с TP20 (Renishaw) двух однокоординатных измерительных головок отклонения (ИГО): Sylvac S233 (прямое отклонение ИН вдоль оси ИГО) и Микро-25 (боковое отклонение ИН). Каждая ИГО оснащена набором сменных контактных элементов ИН разных типов-размеров и конструкций («сфера», «сапжжок», «игла», «кнопка с плоскостью» и др.). При сканировании контактный элемент ИН соприкасается с контролируемой поверхностью с необходимым натягом, который обеспечивает постоянство контакта ИН и поверхности детали с заданным измерительным усилием в процессе сканирования. В зависимости от выбранной методики сканирования в ручном (для простейших траекторий от пульта управления) или автоматическом режиме выполняется последовательность типовых и специальных циклов. Для уменьшения погрешности траектория движения в каждом цикле сканирования запрограммирована так, чтобы отклонение ИН происходило по нормали к контролируемой поверхности. Управление траекторией перемещения исполнительных органов комплекса в цикле сканирования обеспечивает SIMOTION D425. Фиксацию координат измеряемых точек осуществляет электронный блок ЧелЗИС-715, в котором с заданной дискретностью синхронно считываются и записываются показания энкодеров для всех четырех осей (X, Y, Z, C) и значения отклонений ИГО. Информация передается в ПК УВС, где проводится корректировка показаний энкодеров с учетом фактического положения ИН относительно траектории перемещения референтной точки ИГО и формируется массив со значениями координат измеренной последовательности точек.

Основные метрологические характеристики используемых измерительных устройств (энкодеров, ИГ, ИГО) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные метрологические характеристики измерительных устройств

Характеристика	Значение
Измерительная головка TP20 (Renishaw)	
Направление измерений, кроме мод. 6W	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Направление измерений, мод. 6W	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
Однонаправленная повторяемость разных моделей, 2σ, мкм: SF/EM1/EM2 MF EF 6W	$\pm 0,35$ $\pm 0,5$ $\pm 0,65$ $\pm 0,80$
Повторяемость при смене щупа, мкм: автоматический режим ручной режим	$\pm 0,50$ ± 1
Угловой энкодер RESM 300 (Renishaw)	
Количество штрихов	47200
Предел допускаемой погрешности, "	$\pm 0,74$
Повторяемость, "	$\pm 0,02$

Окончание таблицы 2

Характеристика	Значение
Линейные энкодеры RGH24 (Renishaw)	
Диапазон, мм	0—200 (0—1000)
Дискретность, мкм	0,1 (0,5)
Предел допускаемой погрешности, мкм L — измеряемая длина, м	$0,3 + 5L(0,5 + 5L)$
Измерительные головки отклонения Микро M-025	
Диапазон измерений, мкм	± 300 (150)
Предел допускаемой погрешности, мкм	$\pm 1,0$ (0,5)
Вариация показаний, не более, мкм	$\pm 1,0$ (0,3)
Измерительная головка отклонения Sylvac S233	
Диапазон измерения, мм	0—12,5
Разрешение, мкм	1,0
Предел допускаемой погрешности, мкм	± 5
Повторяемость, мкм	± 2

Одной из главных задач при проектировании модельного ряда АПК для автоматизированных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов была разработка специализированного ПО «Зуборез», предназначенного для:

выбора типовых стратегий и разработки управляющей программы координатных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов;

управления циклом измерений координат заданного числа точек, принадлежащих контролируемым поверхностям зубообрабатывающих инструментов;

математической обработки результатов измерений и расчетов заданных линейно-угловых параметров зубообрабатывающих инструментов;

проведения статистических расчетов, оформления протоколов, хранения и поиска метрологической информации;

проведения типовых процедур метрологического обслуживания комплексов: калибровки ИГ и ИН, поверки и калибровки комплексов и т. д.

Специализированное ПО «Зуборез» имеет интуитивно понятный, удобный пользовательский интерфейс и функцию автопрограммирования. Оператор вводит минимальную информацию об измеряемом инструменте и особенностях измерений контролируемых параметров в специальные экраны формы, а остальные необходимые параметры для генерации программы измерений вычисляются автоматически.

Рассмотрим работу ПО на примере программного модуля для измерений параметров долбяков для нарезания колес внутреннего зацепления «Зуборез—Д». Для создания программы автоматизированного измерения контролируемых параметров долбяка в форму «Характеристики заготовки» вводятся следующие исходные данные: нормальный модуль, число зубьев, угол наклона линии зуба, направление линии зуба (левый или правый наклон линии зуба), исходный контур (по стандарту [9] или нестандартный), ширина зубчатого венца, вал-шестерня. Для долбяка с нестандарт-

ными характеристиками осевого контура отображаются дополнительные параметры: угол профиля, коэффициенты высоты и высоты модификации головки, коэффициент радиального зазора.

После ввода исходных данных формируется набор контролируемых параметров расстановкой соответствующих флажков в форму «Контролируемые параметры». Генерация и запуск программы автоматизированных измерений осуществляется нажатием кнопки «Измерить» в этой же форме.

Для облегчения работы оператора (при замене ИГ, проведении измерений в ручном режиме и т. п.) на экран монитора выводится форма с инструкциями по выполнению той или иной операции.

После завершения программы на экране отображается протокол с результатами измерений, который можно вывести на печать или/и сохранить в виде файла на жестком диске ПК.

Помимо программы автоматизированных измерений параметров долбяка модуль «Зуборез-Д» имеет функцию калибровки ИГ при помощи «Мастера калибровки» ИГ с использованием калибровочной сферы. Запустив «Мастер калибровки» и следуя его указаниям, оператор выполняет следующие действия: задает диаметр калибровочной сферы, измеряет вручную пять контрольных точек. После этого запускается процесс автоматической калибровки и по окончании выводится результат.

Проведенные испытания опытных образцов аппаратно-программных комплексов для автоматизированных измерений параметров зубообрабатывающих инструментов показали, что они имеют высокие метрологические характеристики и отвечают заявленным целям разработки. Внедрение таких аппаратно-программных комплексов в машиностроительное производство позволит существенно повысить качество зубообрабатывающего инструмента, а следовательно, и качество обработки зубчатых колес.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» (государственный контракт № 11411.1003704.05.027 от 05.10.2011 г. «Создание аппаратно-программных комплексов для автоматизированного измерения зубообрабатывающего инструмента»).

Л и т е р а т у р а

1. Григорьев С. Н. и др. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59; Grigoriev S. N. e. a. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 11. P. 1311—1315.

2. Григорьев С. Н. и др. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29; Grigoriev S. N. e. a. The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 526—529.

3. Максин Ю. А., Телешевский В. И., Темников П. В. Система автоматизированного проектирования и изготовления средств линейно-угловых измерений на основе трехмерного параметрического моделирования // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 13—16; Maksin Y. A., Teleshevskii V. I., Temnikov P. V. System for computer aided design and fabrication of means of linear-angular measurement based on three-dimensional parametric modeling // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 869—873.

4. Педь С. Е., Дариенко Е. В. Оценка погрешностей координатных измерений параметров сечений цилиндрических поверхностей // Там же. С. 17—19; Ped S. E., Darienko E. V. Error estimates in coordinate measurements of the cross section parameters of cylindrical surfaces // Ibid. P. 874—878.

5. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Метод интеллектуальной компьютерной микроскопии при измерении линейных и угловых размеров изделий // Там же. С. 3—6; Teleshevskii V. I., Shulepov A. V., Rozdina E. M. Smart computer microscopy for measurement of linear and angular dimensions of work pieces // Ibid. P. 853—858.

6. Емельянов П. Н., Педь С. Е., Холин И. Е. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 68—73.

7. Конов С. Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 2. С. 119—121.

8. ГОСТ 17336—80. Приборы для измерения червячных фрез. Типы и основные параметры. Общие технические требования.

9. ГОСТ 13755—81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур.

Дата принятия 27.08.2013 г.