

9. Григорьев С. Н. 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.

10. Телешевский В. И., Соколов В. А. Лазерная измерительная информационная система для повышения точности многокоординатных станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4. С. 8—10.

11. Гришин С. Г. Оценка фазовой погрешности в гетеродинных лазерных интерференционных измерительных системах // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 11—13; Grishin S. G. Estimating phase errors in heterodyne laser interferometer measurement systems // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 865—868.

12. Максин Ю. А., Телешевский В. И., Темников П. В. Система автоматизированного проектирования и изготовления средств линейно-угловых измерений на основе трехмерного параметрического моделирования // Там же. 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 // Ibid. P. 869—873.

13. Телешевский В. И., Емельянов П. Н., Шишков Д. Н. Принципы построения компьютеризированной системы метрологического обеспечения производства на базе ИПИ-технологий // Приборы. 2011. № 5. С. 57—62.

14. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин. Фирма Renishaw [Официальный сайт]. <http://renishaw.com> (дата обращения 01.08.2013 г.).

15. Системы для проверки точности и калибровки станков и координатно-измерительных машин. Фирма API [Официальный сайт]. <http://apisensor.com> (дата обращения 01.08.2013 г.).

16. Lau K., Hocken R., Haight W. Automatic Laser Tracking Interferometer System for Robot Metrology // J. Precision Eng. 1986. V. 8. N 1. P. 3—8.

17. ГОСТ 27843—2006. Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением.

18. Разработка CAD/CAM продуктов для моделирования, изготовления и контроля сложных изделий и технологической оснастки. Фирма «Delcam». [Официальный сайт]. <http://delcam.ru> (дата обращения 01.08.2013 г.).

Дата принятия 27.08.2013 г.

681.2.08

## Разработка модельного ряда координатно-измерительных машин

Д. А. МАСТЕРЕНКО\*, П. Н. ЕМЕЛЬЯНОВ\*,  
М. Г. КОВАЛЬСКИЙ\*\*, А. Ю. БАЙКОВСКИЙ\*\*, С. Ю. АЛАБИН\*\*

\* Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия,  
e-mail: [pemelyan@rambler.ru](mailto:pemelyan@rambler.ru)

\*\* ОАО «НИИИзмерения», Москва, Россия

Описан опыт проектирования серии современных координатно-измерительных машин, в том числе и с субмикрометровой точностью. Приведены их технические характеристики, конструктивные решения, особенности программно-математического обеспечения.

**Ключевые слова:** координатно-измерительная машина, субмикрометровая точность, компенсация погрешностей, язык программирования измерений.

The experience in design of the series of modern domestic plate-measuring engines including those with submicrometer accuracy is described. The technical characteristics, design solutions and the software peculiarities are considered.

**Key words:** plate-measuring engine, submicrometer accuracy, error compensation, measurements programming language.

Использование координатно-измерительных машин (КИМ) актуально благодаря их широкой универсальности по набору контролируемых геометрических параметров, высокому уровню автоматизации и экономии времени при измерениях параметров сложных деталей [1—9]. Использование принципов оперативного и диалогового программирования измерительных процедур делает эффективным применение КИМ в качестве универсального средства контроля в единичном и мелкосерийном производствах.

В период с 2011 по 2013 гг. авторами выполнены работы по проектированию КИМ субмикрометровой точности

(КИМСТ), а также технологической подготовке серийного производства гаммы универсальных КИМ с высокой степенью автоматизации. Универсальные КИМ и КИМСТ предназначены для метрологического обеспечения процессов механической обработки прецизионных деталей сложной формы: измерения, контроля размеров, формы и расположения поверхностей деталей; аттестации установочных или настроечных мер в условиях государственных метрологических центров, а также метрологических лабораторий на предприятиях оборонного комплекса, машиностроительной, подшипниковой, авиационной и электронной промышленности [10—11].

В настоящее время универсальные КИМ в России производит только фирма ООО «Лапик», являющаяся разработчиком и изготовителем серии КИМ оригинальной конструкции на основе шестиосевого механизма с параллельной кинематикой. Данная компоновка характеризуется высокой жесткостью, возможностью измерений труднодоступных поверхностей, однако доступ к рабочему пространству и его обзорность весьма ограничены. Поэтому авторы-разработчики КИМСТ и КИМ не имели отечественных аналогов и опирались на опыт ОАО «НИИИзмерения» в области создания многокоординатного измерительного оборудования для измерений геометрических параметров деталей сложной формы (зубчатых колес, червячных фрез и др.). Ближайшие зарубежные аналоги: для КИМСТ — машина модели F25 (Carl Zeiss Industrial Metrology GmbH, Германия), для ряда универсальных КИМ — машины моделей O-Inspect, Accura 5 (того же производителя), Leitz Micra 5.4.3, Leitz Reference Xi 10.7.6, DEA GLOBAL Silver Performance (Hexagon Metrology, США), Strato Apex 776 (Mitutoyo Corp., Япония).

Основные технические характеристики разработанных КИМ приведены в таблице.

Базовая часть КИМСТ имеет основание, выполненное из твердых пород камня, с перемещающимся относительно него на аэростатических направляющих предметным столом (по координате  $Y$ ) и порталом (по координате  $X$ ), несущим передвигающуюся относительно него (по координате  $Z$ ) на аэростатических направляющих пиноль с закрепленной на ее нижнем конце измерительной головкой. В отличие от традиционной портальной компоновки перенос координатной оси  $Y$  с траверсы портала на стол позволил уменьшить его силовые деформации благодаря жесткой арочной конструкции и постоянства приложения в центре арки вертикальной нагрузки от веса узла пиниoli.

Базовая часть универсальных КИМ (см. рисунок) имеет стационарную классическую портальную компоновку, обеспечивающую удобство монтажа (демонтажа), эксплуатации, обслуживания, ремонта, и содержит следующие основные

узлы: основание 2, установленное на пассивных виброопорах 1 и поддерживающее плиту 3, служащую также предметным столом; каретку 10, несущую гранитную горизонтальную направляющую 8 и перемещающуюся (по координате  $Y$ ) относительно плиты по закрепленной на ней гранитной направляющей 11; стойку 4, являющуюся второй опорой для горизонтальной направляющей и перемещающуюся вместе с ней по выполненной в плите направляющей; узел перемещений 7 по координате  $X$  вдоль горизонтальной направляющей; пиноль 9, перемещающуюся по координате  $Z$  в узле 7 с закрепленной на ее нижнем конце моторизованной измерительной головкой 6, оснащенной датчиком касания 5; пневмоблок 12, закрепленный на плите.

Портальная компоновка, имея достаточную жесткость основных узлов, обеспечивает высокие точностные и динамические свойства КИМ. Также она при открытом пространстве для установки детали и ее обзорности в процессе измерений является удобной для развития отдельной КИМ в конструктивно унифицированный типоразмерный ряд, осуществляющий измерения в широком диапазоне.

Координатные прямолинейные перемещения элементов базовой части по их направляющим осуществляют на аэростатических пористых опорах, имеющих улучшенные технические характеристики по сравнению с аэростатическими опорами, у которых сжатый воздух подается в рабочий зазор через сопла и микроканалки.

Силовое замыкание, т. е. создание предварительной нагрузки, обеспечивающей рабочий зазор 5—7 мкм между направляющей и каждой из аэростатических опор, не воспринимающих вес подвижной части КИМ, выполняется только при помощи расположенной напротив нее контр-опоры, а также при помощи контр-опоры и силы собственного веса соответствующего подвижного элемента базовой части, если опора этот вес воспринимает. При этом контр-опоры, развивающие одинаковое усилие с базовыми опорами, имеют существенно (в 30—50 раз) меньшую жесткость из-за податливости узла крепления; благодаря этому дости-

Основные технические характеристики КИМСТ и универсальных КИМ

Наименование характеристики	КИМСТ	Универсальные КИМ		
Пределы измерений по координатным осям $X$ , $Y$ , $Z$ , мм	400, 400, 200	400, 400, 300	600, 600, 500	600, 1000, 500
Шаг дискретности измерений координатных перемещений, мкм, не более	0,01	0,1	0,1	
Основная погрешность измерений координатных перемещений, мкм, не более ( $L$ — длина перемещения, мм)	$0,05 + L/1000$	$0,2 + L/800$	$0,4 + L/1000$	
Основная погрешность измерений длины, мкм, не более: вдоль координатных осей в пространстве	$0,25 + L/1000$ —	$1,2 + L/800$ $1,4 + L/600$	$1,4 + L/800$ $1,6 + L/600$	
Основная погрешность измерительной головки, мкм, не более	0,2	0,5	0,5	
Максимальная скорость координатных перемещений, мм/с, не менее	20	200	200	
Максимальное ускорение координатных перемещений, мм/с <sup>2</sup> , не менее	200	1000	1000	
Максимальная масса измеряемой детали, кг, не более	8	100	350	500

гается статическая определимость системы опоры-направляющая.

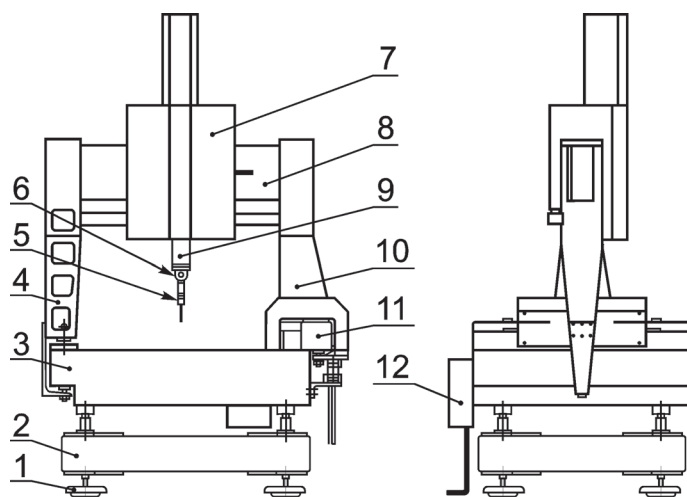
Выбранная схема при минимальных требованиях к взаимному расположению и форме поверхностей направляющих (из двух поверхностей, расположенных противоположно, только одна является базовой) обеспечивает удобство регулировки (юстировки) взаимной ортогональности траекторий координатных перемещений подвижных частей КИМ. Все аэростатические опоры КИМ имеют возможность самоориентации, что дает постоянство значений их рабочих зазоров.

Координатные перемещения элементов базовой части осуществляются прямыми приводами на основе линейных синхронных электродвигателей с безжелезным якорем и встроенной системой охлаждения. Данные двигатели имеют высокие удельную мощность и динамические характеристики, также в них отсутствуют промежуточные элементы передачи к рабочему органу, которые обычно обладают потерями на трение, инерционностью, подвержены упругим и температурным деформациям, износу, требуют обслуживания.

Линейный электродвигатель каждой координатной оси КИМ состоит из безжелезного якоря с трехфазной обмоткой, что обеспечивает отсутствие так называемого зубцового эффекта и паразитных, несовпадающих с направлением тяги мотора, механических усилий; П-образного статора с постоянными магнитами; датчика Холла для первоначальной инициализации и последующей коррекции электрических фаз подаваемого на мотор напряжения. Основными преимуществами бесщеточных линейных сервомоторов прямого привода являются практически неограниченный срок службы (ввиду отсутствия коллекторного узла и механической передачи), высокая плавность перемещений (обусловлена высокой точностью реализации современными сервоконтроллерами синусоидального закона коммутации) и отсутствие механических вибраций, так как нет вращающихся масс.

Прецизионная линейная энкодерная система SiGNUM RELM (Renishaw, Великобритания) каждой координатной оси КИМ состоит из работающей в отраженном свете инваровой оптической шкалы (RELM IN 20U 1A 0430 — оси X, Y; RELM IN 20U 1A 0330 — ось Z) с шагом раstra 20 мкм, считывающей головки (TONIC T1011), которая образует на выходе аналоговые дифференциальные sin/cos-сигналы с пространственным периодом 20 мкм, а также импульсный сигнал нулевой метки и интерполятора (Ti 200 A 12A, 12 MHz), формирующего цифровые дифференциальные квадратурные сигналы с пространственным периодом 0,4 мкм. Таким образом, после учетверения счетных импульсов в сервоконтроллере и КИМ-контроллере обеспечивается итоговая дискретность отсчета координатных перемещений, равная 0,1 мкм, с некомпенсируемой (случайной) погрешностью не более 0,04 мкм и предельной накопленной (систематической) погрешностью не более 1 мкм/м, которая компенсируется калибровкой шкал по образцовому интерферометру или аттестату шкалы. Благодаря быстроедействию энкодеров, сервоконтроллера и КИМ-контроллера скорость координатных перемещений составляет до 900 мм/с.

Сервоконтроллер Xenus XTL (Copley Controls Corp., США) каждой координатной оси КИМ работает в режиме управления скоростью соответствующего линейного мотора (обратная связь осуществляется по цифровым сигналам линейно-



Основные элементы конструкции базовой части универсальных КИМ:

- 1 — виброопоры; 2 — основание; 3 — плита; 4 — стойка; 5 — датчик касания; 6 — измерительная головка; 7 — узел перемещений; 8, 11 — направляющие; 9 — пиноль; 10 — каретка; 12 — пневмоблок

го энкодера), получает аналоговый сигнал для задания скорости от КИМ-контроллера, который замыкает обратную связь по положению по тем же (буферизированным в сервоконтроллере) сигналам линейного энкодера.

Помимо линейных энкодеров в состав измерительной системы КИМ входит моторизованная измерительная головка RH10MQ, оснащенная датчиком касания TP7M и двумя дополнительными приводами вращения, управляемыми КИМ-контроллером и служащими для изменения ориентации датчика касания относительно объекта измерения. Это повышает гибкость измерений и сокращает номенклатуру используемых сменных измерительных наконечников.

В процессе измерений КИМ-контроллер управляет координатными перемещениями (положением, скоростью и ускорением подвижных элементов базовой части) от джойстика (ручной режим) или в соответствии с заранее разработанной программой (автоматический режим) и запоминает пространственные координаты контролируемых точек объекта измерений по сигналам датчика касания. Кроме того, КИМ-контроллер выполняет ряд дополнительных функций: инициализацию системы координат по нуль-меткам и конечным выключателям линейных энкодеров; управление установочными перемещениями моторизованной измерительной головки; оптимизацию траектории перемещения измерительного наконечника; формирование нормальных векторов подхода к контролируемым точкам объекта; компенсацию влияния систематических погрешностей, обусловленных погрешностями измерительных преобразователей, измерительной головки, отклонениями от прямолинейности и ортогональности координатных перемещений; обработку сигналов датчиков температуры с последующей компенсацией погрешности.

Персональный компьютер, являясь устройством управления верхнего уровня, осуществляет взаимодействие оператор—машина посредством соответствующего программного обеспечения и служит для первоначальной загрузки КИМ-контроллера, выдачи ему команд движения в соответ-

ствии с измерительной программой и определения (вычисления) по полученным от него в процессе измерений данным (координаты контролируемых точек) требуемых геометрических характеристик объекта.

При оснащении КИМ были использованы вышеперечисленные датчики и комплектующие зарубежных фирм ввиду отсутствия отечественных аналогов, удовлетворяющих требованиям технического задания.

Также одной из главных задач при проектировании КИМСТ и серии КИМ была разработка программно-математического обеспечения. Для ее решения создан оригинальный язык программирования, отвечающий следующим основным требованиям:

доступность — освоение языка операторами не должно требовать специальных навыков по программированию;

простота и ясность лексики и синтаксиса — ключевые слова, названия параметров и т. д. имеют четкий смысл, структура команд проста и понятна;

функциональность — все функции измерительной программы, а также ряд специфических для языка функций должны быть реализуемы;

эффективность — желаемый результат достигается за наименьшее количество команд;

адаптивность — легкость встраивания новых команд, параметров и т. д.

При разработке языка программирования приняты концептуальные решения:

он основан на модели структурного программирования без привлечения объектно-ориентированного подхода;

в нем использован минимально необходимый набор классических приемов программирования (не используются логические операторы, операторы перехода и т. п.);

в качестве базового языка для написания команд выбран английский как наиболее распространенный и привычный в такого рода системах, в окнах для задания команд используется русский язык.

Управляющая программа для измерений создана в одном из двух режимов: обучения или генерации текста. В режиме обучения большая часть содержимого команды формируется путем отслеживания и фиксации действий оператора при выполнении измерений, а также запоминается и включается в программу траектория перемещений при измерениях точек объекта и при переходах от объекта к объекту. В режиме генерации текста создание команды начинается с ее указания в меню измерительной программы. В результате формируется имя команды и небольшое число параметров, известных по умолчанию. Остальные параметры задают через окно параметров команды. Траекторию перемещений задают вручную или обучением.

Программирование процесса измерений осуществляют на экране в измерительной программе. Верхняя строка экрана является стандартной для Windows, следующая строка содержит позиции главного меню системы. В расположенной ниже стандартной панели инструментов находятся кнопки для запуска часто используемых функций. Остальная часть экрана разделена на четыре постоянно присутствующих окна: параметры сеанса измерений; графическое изображение измеренных объектов; управляющая программа; протокол измерений.

Отличительной особенностью программно-математического обеспечения КИМСТ является компонент, позволяющий существенно повысить точность измерений геометри-

ческих параметров путем расчета и ввода поправок в результаты измерений для компенсации систематических погрешностей.

Погрешности координатных перемещений и взаимного расположения координатных осей в совокупности образуют картину пространственной точности КИМ и выявляются в результате его калибровки. Калибровка осуществляется при помощи концевых мер длины или лазерного интерферометра, и по ее результатам для каждой из координатных осей формируют поправочные таблицы, которые записывают в определенный текстовый файл и используют для введения поправок при измерении. Колебания рабочего зазора аэростатических направляющих (вызываются непостоянством давления питающего воздуха, изменением положения центра тяжести системы из-за взаимного перемещения подвижных элементов КИМ при измерениях) определяют при помощи встроенных в аэростатические опоры пневмоиндуктивных преобразователей, показания которых используют для формирования поправок. Компенсация температурных погрешностей осуществляется определением температур в зоне измерений, контролируемой детали и КИМСТ и расчетом поправок по полученным результатам. Кроме того, термостатирование базовой части КИМСТ обеспечивается ее заключением в теплоизоляционный кожух и применением системы термостабилизации.

В результате проведенных работ были созданы прецизионная и серия универсальных КИМ, заместивших аналогичные зарубежные образцы и ликвидирующих критическую импортную зависимость в области средств измерений, отнесенных к технологиям двойного назначения. Внедрение данных разработок позволит оснастить стратегические машиностроительные предприятия и предприятия оборонно-промышленного комплекса РФ универсальными контрольно-измерительными средствами, предназначенными для метрологического обеспечения производства прецизионных деталей спецтехники, в том числе деталей оборудования и приборов, создающих нанотехнологическую базу.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» (государственные контракты № 10411.1003702.05.001 от 30.03.2010 г. и № 11411.1003704.05.005 от 26.09.2011 г.).

### 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. et al.** Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // *Measurement Techniques*. 2013. V. 55. N 11. P. 1311—1315.

2. **Телешевский В. И.** Измерительная информатика в машиностроении // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*. 2008. № 2. С. 41—45.

3. **Телешевский В. И., Мастеренко Д. А.** Рекуррентное робастное оценивание в автоматизированных измерительных информационных системах // *Измерительная техника*. 1997. № 4. С. 16—19; **Teleshevskii V. I., Masterenko D. A.** Recursive robust parameter estimation in automated information — Measuring systems // *Measurement Techniques*. 1997. V. 40. N 4. P. 319—323.

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].