

**МЕЩЕРЯКОВА****Вера Борисовна**кандидат технических наук,
доцент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**MESHCHERYAKOVA****Vera Borisovna**Candidate of Engineering
Sciences, Assoc. Prof.
(MSTU named
after N.E. Bauman)**АВДОШИН****Кирилл Александрович**аспирант
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**AVDOSHIN****Kirill Alexandrovich**Post-Graduate
(MSTU named
after N.E. Bauman)

К оценке выходных параметров точности высокоскоростной обработки на станках с числовым программным управлением

В.Б. Мещерякова, К.А. Авдошин

Внедрение новых станков с ЧПУ для высокоскоростной обработки является одним из самых перспективных направлений в машиностроении. При их внедрении необходимо обеспечить заданную точность и производительность. Современные ЧПУ не позволяют полностью компенсировать погрешности технологической системы, которые влияют на точность обработки. Представлен метод автоматизированной оценки точности высокоскоростной обработки на станках с ЧПУ, разрабатываемый на кафедре «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на основе которого создается программное обеспечение для систем ЧПУ. Данный метод позволяет реализовать функцию прогнозирования точности обработки по параметрам точности модели изделия, получаемой в процессе моделирования функционирования станка с ЧПУ с учетом погрешностей его отдельных элементов. Представлена расчетно-экспериментальная схема для определения погрешности сборки и настройки инструментальной оправки. Приведены величины радиальных биений элементов сборочной инструментальной единицы и погрешности станка.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, высокоскоростная обработка, технологическая система, функция коррекции СЧПУ, радиальное биение инструмента, геометрическая точность станка.

Estimation of Output Parameters of High-Precision Machining on CNC Machine Tools

V.B. Meshcheryakova, K.A. Avdoshin

The introduction of new CNC machine tools for high speed machining is one of the most promising trends in machine-building. When commissioning it is necessary to ensure the desired accuracy and productivity. Modern CNC systems are not able to entirely compensate inaccuracies of the machine tool and its equipment, which influence on the accuracy of processing. The paper considers the method of automated assessment of the CNC high speed machining accuracy. The method is being developed by the «Metal-Cutting Equipment» Sub-Department of the Bauman Moscow State Technical University. Based on this method the software for CNC systems is being developed. This software makes it possible to realize the processing accuracy prediction function according to the product model accuracy parameters, which is obtained when modeling the CNC machine tool operation taking into account the errors of its parts. The radial runout values of

the assembled tool items and the machine tool precision are given. The calculation and experimental scheme to determine the assembling and setting up error of the tool holder is provided.

Keywords: CNC machine tool, high speed machining, technological system, CNC correction function, tool radial runout, machine tool geometric accuracy.

Разработка и внедрение многоцелевых станков с ЧПУ для высокоскоростной обработки сложных изделий — одно из перспективных направлений в машиностроении. При их внедрении важно обеспечить заданную точность и производительность.

Существующие функции коррекции отечественных и зарубежных систем ЧПУ не позволяют полностью компенсировать погрешности технологической системы, которые оказывают влияние на точность обработки. Необходима программная функция систем ЧПУ, позволяющая не только обеспечить высокий начальный уровень выходных параметров точности станков, но и сохранить его в течение заданного периода эксплуатации, путем введения предсказаний в управляющие программы (УП).

На станке с ЧПУ, являющимся технологической системой (ТС), для последовательного выполнения технологического процесса обработки сложного изделия необходимо функционирование всех элементов ТС (станка, режущих инструментов в специальных оправках, заготовки, приспособления). Чтобы получить заданные параметры точности обработки изделия, которые и являются выходными параметрами точности ТС, необходимо знать, как формируются погрешности обработки изделия и учитывать долю влияния всех элементов ТС. При этом желательно знать характер и долю влияния на получаемую погрешность обработки изделия погрешностей каждого отдельного элемента ТС.

Одним из направлений научной работы кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана является разрабатываемый метод автоматизированной оценки точности обработки на станках с ЧПУ. На основе данного метода создается программное обеспечение для систем ЧПУ класса CNC, позволяющее реа-

лизовать функцию прогнозирования точности обработки по параметрам точности модели изделия, получаемой в процессе моделирования функционирования станка с ЧПУ с учетом погрешностей его отдельных элементов (рис. 1).

Параметры точности единичных геометрических образов (ГО) изделия формируются с учетом процесса статической настройки станка и процесса механической обработки данного изделия. При этом на точность обработки изделия влияют погрешности сборки и настройки вне станка инструментальной оправки, установки заготовки в приспособления, а также погрешности, возникающие при автоматической установке собранной оправки в шпинделе станка и приспособления с заготовкой в рабочей зоне. Относительное положение режущего инструмента и заготовки также определяется погрешностями самого станка. В процессе обработки детали возникают термические деформации станка Δ_T и деформации от сил резания $\Delta_{с.р.}$, которые также влияют на точность обработки (см. рис. 1).

Смоделированное изделие рассматривается как совокупный ГО изделия, формируемый соответствующими единичными ГО обрабатываемых поверхностей. Единичный ГО поверхности получается за счет взаимосвязанных формообразующих перемещений рабочих органов станка с ЧПУ, несущих инструмент и заготовку по управляемым координатам в ходе имитации процесса обработки и представляет собой отображение конкретной реально обрабатываемой поверхности изделия, которая описывается математически (рис. 2). Единичные ГО поверхностей характеризуются рядом свойств (размер Δ_L , форма Δ_ϕ , расположение поверхностей $\Delta_{р.п.}$), отклонения которых и представляют параметры точности моделируемого изделия. Получаемые отклонения смоделированных ГО сравниваются с допусками, задаваемыми чертежом и определяющими точность изготовления данного изделия [1].

Разрабатываемая программная функция систем ЧПУ позволяет осуществлять расчет и построение аксонометрического изображения ГО на основе полученных экспериментально-расчетных данных для проведения ка-

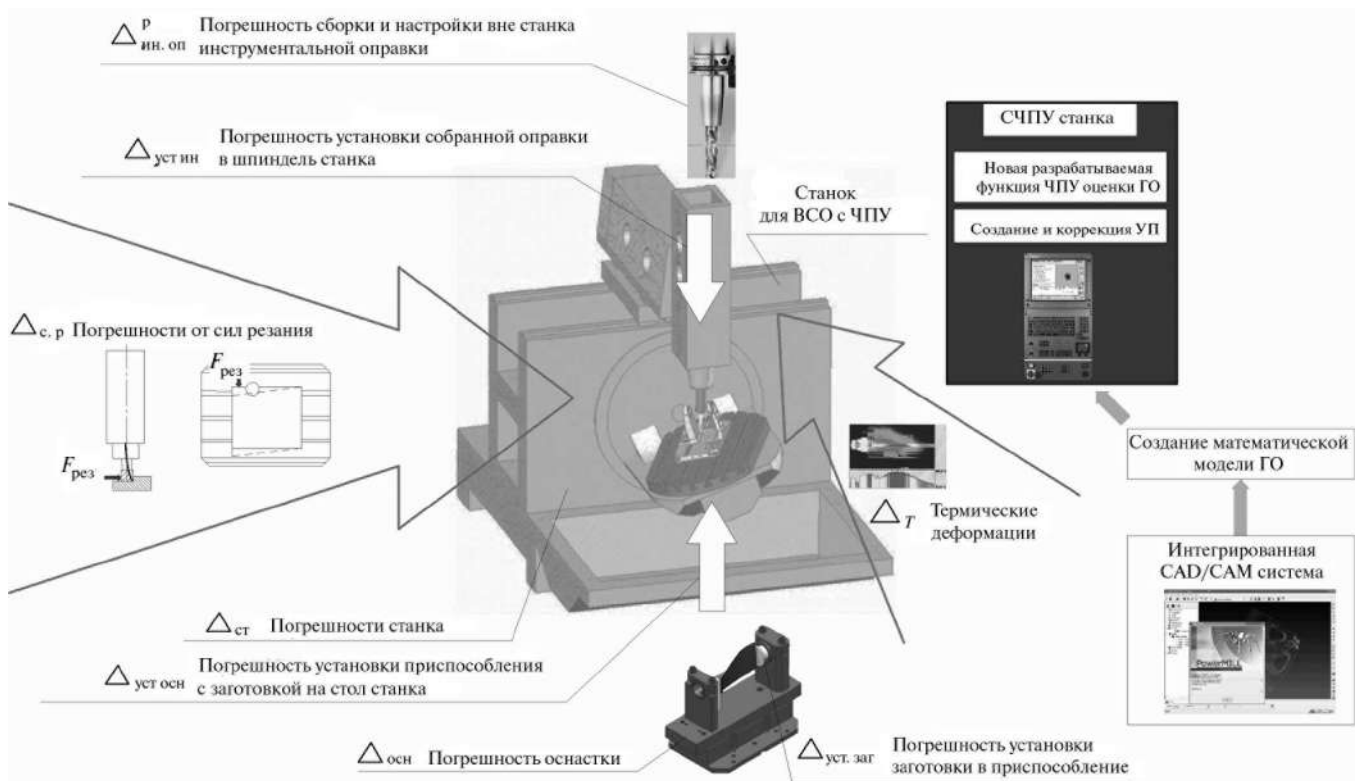


Рис. 1. Схема метода автоматизированной оценки точности обработки на станках с ЧПУ

чественной оценки выходных параметров точности станка, а также получать изображения профилей ГО в исследуемых сечениях для количественной оценки этих параметров.

Количественная оценка линейных, угловых смещений моделируемых поверхностей позволяет проводить комплексную программную компенсацию для устранения спрогнозированных отклонений при автоматизированной подготовке УП как на станке с ЧПУ, так и вне его.

Проведение высокоскоростной обработки (ВСО) накладывает определенные требования к конструкции и настройке всех элементов ТС: станка, режущего инструмента, инструментальной и технологической оснастки, которые

необходимо учитывать при моделировании ГО поверхностей изделия. Также использование различных программных стратегий в УП является важной составляющей не только в процессе моделирования высокоскоростной обработки, но и при проведении дальнейшей компенсации действующих погрешностей [2].

Принципиальным отличием станков для ВСО является особенное компоновочное решение и обязательное использование определенных конструкций узлов, таких как: жесткая и термостабильная станина, высокоскоростной мотор-шпиндель, прямой привод или ШВП с прецизионным винтом на линейных осях, прямой привод на круговых осях (рис. 3).

Конструкция должна быть максимально жесткой чтобы минимизировать вибрации, которые особенно вредны при проведении ВСО. Термостабильность конструкции необходима для равномерного теплового расширения узлов станка, что делает прогнозируемым изменение характеристик ТС при продолжительной работе.

При частоте вращения шпинделя свыше 12 000 об./мин целесообразно использовать мотор-шпиндель, так как шпиндельные узлы с ременной или зубчатой передачей не могут

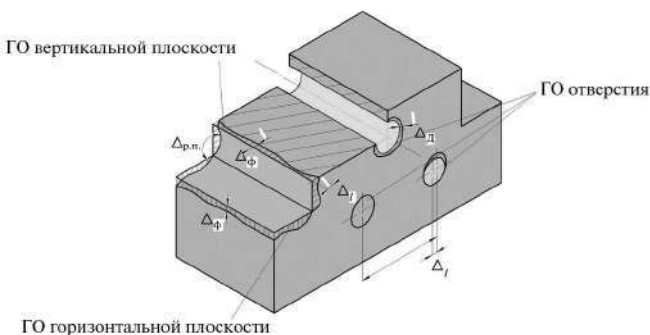


Рис. 2. Совокупный ГО изделия

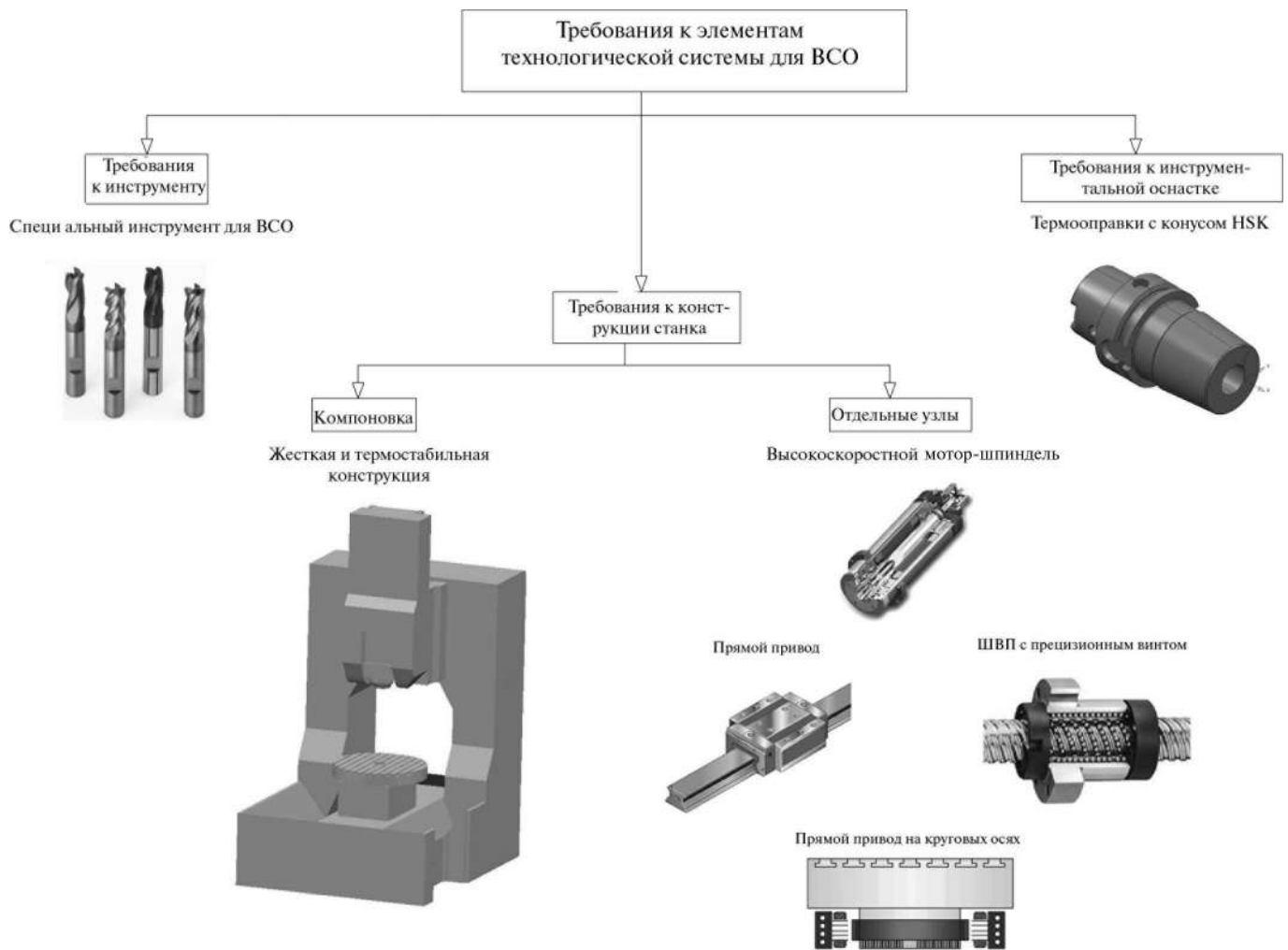


Рис. 3. Требования к элементам технологической системы для проведения ВСО

обеспечить такую скорость вращения, поскольку они имеют много звеньев, что ограничивает их точность.

Применение прямого привода или ШВП с прецизионным винтом на линейных осях станка позволяет повысить срок службы оборудования и стабильность точностных характеристик, расширить диапазон технологических скоростей (от 0,01 до 5,00 м/с), увеличить динамику (ускорение $2g$), повысить точность и плавность перемещения рабочих органов станка. Применение прямого привода на круговых осях упрощает кинематическую схему станка и позволяет увеличить скорость и жесткость перемещаемых узлов.

Инструмент для проведения ВСО должен быть твердосплавным с износостойким покрытием режущей части, например, на основе использования нитрида титана TiN, карбонитри-

да титана TiCN, нитрида титана — алюминия TiAlN, кубического нитрида бора CBN или на основе высокопрочных алмазоподобных покрытий DLC. Так же предъявляются требования к геометрии инструмента: допуск на активный диаметр инструмента должен быть не выше $h6$, количество зубьев не более четырех и их распределение по окружности диаметра не должно быть равномерным, режущие кромки должны быть скруглены.

Для станков, предназначенных для ВСО, в качестве инструментальной оснастки необходимо использовать специальные термооправки с основными базами в виде конуса HSK и специальные удлинители.

Термооправки изготавливают из термостойкой стали, гарантирующей структурную, геометрическую и размерную стабильность после многократных циклов термозажима. Их ис-

пользование повышает скорость вращения инструмента, жесткость инструментальной сборки, и как следствие точность обработки. Применение специальных переходных втулок позволяет использовать инструмент диаметром 1,5...32 мм и настраивать инструментальную сборку на необходимый вылет.

Использование ВСО позволяет получать на станке детали по 6-му качеству точности. Как правило, допуск на размеры среднегабаритного сложного изделия, составляет не более 25 мкм, поэтому при прогнозировании точности обработки необходимо учитывать все погрешности элементов ТС.

Для расчетно-экспериментального определения погрешности сборки и настройки инструментальной оправки и выделения доли влияния ее отдельных элементов (оправки, удлинителя, инструмента) на точность обработки была разработана расчетная схема (рис. 4), которая представляет собой совокупность систем координат, построенных на основных и исполнительных базах элементов сборочной единицы.

За базовую систему координат принимается координатная система $OXYZ_{ш}^{0,В}$, построенная на оси вращения шпинделя прибора. Системы координат, построенные в точках со штрихом (например, $Z'_{ш}''$, $Z'_{оп}''$), построены на основных и исполнительных базах сборочной единицы, не имеющих погрешностей изготовления (идеальная база). Системы координат, построенные в точках без штриха (например, $Z''_{ш}$, $Z''_{оп}$), построены на основных и исполнительных базах элементов сборочной единицы, имеющих погрешность изготовления (реальные базы) [3].

При разработке расчетной схемы были построены координатные системы на исполнительной базе шпинделя прибора $OXYZ_{ш}''$, основной базе термооправки $OXYZ_{оп}''$, исполнительной базе термооправки $OXYZ_{оп}''$, основной базе удлинителя $OXYZ_{удл}''$, исполнительной базе удлинителя $OXYZ_{удл}''$, оси вращения режущего инструмента $OXYZ_{ин}^{0,В}$ и режущих кромках инструмента $OXYZ_{ин}^{р,к}$.

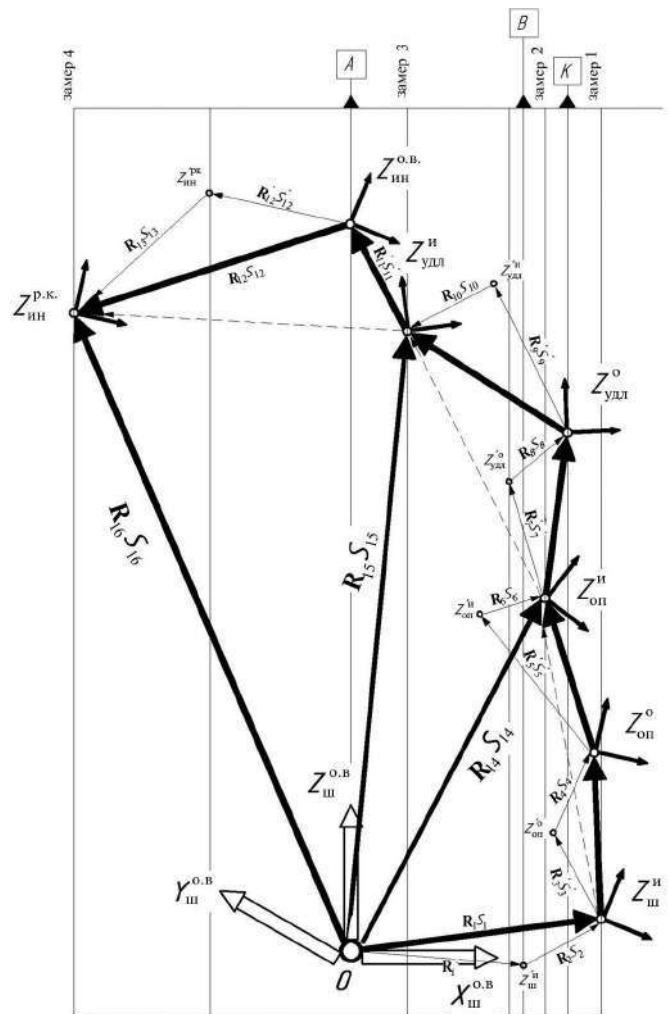


Рис. 4. Расчетная схема

Полученные при этом радиус-векторы R_1 , R_5 , R_9 , R_{12} задают начальное положение координат систем, построенных на реальных исполнительных базах шпинделя прибора, термооправки, удлинителя, режущих кромках инструмента и определяют их линейные смещения относительно собственных основных баз. Относительные повороты координатных систем учитываются матрицами поворотов S_1 , S_5 , S_9 , S_{12} . Радиус-векторы R_2 , R_6 , R_{10} , R_{13} и матрицы поворотов S_2 , S_6 , S_{10} , S_{13} определяют величины радиальных биений этих баз.

Радиус-векторы R_3 , R_7 , R_{11} задают начальное положение координатных систем, построенных на реальных основных базах термооправки, удлинителя и инструмента и определяют их линейные смещения относительно соответствующих исполнительных баз при сборке сборочной единицы. Относительные повороты координатных систем учитываются матрицами

поворотов S_3, S_7, S_{11} . Количественная величина и направление данных векторов определяются как точностью изготовления основных баз, так и применяемым способом базирования. Радиус-векторы R'_3, R'_7, R'_{11} и матрицы поворотов S'_3, S'_7, S'_{11} характеризуют погрешности установки идеальных баз термооправки (удлинителя, инструмента) в реальные базы шпинделя (термооправки, удлинителя). Радиус-векторы R_4, R_8 и матрицы поворотов S_4, S_8 определяют величины радиальных биений основных баз, возникающие в процессе их изготовления. Радиус-вектор R_{14} и матрица поворотов S_{14} определяют положение исполнительных баз термооправки относительно базовой системы координат и характеризуют соответственно суммарную погрешность установки термооправки в шпинделе прибора.

Радиус-вектор R_{15} и матрица поворотов S_{15} определяют положение исполнительных баз удлинителя, установленного в термооправку, относительно $OXYZ_{ш}^{o.б}$ и характеризуют соответственно суммарную погрешность установки сборочной единицы термооправки — удлинителя в шпинделе прибора.

Радиус-вектор R_{16} и матрица поворотов S_{16} определяют положение режущих кромок инструмента относительно $OXYZ_{ш}^{o.б}$ и характеризуют соответственно суммарную погрешность установки сборочной единицы термооправки — удлинителя — инструмент в шпинделе прибора. Необходимо отметить, что данная погрешность включает погрешность изготовления исполнительной базы шпинделя прибора и погрешность установки основной базы термооправки в конусе шпинделя прибора.

Анализируя положение радиус-векторов расчетной схемы, можно установить какую погрешность вносит отдельный элемент сборочной единицы в погрешность $\Delta p_{ин.оп}$ при настройке режущего инструмента вне станка, что в дальнейшем учитывается в процессе моделирования ГО поверхностей.

Погрешность, вносимая термооправкой, определяется как сумма $R_3S_3 + R_5S_5 = R_{14}S_{14} - R_1S_1$, погрешность, вносимая удлинителем — $R_7S_7 + R_9S_9 = R_{15}S_{15} - R_1S_1 - (R_3S_3 - R_5S_5)$, погрешность, вносимая режущим инструментом —

$$R_{11}S_{11} + R_{12}S_{12} = R_{16}S_{16} - R_1S_1 - (R_3S_3 - R_5S_5) - (R_7S_7 - R_9S_9) \quad [4].$$

Экспериментальным путем были определены положения исполнительных баз термооправки с конусом HSK A 63, удлинителя, для зажима инструмента с цилиндрическим хвостовиком диаметром 8 мм, режущих кромок концевой фрезы диаметром 8 мм, с четырьмя зубьями, длиной режущей части 20 мм, с износостойким покрытием TiALN.

Термооправка собиралась на специальном приборе с нагревателем типа EasyShrink 2.0 (рис. 5). Отверстие термооправки, предназначенное для установки инструмента или удлинителя при нагревании расширяется, а затем охлаждаясь, сжимается, обеспечивая более точное базирование элементов сборочной единицы.

Замеры величин радиального биения, возникающих по мере сборки, проводились по исполнительным базам шпинделя прибора, термооправки, удлинителя и режущим кромкам инструмента (рис. 6).

Учитывая конструктивные особенности элементов собираемых сборочных единиц и в связи с этим возможность их различной установки при сборке, определялись максимально и минимально возможные значения радиального биения, возникающие на режущих кромках инструмента. Для этого каждый элемент оче-



Рис. 5. Прибор для сборки термооправок EasyShrink 2.0

редной сборочной единицы (термооправка, удлинитель, инструмент) устанавливался по своим основным базам в различных положениях поворотом по часовой стрелке последовательно на угол 60° , после чего зажимался.

Экспериментально определено радиальное биение шпинделя прибора, равное $0,004$ мм. Различное положение, занимаемое термооправкой в шпинделе прибора, приводит к увеличению радиального биения $0,007...0,009$ мм. Произвольное положение удлинителя в термооправке увеличивает радиальное биение на $0,008...0,0011$ мм. В итоге, после установки фрезы в инструментальную сборку, радиальное биение составляет $0,011...0,013$ мм.

Для определения погрешностей станка использовалась автоматизированная измерительная система Ballbar фирмы Renishaw, в состав которой входит: калибрующее устройство, измерительный щуп, удлинитель круга измерения, преобразователь интерфейса, крепление

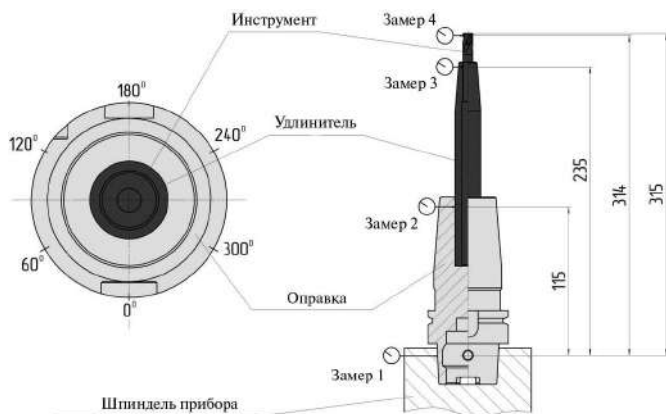


Рис. 6. Схема измерения величин радиального биения элементов сборочной единицы (термооправка — удлинитель — режущий инструмент)

для щупа, держатель в шпиндель, батарейка (рис. 7).

Методика измерения включала: составление управляющей программы для формирования траектории движения датчика (рис. 8, а); проведение настройки специального программного обеспечения на ПК (рис. 8, б); проведение измерения станка (рис. 8, в); получение результатов теста (рис. 8, г).

Данный программный метод позволил провести автоматизированную комплексную оценку геометрической точности станков. В виде круговых диаграмм были получены траектории рабочих органов по отклонению от круглости которых, оценивались: люфт, боковой люфт, выброс обратного хода, циклическая ошибка, рассогласование приводов, отклонение от перпендикулярности, отклонение от прямолинейности (рис. 9).

В ходе эксперимента были измерены три многоцелевых станка, предназначенных для ВСО моделей: DMU 70 (рис. 9, а), Hermle C30 (рис. 9, б), HURONK2X (рис. 9, в). В таблице приведены значения погрешностей геометрической точности измеренных станков.

Результаты исследований показали, что для станков с ЧПУ, предназначенных для ВОС, отклонение от прямолинейности движения рабочих органов по соответствующим осям может достигать $0,2...2,8$ мкм; отклонение от перпендикулярности между осями составило $-14...16,2$ мкм/м; люфт по соответствующим осям: $-0,6...14$ мкм; циклическая ошибка: от $0,3$ до $0,5$ мкм; боковой люфт: $-1,4...0,8$ мкм; выбросы обратного хода: $-2...1,3$ мкм.



Состав измерительной системы



Датчик установленный на столе станка

Рис. 7. Измерительная система Ballbar фирмы Renishaw

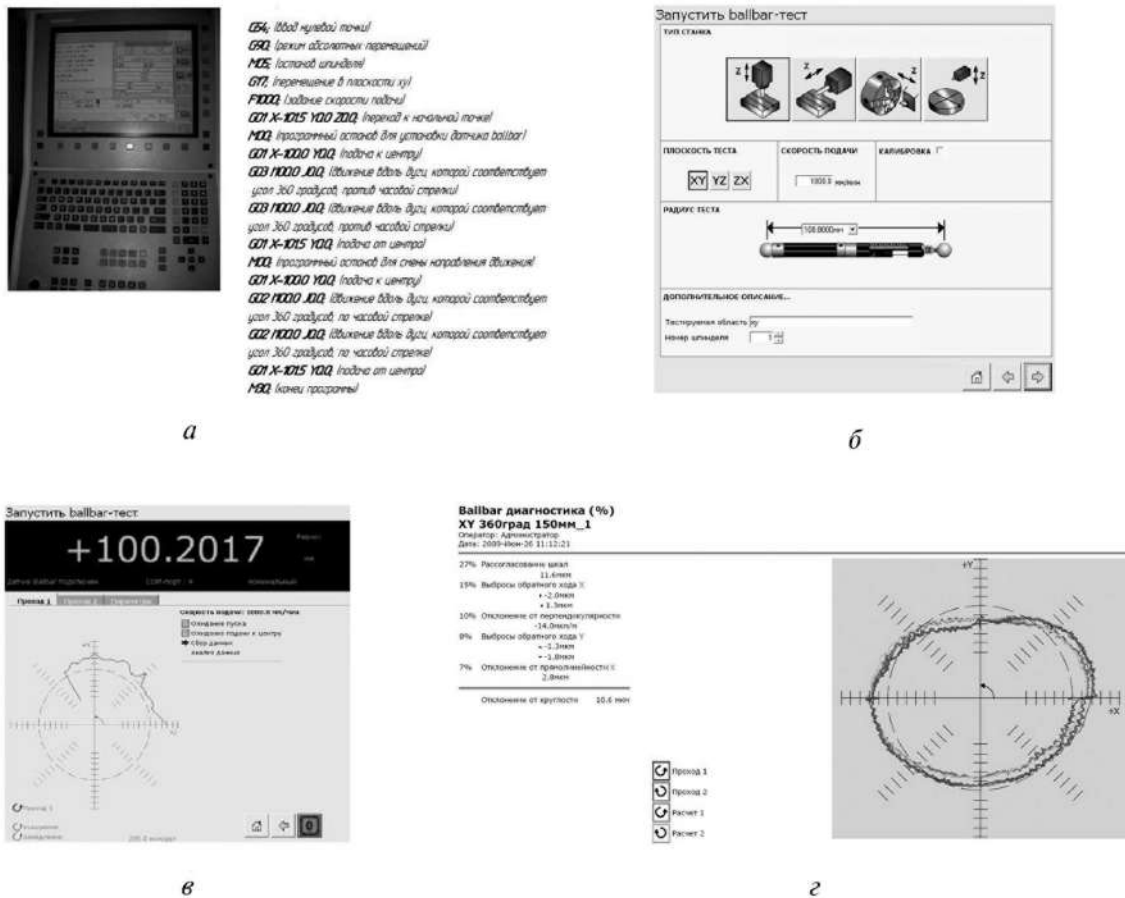


Рис. 8. Основные этапы оценки геометрической точности станков автоматизированной измерительной системой Ballbar фирмы Renishaw:

а — составление управляющей программы; б — настройка специального программного обеспечения; в — измерение станка; г — результат теста

Значения погрешностей геометрической точности многоцелевых станков для ВСО

Ось координат	Название ошибок						
	Люфт, мкм	Выброс обратного хода, мкм	Боковой люфт, мкм	Циклическая ошибка, мкм	Рассогласование приводов, мс	Отклонение от перпендикулярности мкм/м	Отклонение от прямолинейности, мкм
<i>Станок DMU</i>							
X	-0,5	-2...13	-1,2...0,3	0,5...0,5	0,02	-14	2,8
Y	-0,6	-13...-18	0,6...0,6	0,3...0,4	0,02	-14	0,8
<i>Станок Hermle</i>							
X	-0,2...0,6	0,0...1	-0,2...0,8	0,3...0,3	0,00	16,2	0,2
Y	0,8...14	0,0...0,0	-1,4...-0,1	0,3...0,5	0,00	16,2	0,7
<i>Станок Hiron</i>							
X	-0,5...0	-2...-13	-1,2...0,3	0,5...0,5	0,02	-14,0	2,8
Y	-0,6...0	-1,8...-13	0,6...0,6	0,3...0,4	0,02	-14,0	0,5

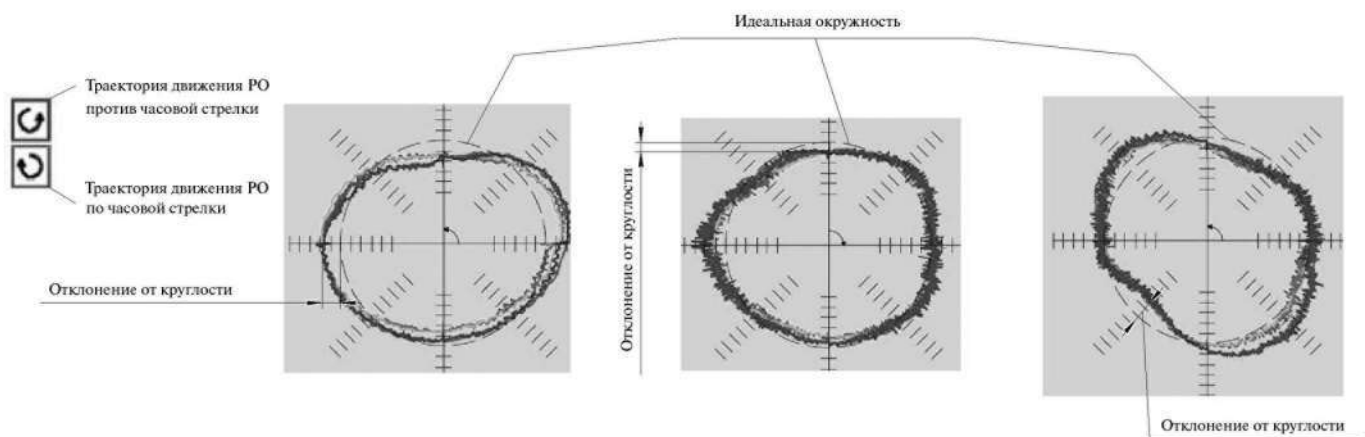


Рис. 9. Круговые диаграммы траекторий рабочих органов измеренных станков

Разрабатываемый на кафедре автоматизированный метод оценки точности обработки позволит расширить функциональные возможности современных систем ЧПУ, повысить точность обработки за счет проведения комплексного программного предискажения УП с учетом доли и характера влияния отдельных элементов технологической системы, сократить время статической настройки станка с ЧПУ на изготовление детали.

Литература

1. Стародубов В.С., Черняков Е.Л. Геометрический образ обрабатываемой детали как обобщенный выходной параметр точности металлорежущих станков с ЧПУ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1983. № 10. С. 140—144.
2. Мещерякова В.Б. Проведение практических экспериментов и работ по повышению производительности и качества обработки на станках с ЧПУ // Госконтракт Тема № 02.740.11.01.75 «Разработка метрологических и технологических основ создания и эксплуатации прецизионных и высокопроизводительных станков с ЧПУ», 2010. С. 171.
3. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984, 256 с.
4. Стародубов В.С., Мещерякова В.Б. Формирование погрешностей настройки режущих инструментов на ГПМ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1989. № 1. С. 130—135.

References

1. Starodubov V.S., Cherniakov E.L. Geometricheskii obraz obrabatyvaemoi detali kak obobshchennyi vykhodnoi parametr tochnosti metallorzhushchikh stankov s ChPU [Geometric image of the workpiece as a generic output parameter precision CNC machine tools]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 1983, no. 10, pp.140—144.
2. Meshcheriakova V.B. Provedenie prakticheskikh eksperimentov i rabot po povysheniiu proizvoditel'nos i kachestva obrabotki na stankakh s ChPU [Carry out practical experiments and work to improve the productivity and quality of processing on CNC machines]. *Goskontrakt Tema № 02.740.11.01.75 «Razrabotka metrologicheskikh i tekhnologicheskikh osnov sozdaniia i ekspluatatsii pretsizionnykh i vysokoproizvoditel'ny stankov s ChPU»*, 2010. P. 171.
3. Bazrov B.M. *Raschet tochnosti mashin na EVM* [The calculation accuracy of machines on a computer]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984, p. 256.
4. Starodubov V.S., Meshcheriakova V.B. *Formirovanie pogreshnopei nastroiiki rezhushchikh instrumentov na GPM* [Meshcheryakova Formation errors cutting tool for FMS]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 1989, no. 1, pp. 130—135.

Статья поступила в редакцию 13.12.2012

Информация об авторах

МЕЩЕРЯКОВА Вера Борисовна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: cadmat@mail.ru).

АВДОШИН Кирилл Александрович (Москва) — аспирант кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: kirill.avdoshin@yandex.ru).

Information about the authors

MESHCHERYAKOVA Vera Borisovna (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of «Metal Cutting Machines» Department. MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: cadmat@mail.ru).

AVDOSHIN Kirill Alexandrovich (Moscow) — Post-Graduate of «Metal Cutting Machines» Department. MSTU named after N.E. Bauman. (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: kirill.avdoshin@yandex.ru).