

24 июля 2013 г. на базе МГТУ «СТАНКИН» состоялось совещание «О мерах по развитию отечественного станкостроения в целях модернизации военно-промышленного комплекса», посвященное развитию отечественного станкостроения. МГТУ «СТАНКИН» является базовой организацией по подпрограмме «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2011—2016 гг. Вниманию читателей предлагается начало подборки статей ведущих ученых, специалистов МГТУ «СТАНКИН», ОАО «НИИИзмерения» и других организаций по проблемам метрологического обеспечения машиностроения.

621.9.08

Анализ объемных геометрических погрешностей* в многокоординатных измерительных и технологических системах на основе лазерных измерений

В. И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ, В. А. СОКОЛОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия,
e-mail: vitel@stankin.ru

Изложены принципы построения системы автоматической коррекции объемных геометрических погрешностей многокоординатных систем (контрольно-измерительных машин или станков с ЧПУ), основанной на лазерной интерферометрии. На примере трехкоординатных обрабатывающих центров продемонстрирована возможность управления геометрической точностью и ее повышения при помощи коррекции.

Ключевые слова: многокоординатные системы, коррекция объемной геометрической погрешности, лазерная интерферометрия.

The article describes the system for automatic correction of volumetric geometric errors of multi-axis systems (CMMs or CNC-controlled machine-tools). The described system is based on laser interferometry. The accuracy improvement and accuracy control is demonstrated for three-axis machining centers.

Key words: multi-axis systems, volumetric geometric accuracy correction, laser interferometry.

Среди всего многообразия используемого в современных производственных процессах измерительного и технологического оборудования доминирующее положение занимают многокоординатные системы, к которым, в первую очередь, относятся координатно-измерительные машины (КИМ), приборы и станки. С точки зрения геометрии, их объединяет [2—4]:

взаимодействие с измеряемой (для станков — обрабатываемой) деталью посредством чувствительного элемента датчика (режущей кромки инструмента), перемещающегося по заданной траектории в пространстве;

построение по сходным кинематическим схемам: в традиционной компоновке (декартовой, декартово-полярной, полярной), параллельной кинематике (биподы, триподы

и т. д.) [4], гибридном исполнении, сочетающем свойства первой и второй компоновок.

Одним из важнейших показателей качества многокоординатных систем является их объемная геометрическая точность, приобретающая особое значение при контроле и обработке прецизионных трехмерных (3D) поверхностей. Впервые понятие объемной точности введено в практику в [1].

В настоящее время проблема повышения точности и коррекции погрешностей измерительного и технологического оборудования особенно актуальна, так как ресурс механо-технологических возможностей для этого практически исчерпан и продвижение в данном направлении либо невозможно, либо экономически затратно. Поэтому в метрологии возник другой метод повышения точности, основанный на измерении геометрических погрешностей станка или КИМ с их последующей компенсацией [3, 5—9].

* Volumetric geometric accuracy — термин применяется в машино- и станкостроении [1].

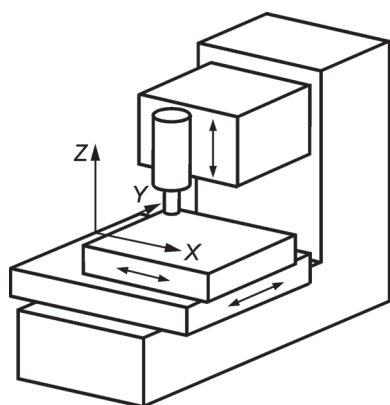


Рис. 1. Схематическое изображение компоновки обрабатывающего центра Kondia A-10

В данной статье развивается новый подход к коррекции геометрических погрешностей многокоординатного оборудования, предпосылки к разработке которого изложены в предыдущих публикациях [2, 9—14]. Суть работы заключается в создании математической модели геометрической погрешности многокоординатного оборудования, измерении составляющих этой погрешности многофункциональной лазерной интерференционной измерительной системой, восстановлении распределения геометрической погрешности в рабочем пространстве (error mapping) и вводе поправок в систему ЧПУ многокоординатной системы на основе выработанной оптимальной стратегии коррекции.

Коррекция геометрической погрешности. В [2, 3] представлена система для коррекции геометрической погрешности, продемонстрирована эффективность используемых подходов и выбранных методов коррекции на основе компенсации погрешности по результатам лазерных измерений. В [4] изучен вопрос компенсации не только погрешности по отдельным координатным осям, но и объемной погрешности многокоординатной системы, определяемой по результатам измерения 21-й параметрической функции объемной погрешности.

Принципы коррекции погрешностей [2, 3] были применены при реализации проекта на предприятии «Салют». Задача состояла в контроле точности и компенсации объемных погрешностей двух трехкоординатных обрабатывающих центров Kondia A-10 (Испания), построенных по компоновке «XYZ», т. е. они оснащены столом, перемещающимся по осям X, Y, и шпинделем — по оси Z. На рис. 1 представлено схематическое изображение Kondia A-10.

Технические характеристики обрабатывающего центра Kondia A-10

Площадь стола	1,200×500 мм
Расстояние от шпинделя до плоскости стола	140—750 мм
Перемещения по координатам X; Y; Z	1000; 500; 610 мм
Точность позиционирования	0,01 мм
Повторяемость	0,008 мм
Дискретность перемещений	0,001 мм

Для измерений объемных погрешностей обрабатывающих центров использовали лазерную интерференционную измерительную систему (ЛИИС) Renishaw XL-80 (Великобритания) [13], обладающую высокой универсальностью. При помощи данной ЛИИС можно измерять параметрические функции объемной погрешности многокоординатного оборудования с высокой производительностью. В настоящее

время появились ЛИИС, в том числе следящие интерферометры (лазер-трекеры) [15, 16], позволяющие за один проход станка измерить до шести параметрических функций объемной погрешности.

Итак, проводя необходимые измерения, по формулам из [2, 3] вычисляют координатные компоненты полной объемной погрешности $\Delta x(x, y, z)$, $\Delta y(x, y, z)$, $\Delta z(x, y, z)$. Например, погрешность Δx определяют как

$$\begin{aligned} \Delta x(x, y, z) = & \delta_{xx}(x) + \delta_{xz}(z) + \delta_{xy}(y) + y[\varepsilon_{zy}(y) + \varepsilon_{zx}(x)] + \\ & + y\alpha_{yx} - z[\varepsilon_{yy}(y) + \varepsilon_{yx}(x)] - z\alpha_{zx} + x_T - y_T[\varepsilon_{zx}(x) + \varepsilon_{zy}(y)] - \\ & - z_T[\varepsilon_{yz}(z) + \varepsilon_{yy}(y) + \varepsilon_{yx}(x)], \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z — координаты точки, в которой вычисляют координатные составляющие погрешности; δ_{ij} — линейные параметрические погрешности позиционирования вдоль оси и отклонения осей от прямолинейности; ε_{ij} — угловые параметрические погрешности (крен, тангаж и рыскание); α_{ij} — погрешности взаимной перпендикулярности осей; x_T, y_T, z_T — поправки на размер инструмента.

Аналогично вычисляют погрешности для других координат $\Delta y(x, y, z)$, $\Delta z(x, y, z)$.

Модуль полной объемной геометрической погрешности для некоторой i -й точки с координатами (x_i, y_i, z_i) находят из координатных составляющих по формуле [1, 2]:

$$\Delta_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}. \quad (2)$$

По результатам измерений была проведена аттестация точности позиционирования координатных осей согласно [17] и получены сертификаты калибровки обрабатывающих центров как средств измерений. После замены режущего инструмента на измерительную головку такая аттестация позволяет измерять обработанные детали непосредственно на станке, не перенося их на КИМ, что существенно увеличивает производительность и повышает точность контрольных операций в результате сохранения единства технологических и измерительных баз, уменьшения времени ожидания выравнивания температуры детали и стола КИМ и ряда других факторов.

Визуализация распределения объемных геометрических погрешностей в рабочем пространстве станка. Автором статьи разработано программное обеспечение (ПО) для визуализации распределения объемной погрешности в рабочем пространстве обрабатывающего центра. Этапы работы ПО следующие:

на основании результатов измерений параметрических функций объемной геометрической погрешности определяют значения объемных погрешностей по координатным осям (1), а также абсолютную полную объемную геометрическую погрешность в точках рабочего пространства (2), заданных с определенным шагом;

каждому значению модуля геометрической погрешности присваивают цвет в соответствии с цветовой шкалой, например, от меньшей погрешности к большей — от зеленого до красного, либо от черного до белого;

на экран компьютера выводят изометрическую проекцию рабочего пространства обрабатывающего центра с точками, раскрашенными в соответствии со значением объемной погрешности.

На рис. 2 представлены черно-белые диаграммы распределения объемной погрешности в рабочем пространстве станка. Цветовая шкала приведена в микрометрах: черным показаны точки рабочего пространства при объемной погрешности $\Delta \leq 20$ мкм, темно-серым $\Delta \leq 40$ мкм, светло-серым $\Delta \leq 60$ мкм.

Согласно [17] для измерений геометрических погрешностей в рабочем пространстве следует брать не менее 5 точек на каждой координатной оси. Для большей репрезентативности эксперимента в рабочем пространстве исследуемых обрабатывающих центров была выбрана сетка точек со следующими параметрами: ось X — (40—880) мм, шаг 40 мм; ось Y — (30—450) мм, шаг 20 мм; ось Z — (5—505) мм, шаг 25 мм. Итого — измерения проведены в $22 \cdot 22 \cdot 21 = 10164$ точках.

На диаграмме (см. рис. 2, а) отображены области рабочего пространства с различными значениями Δ . По такой диаграмме можно сделать вывод о точностных характеристиках станка и дать рекомендации по расположению детали в определенной области рабочего пространства для достижения заданной точности как обработки, так и последующих измерений.

Коррекция объемной геометрической погрешности. Современные системы ЧПУ и системы автоматизированной подготовки производства осуществляют программную коррекцию погрешностей многокоординатных систем. Она может выполняться различными способами:

компенсацией погрешностей вследствие изменения готовой управляющей программы обработки детали;

вводом в систему ЧПУ поправок на рассчитанные значения погрешностей для их автоматической компенсации в процессе работы;

вводом поправок на этапе подготовки производства: сдвига системы координат на величину, необходимую для компенсации погрешностей.

В данной работе использовали последний способ введения поправок на этапе подготовки, обеспечивающий минимальные затраты времени и не требующий трудоемких изменений в системе ЧПУ или управляющей программе. Также этот способ реализован в ряде программных продуктов, используемых в настоящее время на машиностроительных предприятиях, например, фирмы «Delsam» [18].

Авторами проведен машинный эксперимент для демонстрации возможностей применяемых принципов коррекции объемной погрешности, состоявший из четырех последовательных действий.

1. Для всех выбранных точек рабочего пространства определяли объемные погрешности Δ по координатным осям и абсолютную полную объемную геометрическую погрешность Δ_i по (1), (2).

2. Начало в системе координат станка сдвигали на величину погрешностей по соответствующим осям, рассчитанным для некоторой k -й точки рабочего пространства. Таким образом, при выполнении системой ЧПУ подготовленной программы объемная погрешность в выбранной точке Δ_k пол-

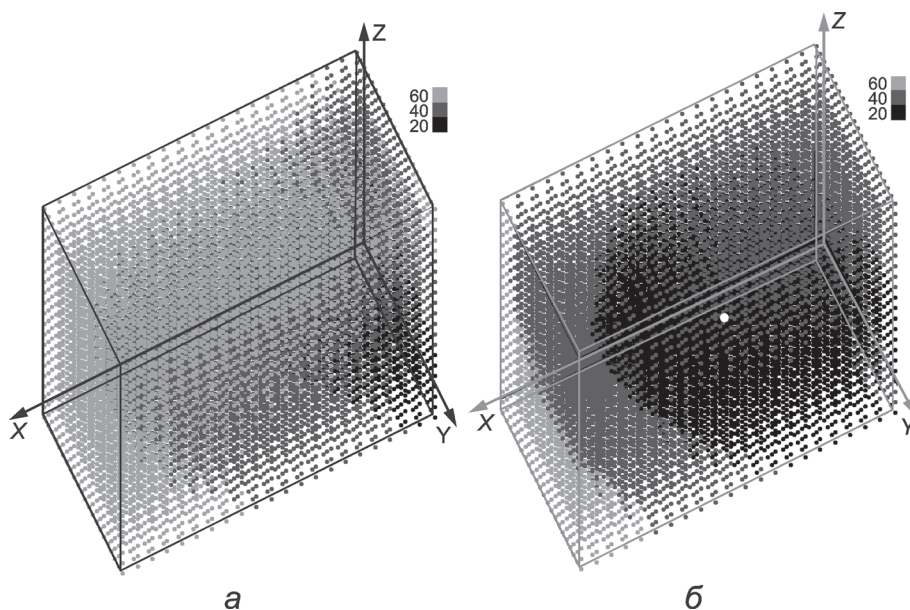


Рис. 2. Диаграммы распределения объемной погрешности в рабочем пространстве станка до (а) и после (б) коррекции

ностью компенсируется сдвигом начала координат и равняется нулю.

3. В остальных точках рабочего пространства координатные составляющие объемной погрешности изменяются на величину сдвига начала координат, что приводит к изменению распределения полной геометрической погрешности в рабочем пространстве машины (как к уменьшению, так и к увеличению Δ_i во всех точках рабочего пространства машины).

4. Действия по пп. 2, 3 повторяли для каждой i -й точки рабочего пространства. Результатом такого перебора явилось нахождение такой точки, при внесении коррекции по которой суммарное значение модулей объемных погрешностей для всех точек рабочего пространства будет минимальным, т. е.

$$\sum_i \Delta_i \rightarrow \min. \quad (3)$$

Условие (3) позволяет получить минимальную погрешность позиционирования в максимальной зоне рабочего пространства машины.

В проведенном эксперименте точкой, соответствующей условию (3), оказалась точка А с координатами $x = 440$ мм, $y = 230$ мм, $z = 180$ мм. На рис. 2, б показано распределение объемной погрешности после такой коррекции, белым цветом отмечено расположение точки А.

Сравнив рис. 2, а, б, видим существенное увеличение черной области рабочего пространства с более низкой объемной погрешностью $\Delta \leq 20$ мкм. Если в исходном состоянии исследуемых обрабатывающих центров (см. рис. 2, а) доля таких точек составляла 7,6 %, то после коррекции (см. рис. 2, б) она заняла более 30 % объема рабочего пространства машины.

Выбранная методика коррекции погрешности дает возможность путем последовательного перебора точек, по которым корректируется погрешность, изменять распределение погрешности для получения ее минимального значения в интересующей технолога области рабочего пространства станка или измерительной машины.

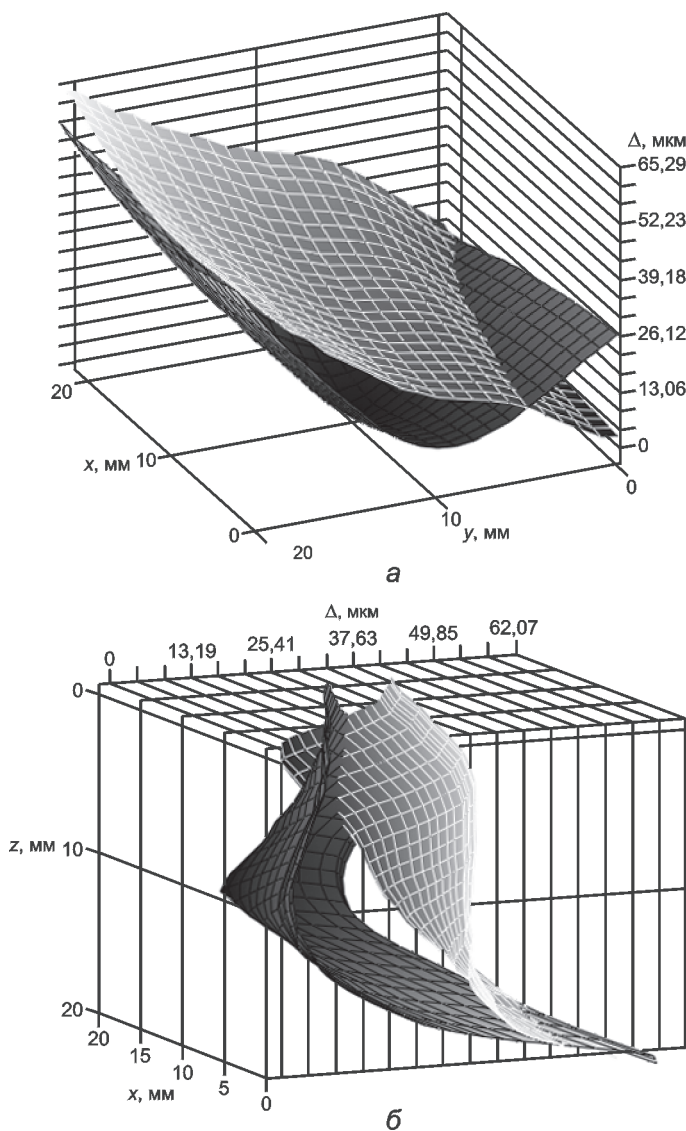


Рис. 3. Результаты коррекции погрешности по направлениям обработки:

а — параллельном плоскости XY , $z = 5$ мм; б — параллельном плоскости XZ , $y = 30$ мм

Следует отметить, что предложенная методика предъявляет невысокие требования к аппаратному обеспечению для осуществления необходимых вычислений. Полный перебор 10164 точек занял не более 40 с при использовании широко доступного процессора класса Pentium IV. Таким образом стала возможной коррекция в реальном масштабе времени.

Трансформация описанной выше методики на двумерную задачу открывает возможность управления коррекцией в заданном направлении обработки. На рис. 3, а, б приведены примеры снижения погрешностей в направлениях обработки, параллельных плоскостям XY , XZ . По осям X , Y (см. рис. 3, а), X , Z (см. рис. 3, б) отложен номер контрольной позиции вдоль соответствующей оси, а по осям Z (см. рис. 3, а), Y (см. рис. 3, б) — полная объемная погрешность Δ в данной точке. Поверхности с белой сеткой соответствуют по-

грешности до коррекции, поверхности с черной сеткой — после. На рисунках показано, что поверхности с черной сеткой ближе к базовой плоскости, чем поверхности с белой сеткой, т. е. полная геометрическая погрешность в соответствующих точках меньше.

Тем самым появляется возможность электронного управления геометрической точностью в реальном времени в заданном направлении обработки [2].

Выводы. Принципы коррекции геометрической погрешности, примененные в работе, позволили существенно повысить точностные характеристики измерительного и технологического многокоординатного оборудования. Визуализация распределения погрешностей в рабочем пространстве дает возможность наглядно оценить точностные характеристики машины. Внесение коррекции по различным точкам рабочего пространства станка привело к изменению распределения объемной геометрической погрешности для достижения требуемых точностных параметров измерений и обработки в заданной области рабочего пространства с высокой производительностью.

Более совершенные алгоритмы оптимальной коррекции, основанные на градиентных методах, и алгоритмы расчетов в реальном масштабе времени, будут рассмотрены в последующих работах.

Литература

1. McKeown P. A., Loxham J. Some Aspects of The Design of High Precision Measuring Machines // Ann. CIRP. 1973. V. 22. N 1. P. 139—140.
2. Телешевский В. И., Соколов В. А. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 3—37; Teleshevskii V. I., Sokolov V. A. Laser correction of geometric errors of multi-axis programmed-controlled systems // Measurement Techniques. 2012. V. 49. N 5. P. 535—541.
3. 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.
4. Grigoriev S. N., Teleshevsky V. I., Sokolov V. A. Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction Proc. int. conf. comp. manuf. «COMA13», Stellenbosch, South Africa. P. 301—306.
5. Schwenke H. e. a. Geometric error management and compensation of machines — an update // Ann. CIRP. 2008. N 57. P. 660—675.
6. Косинский Д. В., Телешевский В. И., Соколов Г. А. Гетеродинные методы лазерной интерферометрии на основе дифракции Френеля // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 7—10; Kosinskii D. V., Teleshevsky V. I., Sokolov V. A. Heterodyne laser interferometric techniques based on Fresnel diffraction // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 859—864.
7. Гришин С. Г. Анализ поляризационной составляющей погрешности измерения в гетеродинных лазерных интерференционных измерительных системах // Метрология. 2011. № 12. С. 19—34; Grishin S. G. An analysis of the polarization component of the measurement error in heterodyne laser interferometer measurement systems // Measurement Techniques. 2012. V. 54. N 12. P. 1378—1387.
8. Teleshevsky V. I., Grishin S. G. Digital transformations of the phase measurement information in the high resolution heterodyne laser interferometry // Lasers for Measurements and Information Transfer. SPIE-Int Soc. Optical Eng., 2008. C. E60.

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

** 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].