УДК 621.9.08

ГАБАРИТЫ КОНТРОЛИРУЕМЫХ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАК ВЛИЯЮЩИЙ ФАКТОР ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ КООРДИНАЦИОННО-ПОЗИЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

© 2012 А. О. Чевелёва, М. А. Болотов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассматривается влияние габаритных размеров поверхностей на погрешность измерения их координационно-позиционных параметров, таких как координата центральной точки и направляющие косинусы нормального вектора, в случае размерного контроля на координатно-измерительной машине портального типа DEA GLOBAL PERFORMANCE 07.10.07. В ходе исследований получены зависимости оценок упомянутых геометрических параметров от диагонали образца и числа точек.

Координатно-измерительная машина, обобщённая методика моделирования, метод Монте-Карло, инструментальная погрешность, погрешность измерения.

Значительное количество деталей ГТД образовано плоскими поверхностями. Точность исполнения геометрических параметров (линейно-угловых, отклонения формы и расположения), относящихся к плоским поверхностям деталей ГТД, оказывает значительное влияние на эксплуатационные и функциональные характеристики ГТД. Наряду с традиционными универсальными и специализированными средствами контроля существуют средства измерения, основанные на координатном методе измерения.

Координатный метод измерения основан на дискретной замене реальных поверхностей деталей вычисляемыми заменяющими элементами. В качестве таких элементов выступают простейшие геометрические элементы (ГЭ): линия, плоскость, окружность, цилиндр и т.д. Параметры ГЭ вычисляются исходя из информации об измерениях координат конечного числа точек реальной поверхности, получаемых с использованием координатно-измерительных машин (КИМ). Для плоских поверхностей такими параметрами являются: отклонение от плоскостности, координаты базовой точки (X_0,Y_0,Z_0) и вектора нормали ($cos(\alpha),cos(\beta),cos(\gamma)$) (рис.1). Полученные параметры плоских поверхностей используются для расчёта геометрических параметров (ГП) размерных комплексов, образуемых рядом поверхностей, а также параметров детали (например, расстояние между торцами).

Ставится задача оценки погрешности измерения координационно-позиционных параметров плоских поверхностей (X_0,Y_0,Z_0; ($cos(\alpha),cos(\beta),cos(\gamma)$)) от двух факторов: габаритов плоских поверхностей и количества измеряемых точек на них. Отметим, что при выполнении контроля количество измеряемых точек является регулируемым фактором, влияющим на трудоёмкость.

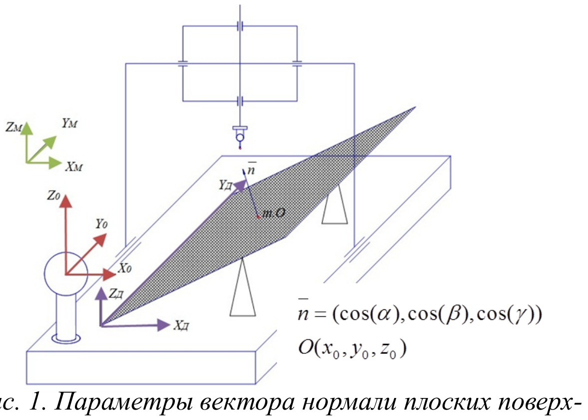


Рис. 1. Параметры вектора нормали плоских поверхностей, рассчитываемых при измерении на КИМ: $X_MY_MZ_M$ – абсолютная система координат машины; $X_0Y_0Z_0$ –относительная система координат машины; $X_ДY_ДZ_Д$ – система координат детали

Трёхосевая КИМ представляет собой кинематическую систему, имеющую возможность позиционирования измерительного наконечника по трём осям в пределах рабочего объёма (рис.1). Для КИМ портального типа инструментальная погрешность КИМ (составляющая погрешности измерения) прямо пропорциональна длине измеряемой поверхности:

$$\Delta_{инстр} = A + \frac{L}{K}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

где L – длина измеряемой поверхности, мм; A – положительная постоянная, выраженная в микрометрах и заданная заводом - изготовителем;

K – безразмерная положительная постоянная, заданная заводом-изготовителем.

Исследования проводились путём имитирования процесса измерения, математическая модель (рис. 2) которого была реализована в пакете MATLAB® и основана на методе Монте-Карло [1].

Рис.2. Блок-схема методики моделирования процесса измерения

Для получения данных об исходном «облаке точек» в пакете MATLAB® также были смоделированы точки поверхностей, координаты которых содержат информацию о номинальной геометрии поверхности и инструментальной погрешности КИМ, распространяемую по нормали к поверхности:

$$t_{(u,v)}=t_{0(u,v)} + \Delta_{инстр}, \quad (2)$$

где $t_{(u,v)}$ – координаты имитируемой поверхности;

u,v – локальные параметрические координаты поверхности;

$t_{0(u,v)}$ – координаты номинальной геометрии поверхности;

$\Delta_{инстр}$ – погрешность измерения средства координатных измерений.

С целью накопления статистики по исследуемым случайным величинам повторение эксперимента составило 10000 раз. План эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1. План эксперимента

Параметр	Значение
Угол относительно стола машины, ^{0}	0
Габариты плоскостей, мм^2	П1: 40 × 75 $П_{i=2…7}$: $П_{i-1}$ × 1,5
Закон распределения моделируемой инструментальной погрешности	Нормальный, равновероятностный [2]
Величина инструментальной погрешности КИМ ($\Delta_{инстр}$, мкм)	*1,7+L/333*,
Правило расположения точек контроля по поверхности	Неупорядоченная выборка [3]
Число точек контроля	4, 5, 6, 8, 9, 15, 17, 20, 21, 25, 26, 30, 32, 40, 44, 50, 75, 80, 85, 100

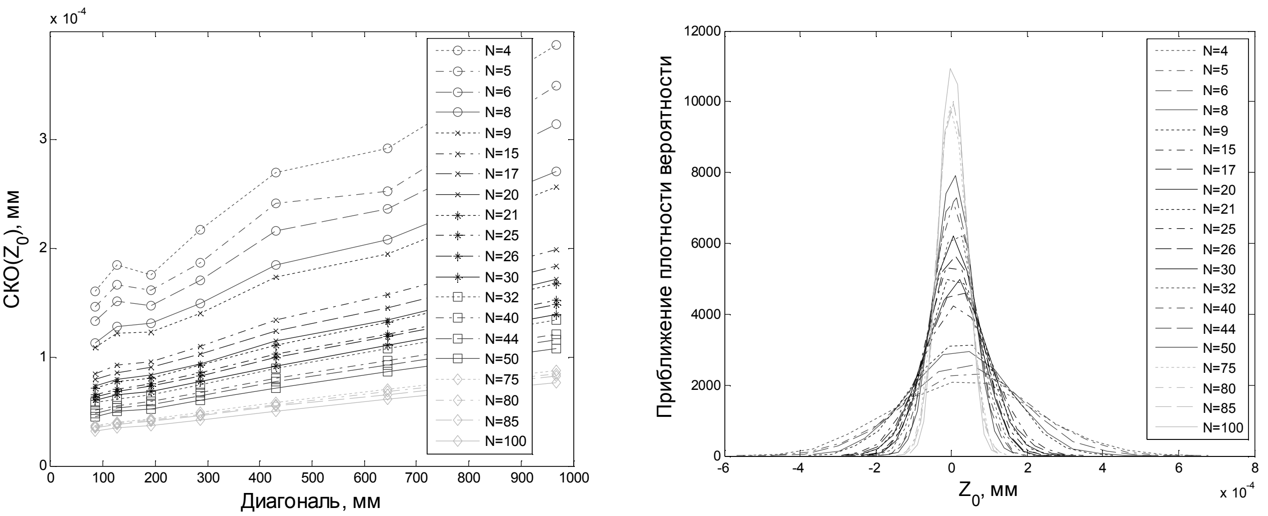
Анализ результатов проводился на основе полученных графиков среднеквадратического отклонения (СКО) для каждой случайной величины, которое является числовой характеристикой рассеивания. Кроме того, в случае соответствия распределения случайной величины нормальному закону СКО используется при вычислении величины предельной погрешности измерения ГП, вычисляемое как удвоенное значение расширенной неопределенности *Up*:

$$U_p = k_p \times u_c(x), \qquad (3)$$

где k_p – коэффициент охвата (для 95% доверительной вероятности равен 1,96);

$u_c(x)$ – стандартная неопределённость измеряемой величины, оценкой которой является СКО.

Согласно рис.2,а СКО случайной величины «аппликата Z_0» увеличивается с возрастанием диагонали образца, что объясняется возрастанием погрешности $\Delta_{инстр}$ машины. Аналогичные зависимости наблюдаются в случае распределения инструментальной погрешности по равновероятностному закону, но с более сглаженным характером графиков.



а б

Рис. 2. Графики случайной величины «аппликата Z_0» в случае распределения инструментальной погрешности по нормальному закону для горизонтальной плоскости:
а – СКО от диагонали образца; б – приближение плотности вероятности

С целью исследования природы изломов, присутствующих на графиках опытов, проводимых при небольшом числе точек контроля, был проведён эксперимент. Вторая с позиции габаритов плоскость генерировалась повторно (5 раз) с расстоянием между точками, равным 1,5 мм, и инструментальной погрешностью, распределенной по нормальному закону. Таким образом, для пяти плоскостей с габаритами 60 × 112,5 мм^2 проводился опыт при постоянстве остальных параметров эксперимента. В результате опыта (рис. 3) погрешность математической модели составила 0,054 мкм. Можно сделать вывод, что необходимо использовать как можно большее число точек моделируемой поверхности, а графики СКО допускается аппроксимировать линией на всей области определения.

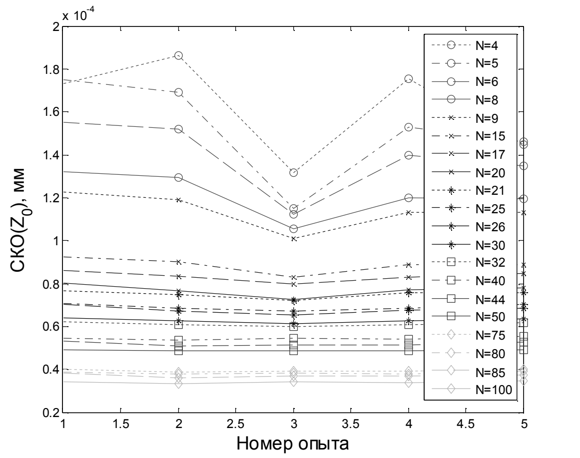
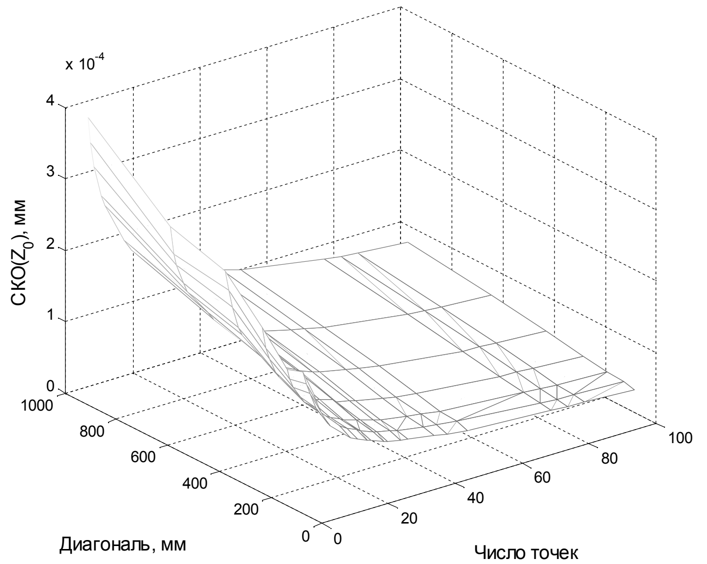


Рис. 3. СКО случайной величины «аппликата Z_0» для пяти экспериментов, проводимых для плоскости $П_2$, в случае распределения инструментальной погрешности по нормальному закону

Поскольку при проверке критерием Колмогорова-Смирнова в большинстве случаев подтвердился нормальный характер случайной величины «аппликата Z_0», то для нахождения практического поля рассеивания можно использовать выражение (3). На рис. 2,б представлен график приближения плотности вероятности, позволяющий наглядно судить о форме закона распределения.

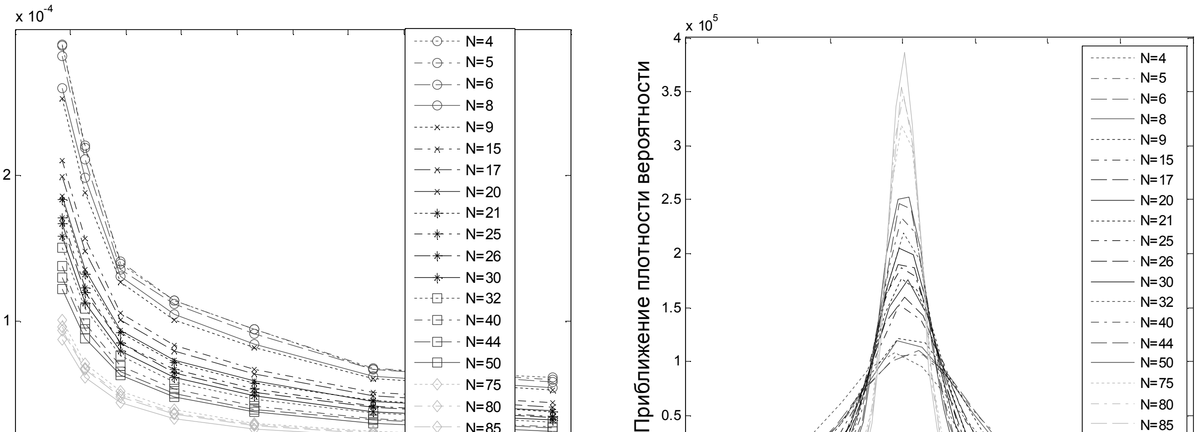
Построена зависимость СКО случайной величины «аппликата Z_0» от диагонали образца и числа точек контроля, а также проведена аппроксимация полученной поверхности (рис.4).



Коэффициенты:
p_{00} = 0.0001274
p_{10} = -3.169e-006
p_{01} = 2.415e-007
p_{20} = 2.3e-008
p_{11} = -5.253e-009
p_{02} = -4.866e-011
p_{21} = 3.897e-011
p_{12} = -1.009e-013
p_{03} = 3.192e-014
Степень согласия:
R-квадрат: 0.9152

Рис. 4. Зависимость СКО случайной величины «аппликата Z_0» от диагонали образца и числа точек контроля в случае распределения инструментальной погрешности по нормальному закону:
$$СКО_{Z_0}(N,l)=p_{00}+p_{10}\times N+p_{01}\times l+p_{20}\times N^2+p_{11}\times N\times l+p_{02}\times l^2+p_{21}\times N^2\times l+p_{12}\times N\times l^2+p_{03}\times l^3,$$
N – число точек, l – длина диагонали, мм

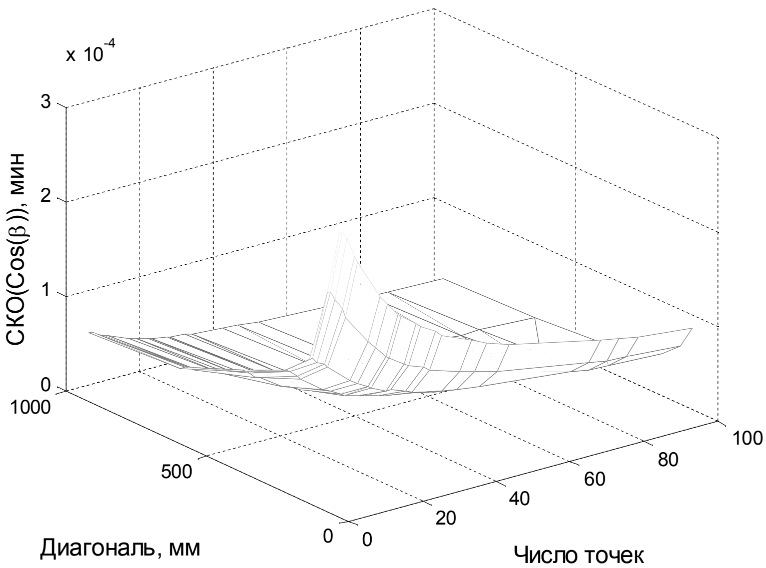
СКО углового параметра (рис.5,а) имеет тенденцию к уменьшению, поскольку увеличивается площадь измеряемой поверхности и приводит к увеличению базы. Исходя из результатов исследования, можно сделать вывод, что при расчёте геометрических параметров углового расположения необходимо выбирать как можно большую измеряемую базу плоскостей. Для направляющих косинусов cos(α) и cos(γ) наблюдается аналогичный характер зависимости.



а б

Рис. 5. Графики случайной величины «направляющий косинус cos(β)» в случае распределения инструментальной погрешности по нормальному закону для горизонтальной плоскости:
а – СКО от диагонали образца; б – приближение плотности вероятности

Аналогично вышеупомянутой величине, для случайной величины «направляющий косинус cos(β)» построен график приближения плотности вероятности (рис.5,б) и проведена аппроксимация полученной зависимости (рис. 6).



Коэффициенты:
p_{00} = 0.0003697
p_{10} = -6.497e-006
p_{01} = -1.252e-006
p_{20} = 6.929e-008
p_{11} = 7.974e-009
p_{02} = 1.843e-009
p_{30} = -2.757e-010
p_{21} = -2.809e-011
p_{12} = -3.641e-012
p_{03} = -9.005e-013
Степень согласия:
R-квадрат: 0.9609

Рис. 6. Аппроксимация зависимости «аппликата Z_0»:
$СКО_{Zo}\,(N,l)=p_{00}+p_{10}\times N+p_{01}\times l+p_{20}\times N^2+p_{11}\times N\times l+p_{02}\times l^2+p_{30}\times N^3+p_{21}\times N^2\times l+p_{12}\times N\times l^2+p_{03}\times l^3$,
N − число точек, l − длина диагонали, мм

Полученные зависимости могут использоваться для прогнозирования погрешностей измерения координационно-позиционных параметров плоских поверхностей.

С увеличением числа точек контроля СКО всех параметров уменьшается – наблюдается эффект фильтрации погрешности.

Библиографический список

1. Соболь, М.И. Метод Монте-Карло [Текст] / М.И. Соболь; изд. 2-е, испр. – М.: Наука. 1972. – 63 с.

2. МИ 2232-2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации.

3. Чевелева, А.О. Имитационные алгоритмы генерации разреженных выборок контролируемых точек при координатных измерениях [Текст] / А.О. Чевелева, М. А. Болотов // Региональная научно-практическая конференция, посвящённая 50-летию первого полёта человека в космос. Самара, 14-15 апреля 2011 г.: тез. докл. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.− С. 145-146.

DIMENSIONS OF CONTROLLED ON CMM FLAT SURFACES AS AN INFLUENCING FACTOR OF THEIR COORDINATE-POSITIONAL PARAMETERS MEASUREMENT ERRORS

© 2012 A. O. Cheveleva, M. A. Bolotov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this paper the influence of dimensional characteristics of flat surfaces on the coordinate measuring accuracy of their geometric parameters, such as central point coordinates and angular coordinates of the normal vector, is researched in case of dimensional measurement on bridge-type CMM DEA GLOBAL PERFORMANCE 07.10.07. Dependences of considered geometric parameters on control point number and pattern diagonal are obtained.

Coordinate measuring machine, generalized modeling methodology, Monte-Carlo method, instrumental error, measurement error.

Информация об авторах

Чевелёва Анастасия Олеговна, магистр, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Область научных интересов: координатные измерения.

Болотов Михаил Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: maikl_bol@rambler.ru. Область научных интересов: координатные измерения.

Cheveleva Anastasia Olegovna, magister, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Area of Research: coordinate measurement.

Bolotov Michael Alexandrovich, engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: maikl_bol@rambler.ru. Area of Research: coordinate measurement.