Машиностроение. Металлообработка

УДК 62.181.1 DOI: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.675-685

МОДЕЛЬ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. В. Рузанов

Кафедра производства двигателей летательных аппаратов ФГАО УВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара; vadim.pechenin2011@yandex.ru

Ключевые слова: вероятность; измерительный наконечник; интервальная оценка; координатные измерения; лопатка; оптимизационный алгоритм.

Аннотация: Измерения с помощью контактного координатного метода являются наиболее точными и часто применяемыми в современном аэрокосмическом производстве и относятся к косвенным методам. Представлена математическая модель, которая позволяет оценить точность контактного измерения сложных криволинейных поверхностей на координатно-измерительных машинах, где применены два оптимизационных алгоритма и проведено сравнение их производительности. Оценены возникающие погрешности определения точек контакта при измерении поверхностей пера лопатки компрессора газотурбинного двигателя. Получены зависимости погрешностей измерений в виде наиболее вероятных и предельных интервальных оценок для любой измеряемой точки поверхности.

Введение

Для измерения сложных поверхностей в промышленности широко применяются координатно-измерительные машины (**КИМ**), которые могут быть оборудованы контактными и бесконтактными измерительными системами. Координатно-измерительные машины являются универсальными и позволяют измерять точки поверхности различных деталей с высокой точностью. Когда точность измерения сложной поверхности имеет решающее значение для работы изделия (лопатки газотурбинных двигателей (**ГТД**)), измерения, как правило, проводятся на КИМ, реализующих контактный метод измерения.

Контактный метод измерения проводится посредством касания измерительного наконечника, как правило сферической формы, о поверхность измеряемой детали или изделия. На промежуточном этапе в программное обеспечение КИМ сохраняются координаты измеренных точек, образуя облако точек, по которому определяют поверхности, плоскости, линии и точки детали, необходимые для расчета геометрических параметров изделия. При измерении поверхностей, имеющих сложную геометрическую форму, не описываемую геометрическими примитивами, точность контактных измерений на КИМ определяется как факто-



Рис. 1. Погрешность измерения поверхности 1 измерительным наконечником 3: a – несовпадением номинального направления нормали 7 САD-поверхности 2 и реального в точке поверхности; δ – несовпадением вектора нормали 8 эквидистантной поверхности 6 и измеряемой поверхности 1 (4 – точка касания, 5 – измеренная точка)

рами внешней среды и конструкцией КИМ, так и особенностями измеряемой детали. Одними из ключевых факторов, влияющих на точность измерения, являются радиус измерительного наконечника и кривизна поверхности самой детали.

Чем выше кривизна измеряемой поверхности и больше радиус измерительного наконечника, тем больше возникающая при измерении погрешность определения фактических координат точек детали. Подходом, позволяющим расчитать величину возникающей погрешности, является математическое моделирование процесса измерения.

Изготавливаемые поверхности сложной формы всегда отличаются от их САД-моделей на величину отклонений формы и расположения [1]. Из-за этих отклонений координаты точки на измерительном наконечнике, рассчитываемые по нормали к САД-модели из координаты центра наконечника, вычисляются с погрешностью. На рисунке 1, *а* представлена схема измерения криволинейной поверхности, имеющей отклонения формы и расположения.

Зачастую в практике координатных измерений геометрических параметров детали отсутствует эталон сравнения для измеренных элементов (САД-модель) (см. рис. 1, δ). В этом случае компенсация радиуса измерительного наконечника производится по нормалям к офсетной поверхности, заданной точками центров измерительного наконечника.

В работе представлено исследование погрешности компенсации радиуса измерительного наконечника при измерении поверхностей спинки и корыта пера лопатки компрессора ГТД при отсутствии САД-поверхности сравнения. Создана модель, имитирующая процесс координатных измерений, которая позволяет имитировать отклонение формы поверхности, рассчитывать координаты точек касания, центры измерительных наконечников и координаты точек компенсации из этих центров. На *первом* этапе проведено исследование зависимости погрешностей от величин радиусов измерительного наконечника и числа точек измерения. На *втором* этапе для оптимальной схемы измерения при радиусе измерительного наконечника 1 мм рассчитаны характеристики случайных функций для отклонений координат рассчитанных точек от действительной точки касания по измеряемым поверхностям.

Математическое описание поверхностей свободной формы

Для построения модели координатных измерений необходимо математически описать измеряемые поверхности деталей и соответствующие им CAD-модели. При этом необходимо, чтобы соблюдалось условие C^2 гладкости во всех точках описываемых поверхностей. В данной работе используется инструмент, являю-

676

щийся стандартом для описания поверхностей свободной формы в программах CAD – NURBS-поверхности [2], уравнение которых можно записать как

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} h_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} h_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)},$$
(1)

где u – параметр для вычисления координат точек сплайна, изменяющийся в диапазоне $[t_{k-1}, t_{n+1}]$; t – узловые значения параметра, у которых функции $N_{i,k}(u)$ не равны нулю; h_i – однородные координаты задающих точек; $P_{i,j}$ – координаты (x_i, y_i, z_i) *i*-й задающей точки в трехмерном пространстве; $N_{i,k}(u)$ – базисные функции (или сопряжения) сплайна в параметрическом направлении; k – степень кусочного сплайна в направлении параметра u; v – параметр для вычисления координат точек сплайна, изменяющийся в диапазоне $[s_{l-1}; s_{m+1}]$; s – узловые значения параметра, у которых функции $N_{j,k}(v)$ отличаются от нуля; l – степень кусочного сплайна в направлении параметра v.

Накладываемое отклонение формы

Точки измеряемых поверхностей моделировались из номинальных путем добавления к координатам точек номинальных поверхностей спинки и корыта отклонения формы. Величины отклонений формы подбирались исходя из статистических наблюдений для серии лопаток.

Таким образом, координату точки измеренной поверхности можно выразить формулой

$$\overline{P}_{\text{meas}} = \overline{P}_{\text{CAD}} + \overline{N}_{1\times 3} dF, \qquad (2)$$

где \overline{P}_{meas} , \overline{P}_{CAD} – вектор координат точек (*x*, *y*, *z*) измеряемой (моделируемой) и номинальной поверхностей соответственно; $\overline{N}_{1\times 3}$ – вектор нормали в точке \overline{P}_{CAD} ; dF – величина отклонения формы в точке \overline{P}_{CAD} ;

В практике производства деталей встречаются две составляющих отклонения формы: систематическое и случайное δ_r . Соответственно в модель измеряемой поверхности закладывались два типа отклонений. Систематические отклонения состоят: из гармонической составляющей отклонения формы δ_s , отклонения формы, связанной с механической обработкой δ_m [3].

Таким образом, общую величину отклонения формы в каждой точке можно записать в виде суммы трех составляющих

$$dF = \delta_s + \delta_m + \delta_r \tag{3}$$

Рассмотрим каждую из этих составляющих.

Гармоническая составляющая отклонения формы. Гармоническое отклонение формы может быть аппроксимировано с использованием композиции функций синуса и косинуса

$$\delta_s = A\sin(w_x x + w_y y + \varphi_{\sin}) + B\cos(w_x x + w_y y + \varphi_{\cos}), \tag{4}$$

где A и B – амплитуды составляющих синуса и косинуса; w_x задано как $k_x 2\pi/L_x$; w_y задано как $k_y 2\pi/L_y$; k_x , k_y – частоты гармонических компонент вдоль осей OX и OY соответственно; L_x , L_y – опорные длины вдоль осей OX и OY соответственно; ϕ_{sin} , ϕ_{cos} – фазы угла синуса и косинуса.

Составляющая отклонения формы, связанная с механической обработкой. Отклонение формы, связанное с обработкой, возникает в результате измерения кривизны обрабатываемого объекта при контакте режущего инструмента о поверхность. Распределение этой погрешности можно вычислить, основываясь на значениях средней кривизны:

$$\delta_m = A_m (i_s - 0, 5), \tag{5}$$

где *A_m* – максимальная погрешность обработки.

Индекс рассчитывается по формуле:

$$i_s = (H - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min}),$$
 (6)

где H, H_{max} и H_{min} – значение средней кривизны в точке поверхности, минимальное и максимальное значение средней кривизны по всей поверхности соответственно.

Средняя кривизна представляет собой полусумму двух главных кривизн поверхности и для бипараметрических поверхностей (1) задается выражением [4]:

$$H = \frac{A|Q_{v}|^{2} - 2BQ_{u}Q_{v} + C|Q_{u}|^{2}}{2|Q_{u}Q_{v}|^{3}},$$
(7)

где $A = |Q_u Q_v| Q_{uu}$, $B = |Q_u Q_v| Q_{uv}$, $C = |Q_u Q_v| Q_{vv}$, Q_u, Q_v – частные производные второго порядка уравнения (1); Q_{uu}, Q_{vv}, Q_{uv} – частные производные второго порядка уравнения (1).

Случайная составляющая отклонения формы. Случайные погрешности вызываются многочисленными факторами, малыми по своему индивидуальному влиянию на результат, которые не могут быть учтены при проведении опыта. Наличие случайных ошибок измерения проявляется при многократных повторных измерениях одной и той же неслучайной величины в том, что результаты измерения оказываются различными. Рассеяние результатов таких измерений обычно подчиняется нормальному закону Гаусса. Формы значения случайной составляющей отклонения δ_r рассчитывались с максимальной амплитудой 0,005 мм.

Расчет координат точек касания и центров измерительного наконечника. Создана модель процесса измерения, позволяющая производить оценку возникающей погрешности определения точки касания измерительного наконечника о поверхности деталей.

Алгоритм поиска точки касания и измеренных точек на измерительном наконечнике содержит следующие этапы:

1) определяются координаты точек измерения на поверхности, заданной уравнением (1);

2) через измеряемые точки строятся нормали к измеряемой поверхности;

 по нормалям к измеряемой поверхности движется измерительный наконечник до касания с поверхностью.

Для расчета координат точек касания измерительного наконечника о поверхность детали в декартовой системе координат используется базовый метод, предложенный [5]. Для каждой точки проводится поворот системы координат таким образом, что нормаль движения измерительного наконечника совмещается с осью *Z*. Для этого проводится два последовательных разворота координат точек поверхностей вокруг координатных осей *OX* и *OY* на соответствующие углы наклона нормали. После этого проводится поиск минимального значения целевой функции в новой системе координат

$$f(x, y) = \left| z_o - z_n \right| \to \min,$$
(8)

где z_o и z_n – координаты точки на поверхности щупа и измеряемой поверхности по оси Z.

Координаты *x* и *y* точек измеряемой поверхности и измерительного наконечника совпадают и подчиняются ограничениям:

$$\begin{aligned} |Q_x - x| &\leq R; \quad |Q_y - y| \leq R; \\ x \in E_x; \quad y \in E_y, \end{aligned}$$

$$\tag{9}$$

где R – величина радиуса измерительного наконечника; E_x , E_y – области определения измеряемой поверхности в плоскости *XOY*; O_x , O_y – координаты центра измерительного наконечника по осям *OX* и *OY*.

Базовым алгоритмом поиска координаты точки касания является метод равномерного поиска, заключающийся в итерационном разбиении области поиска на *N* равных интервалов и поиске в них значения целевой функции и выборе наилучшего результата в качестве решения [6]. Более эффективным алгоритмом, примененным в разработанной модели, является метод последовательного квадратичного программирования. При реализации этого метода расчета значений целевой функции с использованием квадратичной аппроксимации предполагается, что в ограниченном интервале можно аппроксимировать функцию квадратичным полиномом, а затем использовать построенную аппроксимационную схему для оценивания координаты точки истинного минимума функции [7];

4) рассчитываются координаты центров щупа *O*, лежащих на нормалях (п. 2). По координатам точек *O* задается эквидистантная к измеренной поверхность по формуле (1). На основании уравнения эквидистантной поверхности переопределяются направляющие векторы нормалей в точках *O* и рассчитываются координаты измеренных точек, отстоящих от точек *O* на расстоянии радиусов измерительного наконечника вдоль нормалей к эквидистантной поверхности;

 расстояние между точками на действительной поверхности характеризует погрешность компенсации радиуса измерительного наконечника.

Сравнение двух методов производительности работы алгоритмов поиска параметров касания представлено ниже:

Число точек измерения	4	8	16	32	64
Равномерный поиск, с	45,76	89,01	183,05	369,31	741,45
Последовательное квадратичное программирование, с	0,69	1,16	2,33	4,41	8,18
Отношение производительности двух методов, %	. 66,57	76,49	78,52	83,69	90,64

Применяемая методика измерения

При моделировании процесса измерения поверхностей использовалась наиболее простая и применяемая в практике стратегия – равномерное распределение контрольных точек по измеряемой поверхности [8]. Точки распределялись равномерно в параметрическом пространстве. Соответственно по параметрическим направлениям u и v (1) рассчитывались минимальные u_{\min} и v_{\min} и максимальные u_{\max} и v_{\max} значения параметров в соответствии с отступами, затем эти области равномерно разделялись на отрезки в соответствии с числом точек измерения. Соответственно координаты *i*-й точки измерения (u_i, v_i) рассчитывались исходя из уравнений:

$$\begin{cases} u_i = u_{\min} + (i-1)\frac{u_{\max} - u_{\min}}{n_u - 1}, \\ u_i = u_{\min} + (j-1)\frac{v_{\max} - v_{\min}}{n_v - 1}, \end{cases}$$
(10)

где n_u , n_v – число точек измерения по направлениям u и v соответственно; $i = 1, ..., n_u; j = 1, ..., n_v$.

При проведении моделирования процесса измерения для начальных и конечных точек по направлениям *u* – *v* производился 5%-й отступ от границ измеряемой поверхности в параметрическом пространстве.

Результаты вычислений погрешностей

Поверхности измерения и соответствующие им номинальные поверхности пера лопаток созданы в программном пакете MATLAB по множеству координат измеренных точек на КИМ DEA Global Performance 07.10.07 и соответствующих им точек, взятых с CAD-модели пера лопатки.

Как отмечалось выше, на *первом* этапе производился выбор оптимального количества сечений *m* и точек измерения *n* в каждом сечении поверхности. Исследовалось влияние величины радиуса измерительного наконечника *R* на возникающую погрешность определения координат точек касания. На рисунке 2 представлены значения максимально возникающих погрешностей компенсации радиуса, получаемые при измерении эталонных поверхностей корыта и спинки пера лопатки. Радиус измерительного наконечника изменяется от 0,5 до 4 мм [9]. Число точек в сечении изменялось от 10 до 56, Число сечений от трех до шести. Эталонная поверхность задавалась по трем сечениям. На основании проведенных опытов, оптимальное Число сечений составило три и точек в них – 56. Величина



на поверхностях пера лопатки:

а – корыто, *б* – спинка; *n* – число точек измерения, *m* – число сечений



погрешности прямо пропорциональна величине радиуса измерительного наконечника.

На втором этапе было смоделировано 100 поверхностей спинки и корыта, значения отклонения формы которых изменялись по нормальному закону. На основании статистических данных по измерениям этого типа деталей выявлено, что максимальное значение отклонения формы не превышает 0,2 мм. Диапазон изменения амплитуд A и B (4) составил 0,8 мм, диапазон изменения величины A_m (5) принят 0,1 мм. Фазы и частоты (4) гармонической составляющей изменялись по равновероятностному закону. Фазы варьировались в диапазоне от 0 до 360°, частоты принимали значения 1, 2, 3 и 4.

После проведения серии измерений для спинки и корыта выявлено, что распределение значений погрешностей компенсации в каждой точке измерения имеют три основных вида, представленных на рис. 3. Распределение погрешностей в точках подчиняется двум основным законам: нормальному (рис. 3, а) и β-распределению (см. рис. 3, б, в). Для выборки погрешностей в каждой измеренной точке проводился тест Лиллиефорса на непротиворечие распределения генеральной совокупности значений случайной величины нормальному закону [10]. Если распределение соответствовало нормальному закону, то определялись числовые характеристики (математическое ожидание и дисперсия случайной величины) для нормального закона. Если нулевая гипотеза о соответствии нормальному закону по тесту Лиллиефорса отвергалась, то производилось нормирование значений выборки случайных погрешностей в каждой точке диапазона [0,1], и рассчитывались параметры β-распределения. Соответственно в каждой измеренной точке определялось математическое ожидание, а также верхняя и нижняя оценки погрешности измерения координат рассматриваемой точки с доверительной вероятностью 99,73 %.

Таким образом, моделируемые поверхности спинки и корыта представляют собой реализации некоторой случайной функции. Под *случайной функцией* понимают такую функцию, которая для каждого заданного значения аргумента (аргументов) является случайной величиной. Случайная функция содержит в себе информацию о множестве производственных и измерительных ошибок, которые допускаются в процессе изготовления и измерения серии деталей [11].

По полученным точечным значениям средних, нижних и верхних границ распространения погрешности компенсации радиуса измерительного наконечника в параметрических координатах u - v (1) задавались поверхности с помощью билинейной интерполяции (рис. 4).



Рис. 4. Случайные функции погрешностей компенсации радиуса измерительного наконечника для поверхностей корыта (*a*) и спинки (*б*): *1* – средняя; 2 – нижняя; 3 – верхняя поверхность распространения случайной функции

Таким образом, заданы случайные функции, позволяющие предсказывать средние и предельные величины погрешности определения координат точек при измерении внутри границ полученных поверхностей.

Заключение

Предложена модель оценки погрешности координатных измерений, возникающая из-за ошибок компенсации радиуса измерительного наконечника. Модель воспроизводит условия измерения поверхностей сложной формы при отсутствии САD-модели (эталона сравнения). Представленная модель позволяет прогнозировать максимальное, минимальное и среднее значения погрешностей в любой точке измеряемой поверхности. При расчете погрешностей можно также изменять величину радиуса измерительного наконечника. Величина погрешности при увеличении радиуса возрастает линейно.

С помощью модели выполнены расчеты погрешностей, возникающих на поверхностях спинки и корыта пера лопаток компрессора авиационного двигателя.

Вычисление прогнозных значений включает в себя следующие действия:

1) расчет оптимального числа точек измерения для эталонной поверхности;

 имитацию отклонения формы для эталонной поверхности при получении множества реализаций измеряемых поверхностей. Параметры отклонения формы изменяются в задаваемых диапазонах по нормальному закону распределения;

 расчет возникающих погрешностей измерения координат точек для каждой реализации поверхности;

 определение параметров закона распределения погрешностей для каждой измеренной точки. Вычисление центральных характеристик случайных величин (математическое ожидание, дисперсия). Расчет верхней и нижней границ изменения случайной величины, попадающий в заданный доверительный интервал (в работе принят 99,73 %);

5) линейное интерполирование полученных точечных средних, максимальных и минимальных значений изменения величин погрешностей. Задание случайных функций для значений погрешностей.

С помощью разработанной модели получены случайные функции при измерении поверхностей спинки и корыта измерительным наконечником радиуса 1 мм и максимальным отклонением формы 0,2 мм. Для спинки предельное значение погрешности определения координат измеренных точек составило 0,0347 мм, ко-

682

рыта – 0,0162 мм. Максимальное величина из наиболее вероятных значений погрешностей для спинки составила 0,029 мм, корыта – 0,0085 мм, что совпадает с максимальными погрешностями, возникающими при измерении эталонных погрешностей.

Список литературы

1. Piegl, L. The NURBS Book / Piegl L., Tiller W. – Berlin : Springer-Verlag, 1997. – 646 p.

2. Savio, E. Metrology of Freeform Shaped Parts / E. Savio, L. De. Chiffre, R. Schmitt // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 56, No. 2. – P. 810 - 835.

3. Rajamohan, G. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines / G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel // Metrology and Measurement Systems. – 2011. – No. 2. – P. 209 – 222.

4. Rogers, D. F. Mathematical Elements for Computer Graphics. 2nd ed. / D. F. Rogers, J. A. Adams. – N.Y. : McGraw-Hill Publishing Company, 1990. – 604 p.

5. Shunmugam, M. S. Comparison of Difference Methods for Computing the Two-Dimensional Envelope for Surface Finish Measurements / M. S. Shunmugam, M. S. Radhakrishnan // Computed Aided Design, 1976. – No. 8(2). – P. 89 – 83.

6. Rajamohan, G. Effect of Probe Size and Measurement Strategies on Assessment of Freeform Profile Deviations Using Coordinate Measuring Machine / G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel // Measurement. – 2011. – No. 44. – P. 832 – 841.

7. Powell, M. J. D. A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, Numerical Analysis / M. J. D. Powell // Numerical Analysis. – 1978. – Vol. 630. – P. 141–157.

8. Li, Y. Freeform Surface Inspection Techniques – State of the Art Review / Y. Li, P. Gu // Computer Aided Design. – 2004. – Vol. 36, No. 13. – P. 1395 – 1417.

9. Styli and Accessories. Technical Specifications [Электронный ресурс] // RENISHAW Plc, 2009. – 104 р. – Режим доступа : http://pdf.directindustry.com/pdf/renishaw/styli-accessories-technical-specifications-guide/5200-98270.html (дата обращения: 12.11.2015).

10. Conover, W. J. Practical Nonparametric Statistics / W. J. Conover. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 1980. – 512 p.

11. Бородачев, Н. А. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Н. А. Бородачев ; под. ред. А. Н. Гаврилова. – М. : Машиностроение, 1973. – 567 с.

A Model of Coordinate Measurements of Freeform Surfaces Geometry

V. A. Pechenin, M. A. Bolotov, N. V. Ruzanov

Department of Aircraft Engines Production, Samara State Aerospace University, Samara; vadim.pechenin@mail.ru

Keywords: blade; coordinate measurement; interval estimate; optimization algorithm; probability; probe tip.

Abstract: Measurements with contact methods are the most accurate and commonly used in the aerospace industry. In order to assess the accuracy of coordinate measurements related to indirect measurement methods, it is necessary to create a measurement process model. The paper describes a developed model that allows

683

assessing the accuracy of the contact measurement of complex curved surfaces using coordinate measuring machines (CMMs). The model incorporates two optimization algorithms, and a comparison of their performance. We estimated the measurement errors when determining contact points on the surface of gas turbine engine compressor blades. We obtained the dependences of measurement errors in the form of the most probable and limit interval estimates for any of the measured surface point.

References

1. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book, Berlin: Springer-Verlag, 1997, 646 p.

2. Savio E., Chiffre L.De., Schmitt R. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 810-835.

3. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. *Metrology and Measurement Systems*, 2011, no. 2, pp. 209-222.

4. Rogers D.F., Adams J.A. *Mathematical Elements for Computer Graphics*. 2nd ed., McGraw-Hill Publishing Company, 1990, 604 p.

5. Shunmugam M.S., Radhakrishnan M.S. Computed Aided Design, 1976, no. 8(2), pp. 89-83.

6. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. *Measurement*, 2011, no. 44, pp. 832-841.

7. Powell M.J.D. Numerical analysis, 1978, vol. 630, pp. 144-157.

8. Li Y., Gu P. Computer Aided Design, 2004, vol. 36, no. 13, pp. 1395-1417.

9. RENISHAW Plc. *Styli and accessories. Technical specifications*, 2009, 104 p., available at: http://pdf.directindustry.com/pdf/renishaw/styli-accessories-technical-specifications-guide/5200-98270.html (accessed 12 November 2015).

10. Conover W.J. *Practical Nonparametric Statistics*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1980, 512 p.

11. Borodachev N.A. *Tochnost' proizvodstva v mashinostroenii i priboro-stroenii*, Moscow: Mashinostroenie, 1973, 567 p.

Modell der Koordinatenmessungen der Geometrie der Oberflächen der komplizierten Form

Zusammenfassung: Die Messungen mit Hilfe der Kontaktkoordinatenmethode sind in der modernen Raumfahrtproduktion exakter und verwendeter. Für die Einschätzung der Genauigkeit der Koordinatenmessungen, die zu den indirekten Methoden gehören, ist das mathematische Modell des Prozesses der Messung entwickelt, das die Genauigkeit der Kontaktmessung der komplizierten krummlinigen Oberflächen auf den Koordinatenmesswagen zu bewerten zulässt. In ihm sind zwei Optimisationsalgorithmen verwendet und es ist der Vergleich ihrer Produktivität durchgeführt. Es sind die entstehenden Fehler der Bestimmung der Punkte des Kontaktes bei der Messung der Oberflächen der Feder der Schaufel des Kompressors des Gasturbinenmotors bewertet. Es sind die Abhängigkeiten der Fehler der Messungen in Form von den Wahrscheinlichst- und Höchstzwischeneinschätzungen für einen beliebigen gemessenen Punkt der Oberfläche erhalten.

Modèle des mesures de coordonnées de la géométrie des surfaces de la forme complexe

Résumé: Les mesures à l'aide de la méthode des coordonnées de contact sont les plus précises et souvent utilisées dans la production aérospatiale moderne. Pour évaluer la précision de la mesure de coordonnées relatives aux méthodes indirectes, est conçu un modèle mathématique du processus de la mesure, qui permet d'estimer la précision

de la mesure de contact des surfaces complexes avec les courbes à l'aide des machines de mesure et de coordination. Sont utilisés deux algorithmes d'optimisation; sont comparées leurs performances. Sont aussi estimées les erreurs de la définition des points de contact lors de la mesure des surfaces du compresseur du moteur de turbine à gaz. Sont obtenues les dépendances des erreurs pour n'importe quel point de la surface mesurée.

Авторы: Печенин Вадим Андреевич – аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов; Болотов Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов; Рузанов Николай Владимирович – аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, ФГАО УВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.

Рецензент: Демин Феликс Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов, ФГАО УВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.