

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

© 2013 В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, М.А. Болотов

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье приводится разработанная методика моделирования процесса координатных измерений геометрических параметров отклонения формы и расположения сложного профиля. Осуществлено исследование отклонений формы и расположения серии лопаток компрессора второй ступени двигателя марки НК изготавливаемых технологией ручной полировки. Оценены погрешность и неопределенность измерения геометрических параметров рассматриваемых лопаток при использовании наиболее употребительного алгоритма компенсации радиуса измерительного наконечника, путем расчета точки касания по нормали в измеряемой номинальной точке.

Ключевые слова: методика моделирования, сложный профиль, отклонение формы и расположения профиля, погрешность, неопределенность измерения, лопатка, координатно-измерительная машина, способ компенсации.

Геометрия сложной поверхности пера лопаток ГТД оказывает значительное влияние на его эксплуатационные характеристики (удельный расход, тягу, газодинамическую устойчивость и др.). Достигаемая в технологии изготовления точность сложной поверхности лопаток ГТД определяется точностью процессов обработки и измерения. При изготовлении лопаток, контроль геометрии сложной поверхности выполняется в процессе настройки оборудования, на промежуточных и окончательном этапах обработки. Таким образом, обеспечение точности контроля является важнейшим элементом в обеспечении эксплуатационных характеристик ГТД.

Для осуществления контроля геометрии сложной поверхности лопаток широкое распространение получают современные средства измерений. В основе таких средств измерений заложено использование координатного метода измерения посредством косвенного сличения с 3D моделью сложной поверхности лопатки, что предполагает компьютерную поддержку. Реализуются как контактные, так и бесконтактные методы измерений. Каждый из методов измерений имеет свои достоинства и недостатки. Известно, что контактный метод измерений имеет значительно меньшую производительность измере-

ний, однако для ряда задач он является предпочтительным. К таким задачам относится контроль поверхностей имеющих высокую отражательную способность, например лопаток компрессора изготовленных из хромоникелевых сплавов с малой шероховатостью ( $Ra\ 0,63 \dots 0,32\ \mu\text{м}$ ). Контроль таких лопаток может осуществляться с использованием трех осевых координатно-измерительных машин, оснащенных триггерным или сканирующим датчиками с измерительным наконечником сферической формы.

Современные координатно-измерительные машины имеют сравнительно малую инструментальную погрешность измерений, находящуюся в диапазоне от 1 до 7 мкм, определяемую измеряемыми габаритами. Однако, как показывает практика их использования, результирующая погрешность измерений может быть больше. Важной метрологической и производственной задачей является определение фактической погрешности измерений.

Целью работы является разработка методики моделирования процесса координатных измерений сложного профиля для оценки погрешностей измерения геометрических параметров формы и расположения профиля.

Действительная погрешность и производительность измерений зависит от множества факторов [1]:

1. инструментальных погрешностей средства измерения;
2. используемой методики выполнения измерений;
3. погрешностями формы и расположения измеряемых поверхностей деталей;

*Печенин Вадим Андреевич, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов.*

*Рузанов Николай Владимирович, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов.*

*Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: pdla@ssau.ru*

4. используемыми алгоритмами обработки измеренных точек;

5. внешними факторами.

Поддающимися управлению с целью снижения погрешностей измерений являются факторы: 2 – используемая методика выполнения измерений, 4 – используемые алгоритмы обработки измеренных точек и 5 – внешние факторы. Рассмотрим каждый из них.

К внешним влияющим факторам относится температура, влажность и засоренность окружающей среды. Они могут поддерживаться на необходимом уровне, либо компенсироваться, например включением термокомпенсации. Методика выполнения измерений представляет собой последовательность выполнения измерений, которая включает в себя: черновое (стартовое) и чистовое базирование посредством измерения базовых поверхностей, последовательность и способ измерения точек на остальных поверхностях, используемые алгоритмы обработки измеренной информации, способ построения и расчета геометрических параметров из известных измеренных параметров, порядок представления информации в протоколе. Особое значение имеют используемые алгоритмы обработки измеренных точек. Существует несколько типов используемых алгоритмов обработки измеренных точек. Например, аппроксимация измеряемых координат точек базовых поверхностей, к которым относятся плоскости, цилиндрические поверхности, зачастую осуществляется методом наименьших квадратов. При измерении сложных поверхностей или профилей измерительным наконечником сферической формы возникает проблема компенсации радиуса. В процессе измерения известен центр измерительного наконечника

в момент касания поверхности, а действительная точка получается расчетным путем. Существует несколько способов компенсации радиуса измерительного наконечника. Наиболее распространенным является расчет точки касания исходя из известных координат и вектора нормали в ней номинальной измеряемой точки.

При таком способе компенсации будет возникать дополнительная погрешность измерения, вызванная отклонением направления нормали реального профиля в измеряемой точке от номинального направления (ошибка компенсации радиуса щупа, рис. 1).

Эту ошибку в случае использования сферического наконечника можно найти по формуле [2]:

$$\Delta = R \cdot (1 - \cos(\alpha)), \quad (1)$$

где  $R$  – радиус измерительного наконечника,  $\alpha$  – угол между расчетной (номинальной) и реальной нормалью в измеряемой точке (рис. 1).

Приведенная модель не позволяет оценить погрешность измерения геометрических параметров отклонения и формы профиля. Для их совместной оценки осуществлена разработка методики моделирования, воспроизводящая процесс координатных измерений (рис. 2).

Методика моделирования включает в себя последовательность этапов. Опишем подробно каждый из этапов.

На первом этапе задается план экспериментов. Элементы плана содержат информацию об имитируемых значениях отклонений формы и расположений профилей.

На втором этапе осуществляется загрузка координат точек номинального профиля  $P_i$  и моделируются параметры отклонения формы ( $\Delta_{\text{формы}}$ ) и расположения ( $\Delta_{\text{расп}}$ ). Погрешность

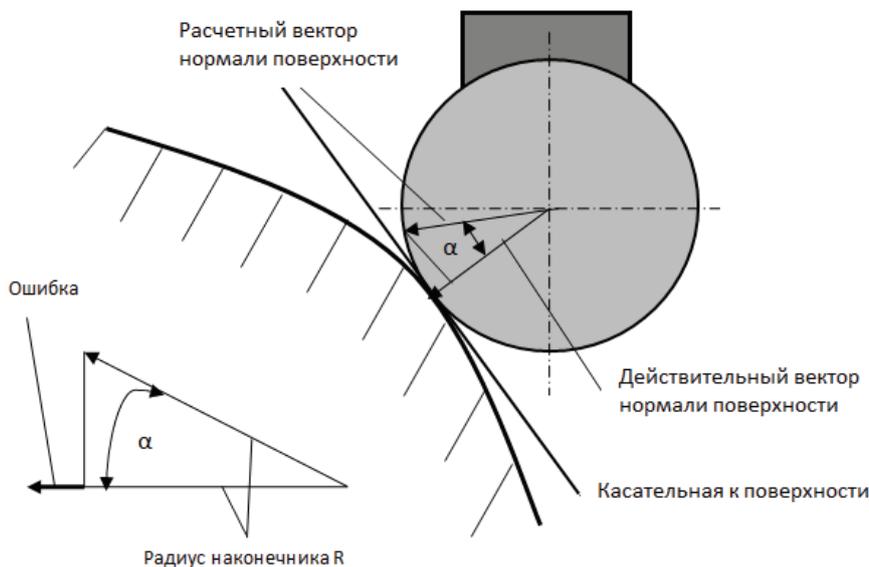


Рис. 1. Оценка погрешности  $D$ , вызванной несовпадением номинального и реального направления нормали к поверхности

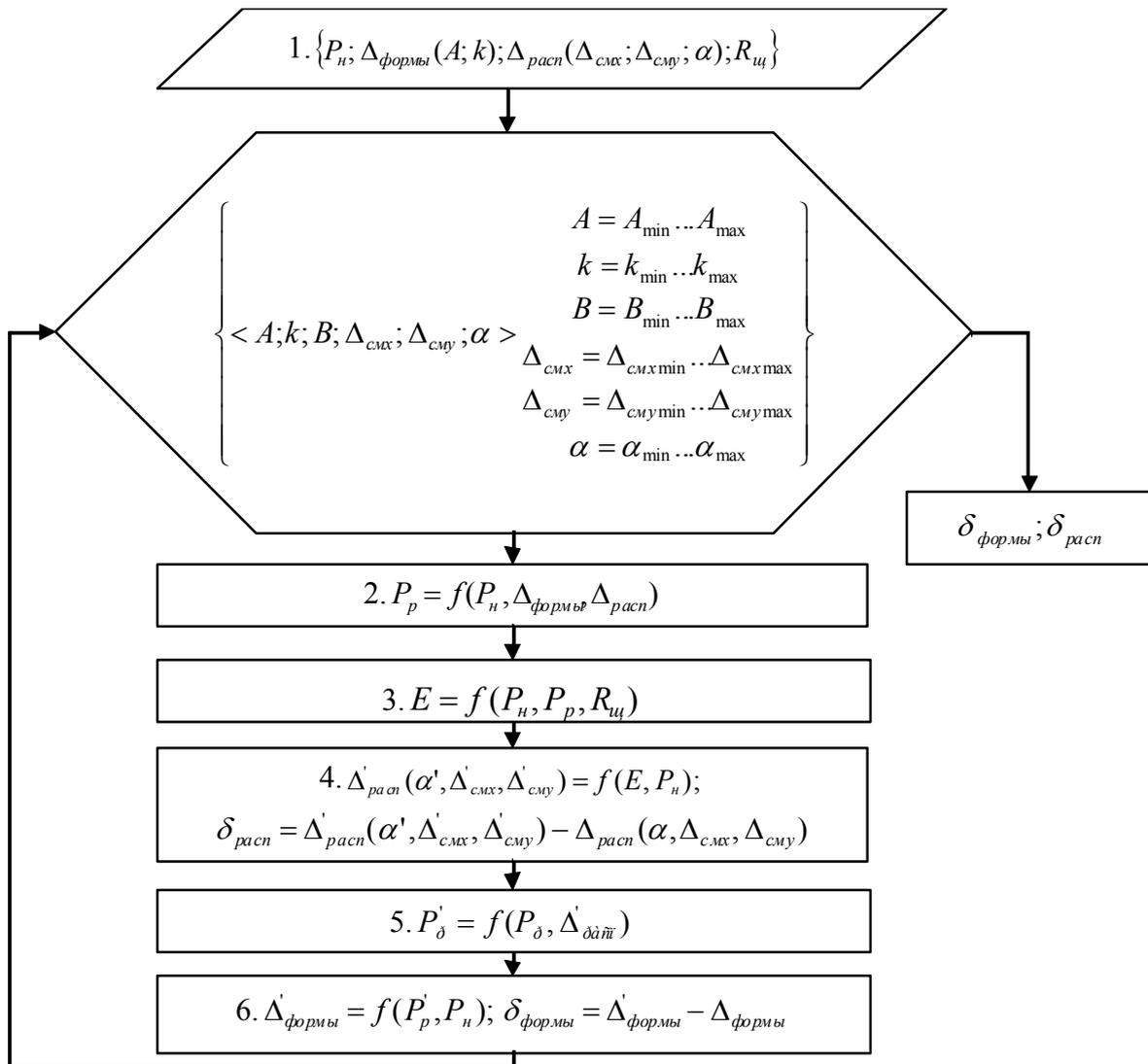


Рис. 2. Блок-схема программы исследования погрешности координатных измерений

формы профиля моделируется как включающая в себя гармоническую и случайную составляющие, следующим образом:

$$\Delta_{\text{формы}} = \Delta_{\text{гарм}} + \Delta_{\text{случ}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{\text{гарм}}$  – гармоническая составляющая погрешности формы профиля точек профиля, которая находится по формуле:

$$\Delta_{\text{гарм}} = A \cdot \cos((x / k \cdot 2 \cdot \pi) / L_{\text{пр}}), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда гармонической составляющей;  $k$  – частота гармонической погрешности;  $L_{\text{пр}}$  – опорная длина профиля по оси X;  $x$  – координата точки  $P_n$ ;

$\Delta_{\text{случ}}$  – случайная составляющая погрешности формы профиля точек профиля, имитирующая инструментальную погрешность измерительного средства;

$\Delta_{\text{расп}}$  – погрешность расположения профиля, состоящая из 3 параметров: угла поворота профиля  $\alpha$  и смещения по координатным осям  $\Delta_{\text{см.х}}, \Delta_{\text{см.у}}$ .

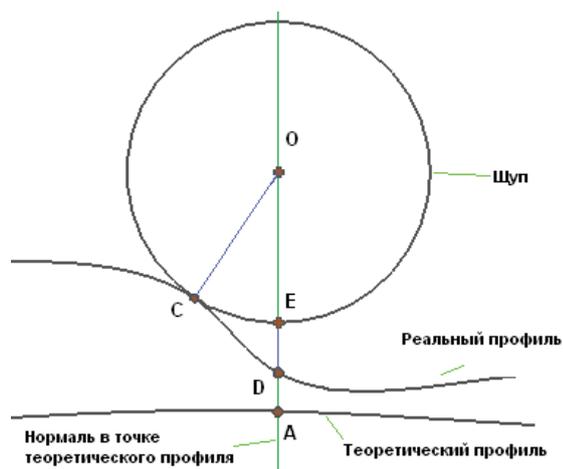
Окончательно координаты точки реального профиля находятся из координат точки номинального профиля по формуле:

$$P_p = P_n + \Delta_{\text{формы}} + \Delta_{\text{расп}}, \quad (4)$$

где  $P_p$  – координаты точек реального (измеряемого) профиля.

Непрерывное представление имитируемого и номинального профиля осуществляется интерполяцией соответствующих массивов координат точек профилей с использованием NURBS сплайна 3-й степени [3, 4].

На третьем этапе осуществляется моделирование касания измерительного наконечника об имитируемый профиль, который является измеряемым. В процессе моделирования определяются координаты точек касания щупа и профиля, и координаты центров щупа. Для нахождения этих основных координат разработан улучшенный алгоритм, как альтернатива алгоритму, приведенному в [5]. Определяемые и задаваемые параметры приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема измерения профиля сложной поверхности:

A – измеряемая точка номинального профиля; D – точка реального профиля, которую пересекает нормаль к точке A; C – точка касания измерительного наконечника и реального профиля; O – центр измерительного наконечника в момент касания поверхности; E – точка, лежащая на пересечении нормали точки A и окружности щупа

Измерение точки профиля осуществляется следующим образом: щуп движется по нормали к измеряемой точке A, расположенной на номинальном профиле. Касается реального профиля в точке C, которая не совпадает с точкой A. На пересечении теоретической нормали и окружности щупа лежит рассчитываемая машиной точка E, на пересечении теоретической нормали и реального профиля – точка D.

На четвертом этапе осуществляется определение наилучшего совмещения имитируемого (точки E) и номинального (точки  $P_n$ ) профиля. При этом формируются измеренные в ходе моделирования параметры расположения профиля. Полученные параметры расположения профиля используются для вычисления матрицы наилучшего совмещения номинального и измеренного (оцененного) профилей (припасовки), которая выглядит:

$$M_{np} = \begin{bmatrix} \cos \alpha' & \sin \alpha' & 0 \\ -\sin \alpha' & \cos \alpha' & 0 \\ \Delta'_{см,x} & \Delta'_{см,y} & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Погрешность измерения отклонения расположения от номинального значения можно охарактеризовать отклонениями между полученными и заданными планом эксперимента углом поворота профиля и смещения по координатным осям:

$$\delta_{расп} = \begin{cases} \alpha' - \alpha, \\ \Delta'_{см,x} - \Delta_{см,x}, \\ \Delta'_{см,y} - \Delta_{см,y}. \end{cases} \quad (6)$$

На пятом этапе координаты точек имитируемого профиля, корректируются с целью исключения ошибки расположения. При этом определяются координаты имитируемого профиля для оценки погрешности формы:

$$P'_p = E \cdot M_{np}. \quad (7)$$

На шестом этапе по точкам припасованного профиля  $P'_\delta$  задается сплайн NURBS. После этого вычисляются нормали в точках  $P'_i$  к номинальному профилю, находятся координаты точек пересечения этих нормалей и припасованного измеренного профиля  $E_1$ . Расстояния  $P'_i E_1$  характеризуют оцененную погрешность формы профиля  $\Delta'_{формы}$ . Погрешность найденного отклонения представляет собой массив разностей оцененной и заложенной отклонений формы профиля в точках:

$$\delta_{формы} = \Delta'_{формы} - \Delta_{формы}. \quad (8)$$

Полученные значения  $\delta_{формы}$  и  $\delta_{расп}$  записываются для каждого набора входных параметров и используются в дальнейшем анализе.

Приведенные этапы реализуются посредством разработанных программных модулей.

Таким образом, для каждого элемента плана эксперимента определяются погрешности измерения отклонения формы и расположения. Разработанная методика будет использоваться для оценки погрешностей измерения геометрических параметров сложных профилей и определения неопределенности результатов измерений, позволяющих распространить их на партию изготавливаемых лопаток.

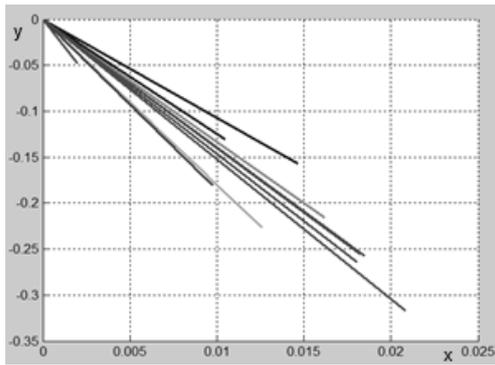
Первоначально осуществлялось исследование отклонений формы и расположения профилей серийных лопаток на ОАО «КУЗНЕЦОВ» с использованием координатно-измерительной машины DEA Global Performance 07.10.07.

В ходе измерений получены результаты отклонений по форме и расположению. Отклонение расположения приведены на рис. 4 и 5. Рис. 4 содержит вектора отклонений расположений от номинального (нулевого) значения для выборки лопаток по сечениям. Анализируя рисунок можно отметить, что наблюдается тесная корреляция между величинами смещения по оси X и Y. Чем выше по модулю величина смещения по одной оси, тем выше величина смещения по другой оси.

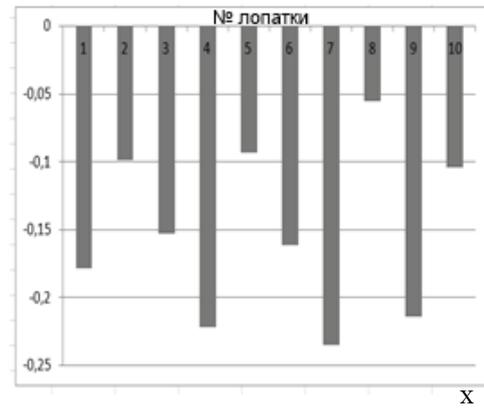
На рис. 5 приведены значения углового отклонения расположения относительно номинального положения для соответствующих измеренных лопаток.

Измеренное отклонение формы выборочных лопаток приведены на рис. 6.

Результаты измерений показывают, что измеренные детали имеют схожую погрешность



**Рис. 4.** Результаты измерений линейного отклонения расположения по серии лопаток, мм



**Рис. 5.** Результаты измерений отклонений углового отклонения расположения по серии лопаток, град

формы. Наибольшее отклонение формы проверяемых лопаток от формы номинальной детали наблюдается на входной и выходной кромке изделия, в центральной части отклонение незначительное. На основе измерений партии лопаток можно сделать вывод о том, что изготавливаемые лопатки, произведенные по аналогичному технологическому процессу, будут иметь близкое отклонение формы.

Схожесть отклонения формы позволит распространить оценку погрешности измерения с измеренной партии лопаток на все партии лопаток, произведенные по аналогичному технологическому процессу.

На основе проведенных измерений определены граничные условия отклонений формы профиля и разработан план экспериментов по моделированию и определению погрешности измерения (табл. 1).

На основе плана экспериментов осуществлено моделирование процесса измерения с имитируемым отклонением формы и расположения

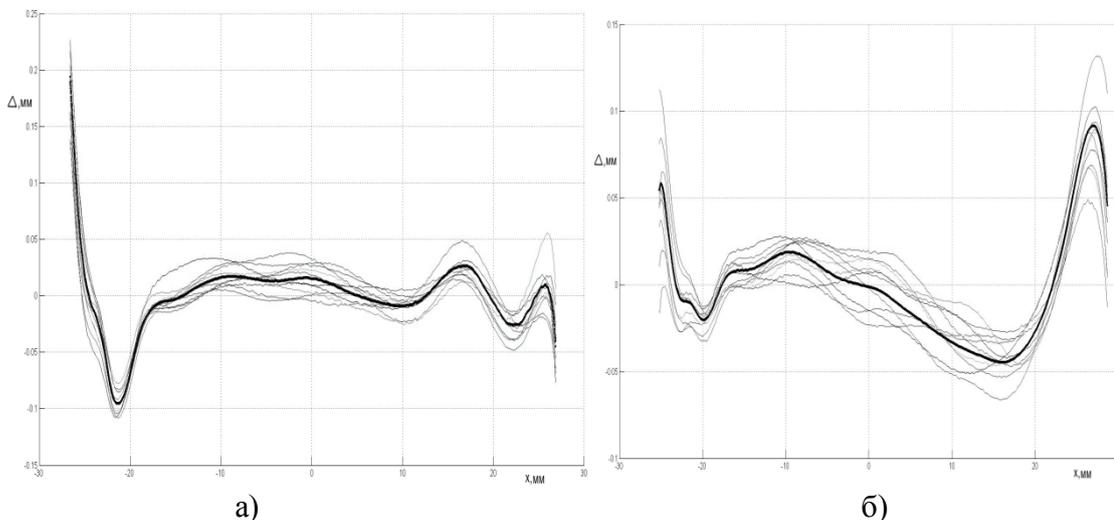
измеряемого профиля. В результате получены следующие зависимости погрешностей измерения. На рис. 7 представлена зависимость погрешности измерения формы профиля от величины амплитуды гармонической составляющей вдоль профиля.

На рис. 8 представлена зависимость погрешности измерения формы профиля от величины частоты гармонической составляющей.

В ходе экспериментов установлено влияние фактического отклонения расположения имитируемого профиля на погрешность измерения формы профиля. На рис. 9 показана зависимость максимальной оцененной погрешности измерения формы профиля от амплитуды гармонической составляющей.

Анализируя полученные результаты можно отметить, что зависимость погрешности измерения отклонения формы профиля от параметров гармонической составляющей является линейной.

На рис. 10 показана зависимость максимальной оцененной погрешности измерения формы



**Рис. 6.** Отклонение формы для сечения корытца на высоте: а – 17 мм, б – 172 мм

Таблица 1. План экспериментов

Сечение			A, мм		k, ед.	
Название	Поверхность	Высота, мм	min	max	min	max
K17	корытце	17	0,01	0,25	2,5	18
C17	спинка	17	0,02	0,25	2	28
K100	корытце	100	0,03	0,20	6	26
C100	спинка	100	0,01	0,28	3	19
K172	корытце	172	0,01	0,13	4	19
C172	спинка	172	0,01	0,15	2	16

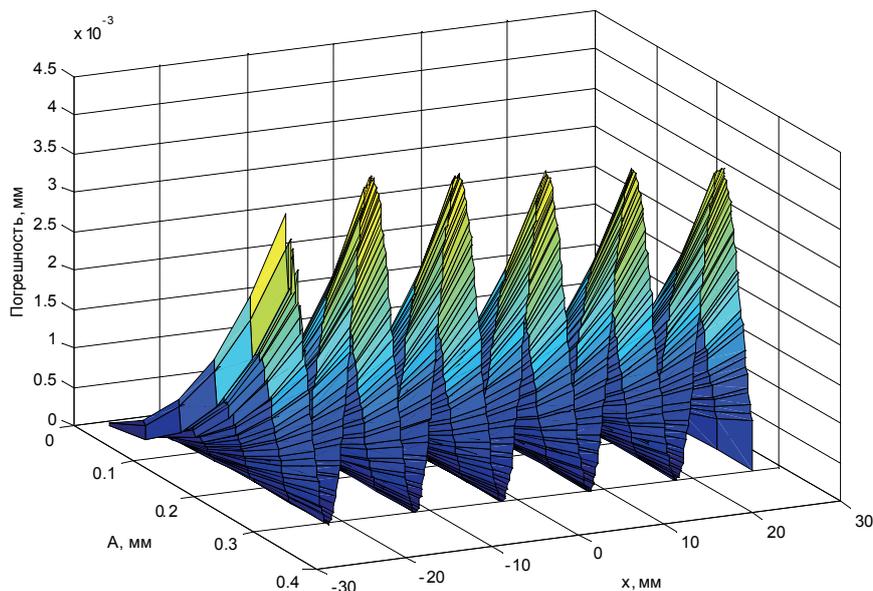


Рис. 7. Зависимость погрешности измерения отклонения формы профиля от величины амплитуды гармонической составляющей вдоль профиля

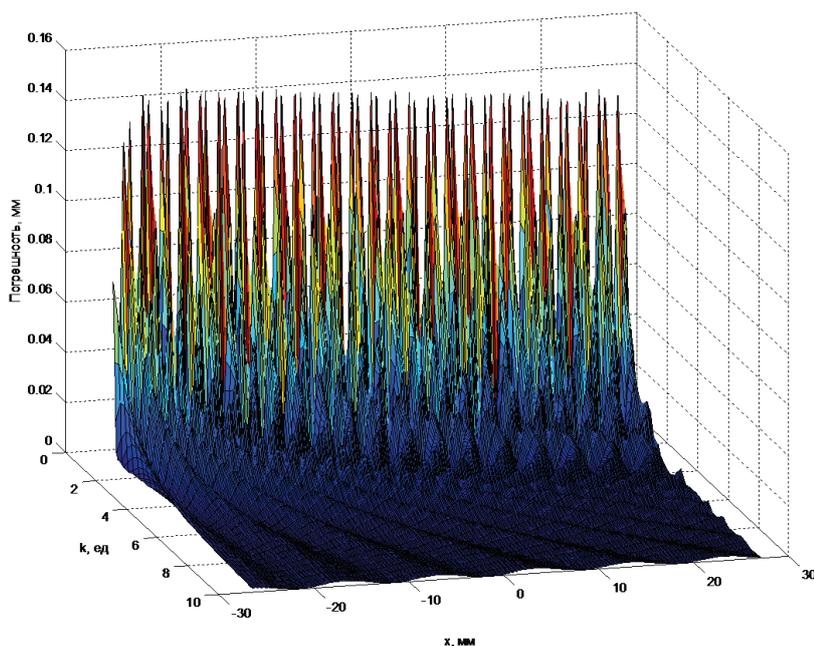
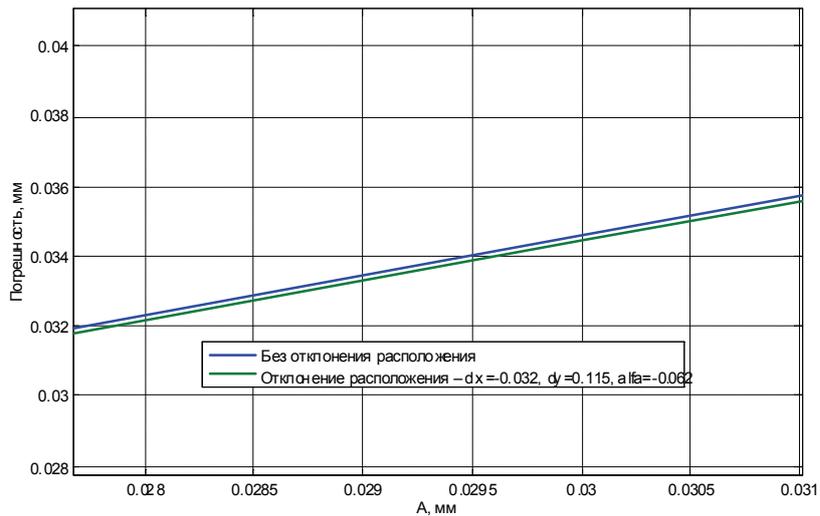


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения отклонения формы профиля от величины частоты гармонической составляющей k



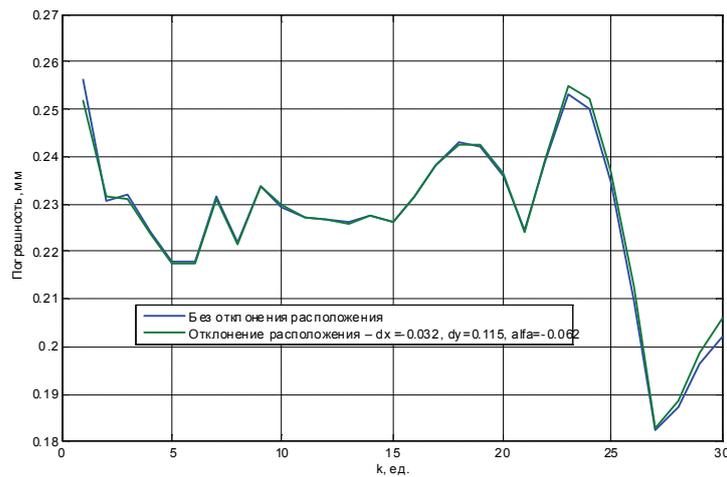
**Рис. 9.** Зависимость максимальной оцененной погрешности измерения формы профиля от амплитуды гармонической составляющей

профиля от величины частоты гармонической составляющей  $k$  для различного отклонения расположения.

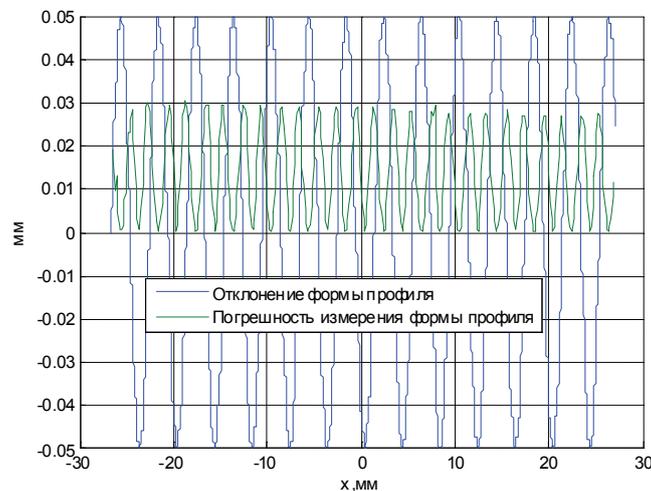
Погрешность измерения формы вдоль про-

филя при имитировании только отклонения формы приведена на рис. 11.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что зависимость погрешностей изме-



**Рис. 10.** Зависимость максимального отклонения формы от величины частоты гармонической составляющей  $k$  для различного отклонения расположения



**Рис. 11.** Погрешность измерения формы вдоль профиля при отсутствии отклонения расположения, при  $A=0.05, k=2$

рений геометрических параметров отклонения расположения и формы профиля существенна, может принимать значительные величины по сравнению с допустимыми погрешностями измерений. Поэтому их нужно принимать во внимание при оценке фактической точности измерений и разработке методик выполнения измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement / R.G. Wilhelml, R. Hocken, H. Schwenke // Elsevier, 2003. P. 4-5.
2. Metrology of freeform shaped parts / E. Savio, L. De

3. Chiffre, R. Schmitt // Elsevier. P.810-835
4. Роджерс, Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
5. Лу К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE).. СПб.: Питер, 2004. 560с.
6. 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. № 44. P.832-841.
7. Моделирование процесса измерения пера лопатки компрессора ГТД контролируемой на КИМ при базировании по хвостовику трапецевидной формы/ М.А. Болотов, А.О. Чевелева, В.А. Печенин // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4. С. 177-181.

### MODELING OF COORDINATE MEASURING GEOMETRICAL PARAMETERS FORM AND LOCATION COMPLEXITY PROFILE OF COMPRESSOR BLADE GTE

© 2013 V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, M.A. Bolotov

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

The article provides a method developed process modeling coordinate measurements of geometrical parameters of shape deviations and location complex profile. We investigate deviations shape and location of a series of compressor blades of the second stage Engine brand manufactured NC technology manual polishing. Estimated uncertainty of measurement error and geometrical parameters considered blades using the most commonly used algorithm for measuring the radius compensation tip by calculating the point of tangency along the normal to the measured nominal point.

Keywords: technique of modeling, complexity profile, deviation of shape and location of profile, uncertainty, blade, coordinate measuring machine, method of compensation.

---

Vadim Pechenin, Graduate Student.  
Nikolay Ruzanov, Graduate Student.  
Mikhail Bolotov, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at  
the Production of Aircraft Engines Department.  
E-mail: pdla@ssau.ru