

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016 В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. В. Рузанов, М. В. Янюкина

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва

Лопатки компрессора являются одними из многочисленных и наиболее сложных деталей газотурбинных двигателей. Сложная поверхность лопаток компрессора характеризуется комплексом параметров, характеризующих геометрию отдельных сечений. В статье приводится разработанная модель вычисления комплекса геометрических параметров профилей по измеренному массиву точек. Разработана методика оценки погрешностей измерения комплекса геометрических параметров при измерении с использованием координатно-измерительных машин. Для реализации предложенных модели и методики разработаны программные алгоритмы. Приводятся результаты исследований погрешностей измерения комплекса геометрических параметров пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Получены вероятностные характеристики возникающих погрешностей для трёх сечений пера лопатки. Разработанная модель и алгоритмы вычисления комплекса геометрических параметров профилей по измеренному массиву точек могут быть применены в программном обеспечении измерительных машин.

Лопатка компрессора, координатные измерения, сложная поверхность, сечение, комплекс геометрических параметров, модель, интервальная оценка неопределённостей.

Геометрия лопаток компрессора оказывает значительное влияние на рабочие характеристики газотурбинных двигателей (ГТД). Достижение высокой точности геометрии лопаток в производстве невозможно без высокоточных измерений. Лопатка компрессора включает в себя замок и поверхность сложной формы (рис. 1).

Расположение сечений лопаток компрессора ГТД задаётся вдоль оси z параллельно установочной поверхности замка лопатки.

Наибольшую сложность составляет измерение сложных поверхностей лопаток. Форма пера лопатки газотурбинного двигателя является результатом сложного баланса между аэродинамическими, прочностными характеристиками и производственными требованиями [1].

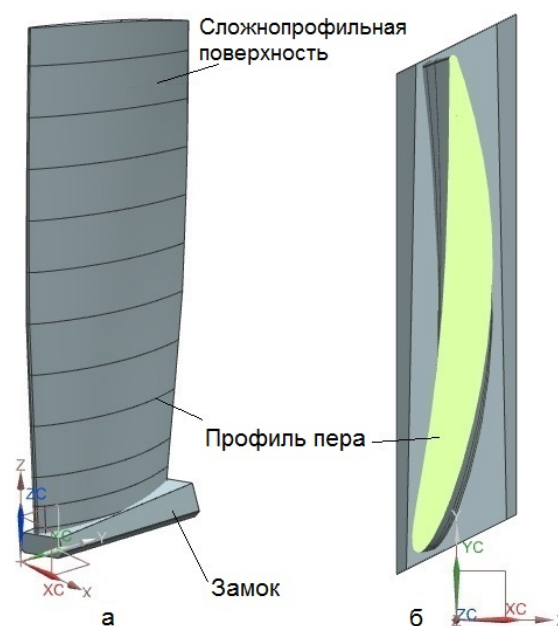


Рис 1. Лопатка компрессора и измеряемые сечения пера: а – изометрия, б – вид с торцевого сечения

Цитирование: Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В., Янюкина М.В. Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 162-170. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-162-170

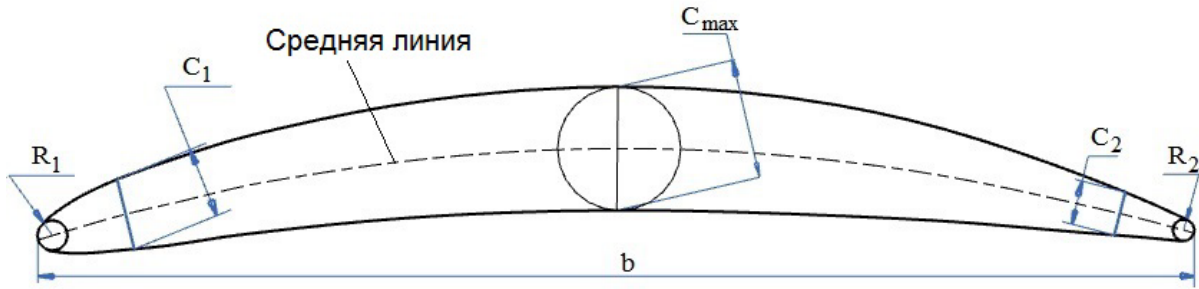


Рис. 2. Геометрические параметры профиля

В данной работе для описания поверхности пера лопатки используется инструмент, являющийся стандартом для описания поверхностей свободной формы в программах CAD – NURBS-поверхности [2]. Сложная поверхность лопаток компрессора обычно задаётся отдельными сечениями, которые характеризуются комплексом параметров. Комплекс параметров включает радиусы входной и выходной кромок (R_1 , R_2), хорду профиля пера (b), максимальную толщину профиля (C_{max}), толщину входной и выходной кромок пера C_1 и C_2 . На рис. 2 изображены рассчитываемые геометрические параметры профиля пера лопатки.

Для контроля геометрии лопаток в промышленности применяются координатно-измерительные машины (КИМ), которые могут быть оборудованы контактными и бесконтактными измерительными системами. Контактный метод измерения производится посредством касания измерительного наконечника, как правило сферической формы, о поверхность измеряемой детали или изделия. После осуществления касания выполняется фиксация точки центра измерительного наконечника, а затем проводится расчёт точки касания.

Погрешности измерения геометрических параметров зависят от рассеивания параметров отклонения формы и расположения поверхностей пера, влияющих на точность расчёта измеренных точек [3]. Особенно велики погрешности измерения для областей входной и выходной кромок, имеющих большую кривизну. Для этих областей также характерно то, что небольшие изменения в шероховатости и

геометрии могут иметь непропорционально большое воздействие на эффективность работы компрессора [4]. Таким образом, действительные неопределённости измерения сложных поверхностей лопаток могут быть больше неопределённостей, указанных в спецификациях КИМ. Целью данной работы является оценка неопределённостей измерения комплекса геометрических параметров профилей сложной поверхности лопаток.

Для оценки неопределённости измерения комплекса геометрических параметров профилей с учётом вероятностного характера разработана методика, учитывающая степень рассеивания параметров отклонения формы и расположения поверхностей свободной формы (рис. 3). Методика реализует метод Монте-Карло [5] с последовательным повторением пунктов 3, 4, 5, 6 и 7.

Моделирование измеряемой поверхности осуществлялось посредством добавления к координатам точек номинальных поверхностей отклонения формы и расположения. Вектор координат точки измеряемой поверхности определялся следующим выражением:

$$\bar{P}_{meas} = (\bar{P}_{CAD} + \bar{N}dF)R + \bar{T}, \quad (1)$$

где \bar{P}_{meas} , \bar{P}_{CAD} – вектор координат точек (x , y , z) соответственно измеряемой (моделируемой) и номинальной поверхностей; \bar{N} – вектор нормали в точке \bar{P}_{CAD} ; dF – величина отклонения формы в точке \bar{P}_{CAD} ; R , \bar{T} – соответственно матрица поворота и вектор транспонирования координат точки \bar{P}_{CAD} .

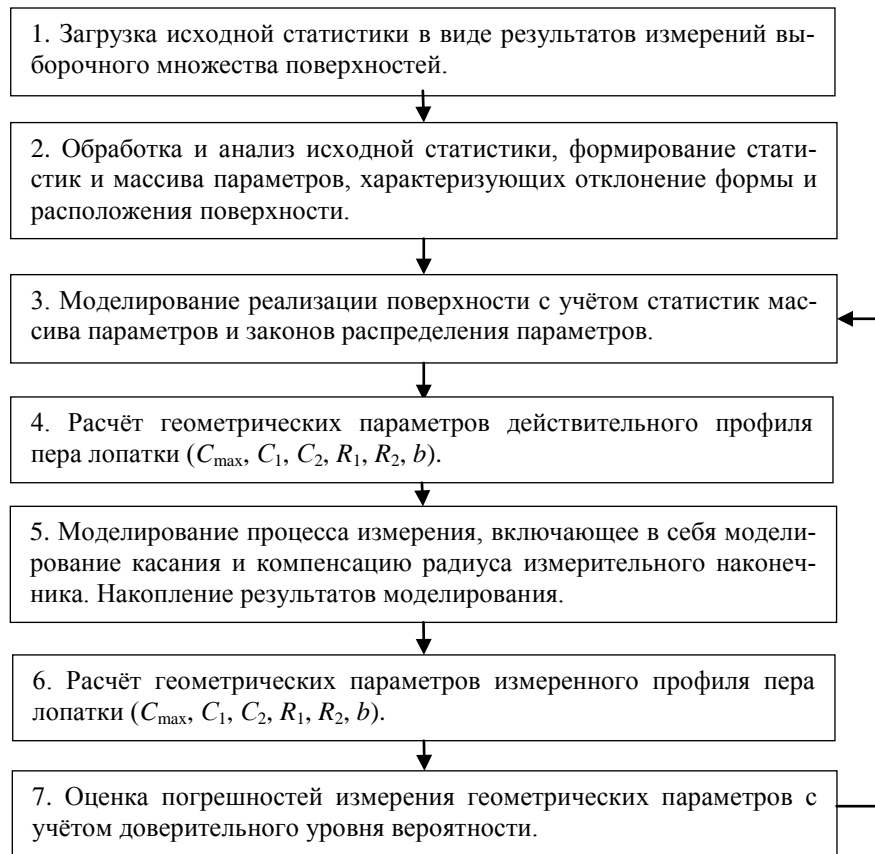


Рис. 3. Методика оценки погрешности определения геометрических параметров лопаток компрессора

Матрица R содержит три угла вращения вокруг координатных осей. Вектор T содержит значения перемещения вдоль координатных осей.

В практике производства деталей встречаются две составляющих отклонения формы: систематическая и случайная δ_γ . Соответственно в модели измеряемой поверхности учитывались эти две составляющих отклонения. Систематические отклонения состоят из макроотклонения формы δ_m и гармонической составляющей отклонения формы δ_s [6].

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

$$dF = \delta_s + \delta_m + \delta_\gamma. \quad (2)$$

Макроотклонение формы представляет собой профиль, отличный (уменьшенный) по толщине от теоретического профиля. В ходе анализа большого объёма измерений было выявлено, что отклонение формы профиля вдоль хорды имеет вид, представленный на рис. 4.

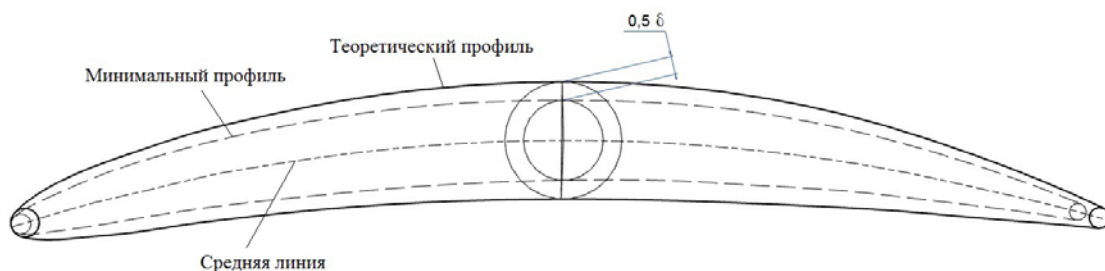


Рис. 4. Моделируемое макроотклонение формы для корневого сечения

При максимальном отклонении формы получается так называемый «минимальный» профиль. Значения отклонения неодинаковы для различных частей профиля. Отклонение принимает максимальное значение в том месте, где профиль имеет максимальную толщину и составляет $0.5 \cdot \delta_m$ на сторону. Минимальное значение отклонения принимает в области кромок.

Расчёт комплекса геометрических параметров профиля осуществляется следующим образом.

Расчёт радиуса входных и выходных кромок (R_1 и R_2). Радиусы и координаты центров входной и выходной кромок сечения определялись как соответствующие параметры уравнений окружностей. Параметры уравнений окружностей определялись посредством аппроксимации измеренного массива точек кромок с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Расчёт средней линии профиля. Средняя линия профиля лопатки ГТД, представляющая собой кривую, проходящую через центры вписанных в профиль окружностей, необходима для расчёта комплекса геометрических параметров.

Поиск точек средней линии профиля осуществляется по следующей схеме:

1. Задаются кусочные сплайны – Эрмитовы кривые [7] по точкам профилей корыта и спинки P_i и P_{1i} .

2. Определяется нормаль через точку на корыте. Направляющий вектор нормали находится по формуле:

$$N = \left[\frac{f'_x(P_i)}{\sqrt{(f'_x(P_i))^2 + (f'_y(P_i))^2}} \quad \frac{-f'_y(P_i)}{\sqrt{(f'_x(P_i))^2 + (f'_y(P_i))^2}} \right], \quad (3)$$

где $f'_x(P_i), f'_y(P_i)$ – производные сплайна по уравнениям x и y в точке корыта P_i .

3. Рассчитываются координаты точки пересечения нормали и сплайна спинки P_{1i} из системы уравнений нормали и сплайна.

4. Через точку P_{1i} задаётся нормаль по уравнению сплайна.

5. Методами нелинейной оптимизации осуществляется поиск координат точки пересечения нормали спинки и корыта N_i так, чтобы $|N_i P_i| = |N_i P_{1i}|$.

Таким образом, рассчитываются точки средней линии между кривыми корыта и спинки. К полученным точкам среднего профиля, находящимся между спинкой и корытом, добавляются центры входной и выходной кромок. По координатам точек средней линии задаётся кусочный сплайн.

На заключительном этапе сплайн экстраполируется до пересечения с кривыми кромок. Точки пересечения рассчитываются оптимизационным методом последовательного квадратичного программирования [8]. При реализации этого метода расчёта 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.

Расчёт хорды профиля b . Величина хорды профиля пера b рассчитывается как расстояние между точками пересечения средней линии профиля и линиями кромок профиля.

Расчёт толщин входной и выходной кромок пера C_1 и C_2 . Толщины C_1 и C_2 рассчитываются на заданных конструктором расстояниях n_1 и n_2 от точек средней линии профиля на входной и выходной кромках соответственно. На расстояниях n_1 и n_2 определяются нормали средней линии и рассчитываются точки пересечения этих нормалей с кривыми спинки и корыта, заданных кусочными сплайнами. Расстояния между рассчитанными точками в областях входной и выходной кромок соответственно являются толщинами C_1 и C_2 .

Расчёт максимальной толщины профиля C_{max} . Расчёт производится мето-

дом оптимизационного поиска диаметра максимальной вписанной в профиль окружности в границах точек толщин C_1 и C_2 соответственно. Целевая функция имеет вид:

$$f = d \rightarrow \max, \quad (4)$$

где d – диаметр вписанной в профиль окружности.

Для моделирования процесса измерения разработана модель, позволяющая рассчитывать координаты точки касания, координаты центра измерительного наконечника и координаты измеренных точек при контакте с профилем детали.

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

1. Задаются координаты точек измерения на поверхности САД-модели детали.

2. Через измеряемые точки строятся нормали к САД-поверхности.

3. По нормальям к номинальной поверхности движется измерительный наконечник до касания поверхности и определяется точка касания.

Для расчёта координат точек касания измерительного наконечника о поверхность детали в декартовой системе координат используется базовый метод, предложенный в [9]. Для удобства расчётов для каждой точки производится поворот системы координат таким образом, что нормаль движения измерительного наконечника совмещается с осью z . Для этого производится два последовательных разворота координат точек поверхностей вокруг координатных осей OX и OY на соответствующие углы наклона нормали. После этого производится поиск минимального значения целевой функции в новой системе координат:

$$f(x) = |y_0 - y_n| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где y_0 и y_n – соответственно координаты точки на поверхности щупа и измеряемой поверхности по оси y .

Координаты x точек измеряемой поверхности и измерительного наконечника совпадают и подчиняются системе ограничений:

$$\begin{cases} |O_x - x| \leq R, \\ x \in E_x, \end{cases} \quad (6)$$

где R – величина радиуса измерительного наконечника; E_x – область определения измеряемого профиля по оси X ; O_x – координата центра измерительного наконечника по оси X .

Для поиска координат точки касания C используется метод последовательного квадратичного программирования.

4. Рассчитываются координаты центров щупа O , лежащих на нормалях подвода измерительного наконечника. В случае, когда при измерении есть эталонная САД-модель, координаты измеренных точек рассчитываются на пересечении нормалей N_{comp} к поверхности САД-модели и сферы измерительного наконечника. Координаты измеренных точек D рассчитываются на расстоянии радиуса измерительного наконечника R по направлению нормалей от точек O :

$$D = O + R \cdot N_{comp}. \quad (7)$$

Имеющаяся погрешность компенсации радиуса измерительного наконечника приводит к тому, что координаты измеренных точек не совпадают с координатами действительных точек касания поверхности. Ошибки компенсации влияют на точность расчёта параметров профиля пера компрессора. Погрешность расчёта геометрического параметра равна

$$\delta_p = P_{измер.} - P_{действ.}, \quad (8)$$

где $P_{измер.}$, $P_{действ.}$ – измеренное и действительное значение геометрического параметра профиля.

В процессе исследования выполнено моделирование 100 сечений корневой, средней и торцевой частей пера лопаток компрессора ГТД. Предельные значения

отклонения формы моделируемых сечений изменялись по нормальному закону. На основании статистических данных принято, что максимальное значение отклонения формы не превышает 0,16 мм в тело детали. Диапазон изменения амплитуды волнистости составил $\pm 0,01$ мм. Случайная составляющая отклонения формы не превышала 0,002 мм.

Максимальное смещение сечения относительно системы координат хвостовика лопатки составляет 0,2 мм, угол разворота профиля изменяется в пределах $\pm 15'$.

В табл.1 приведены наиболее вероятные и предельные значения неопределённостей измерения параметров для выборки профилей с уровнем доверительной вероятности 99,73%.

Таблица 1. Математическое ожидание, верхние и нижние границы величин неопределённостей измерения и номинальные значения геометрических параметров корневого сечения пера лопатки

Параметры	Номинальное значение, мм	Минимальное отклонение, мкм	Максимальное отклонение, мкм	Математическое ожидание отклонения, мкм
Корневое сечение пера лопатки				
C_{max}	6.1607	$-6 \cdot 10^{-3}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$
C_1	2.7275	-6.3	1.7	-3.3
C_2	1.4927	-4.5	0.6	-2.3
R_1	0.75	-3.1	1.1	-1.6
R_2	0.55	-3.3	0.6	-1.7
B	57.7685	$-2 \cdot 10^{-2}$	9.2	1.8
Среднее сечение пера лопатки				
C_{max}	4.1703	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$-6 \cdot 10^{-2}$
C_1	1.4793	-13.9	13.4	-4.8
C_2	0.7612	-5.6	5.4	-1.9
R_1	0.4204	-7.5	8.6	-2.2
R_2	0.3032	-7.0	8.4	-1.8
b	59.4892	0.3	21.2	4.6
Торцевое сечение пера лопатки				
C_{max}	1.9005	$-1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$-6 \cdot 10^{-3}$
C_1	0.5211	-40.7	11.8	-19.2
C_2	0.3535	-0.1	5.8	-1.1
R_1	0.2	-4.1	15.1	0.9
R_2	0.1702	-1.3	20.2	-3.6
b	55.8986	$-5 \cdot 10^{-2}$	33.7	7.7

В результате получены границы распространения погрешностей измерения геометрических параметров профилей лопаток компрессора ГТД при измерении на КИМ.

Анализируя полученные результаты, можно отметить:

1) неопределённости измерения комплекса рассматриваемых геометрических параметров увеличиваются по высоте пера;

2) поскольку параметры C_1 и C_2 вычисляются исходя из известных R_1 и R_2 , то наблюдается зависимость между группами этих параметров;

3) наименьшие значения неопределённостей наблюдаются для параметра C_{max} ;

4) наибольшие значения неопределённостей наблюдаются для параметра C_1 .

Наблюдаемые наибольшие значения неопределённостей для параметра C_1 можно объяснить наличием осцилляции сплайна на краях интерполируемых точек профиля.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на ния центра коллективного пользования 2014-2020» с использованием оборудова- САМ технологий (RFMEFI59314X0003).

Библиографический список

1. Lewis W.J., Brew J.S., Bryanston-Cross P., Nawasra J. Form -finding as a modelling tool for shaping mechanical components: A feasibility case study of an axial-flow compressor blade // *Engineering Structures*. 2011. V. 33, Iss. 9. P. 2612-2620.
DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.008
2. Savio E., De Chiffre L., Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2007. V. 56, Iss. 2. P. 810-835.
DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008
3. Rak A., Wozniak A. Probe Radius Correction Methods – Review and Comparison of Existing Methods // *Journal of Automation Mobile Robotics & Intelligent Systems*. 2009. V. 3, Iss. 4. P. 169-171.
4. Walton K., Blunt L., Fleming L., Goodhand M., Lung H. Areal parametric characterisation of ex-service compressor blade leading edges // *Wear*. 2014. V. 321. P. 79-86.
DOI: 10.1016/j.wear.2014.10.007
5. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Propagation distributions using a Monte Carlo method. JCGM. Elsevier, 2008. 120 p.
6. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine // *Measurement*. 2011. V. 44, Iss. 5. P. 832-841.
DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020
7. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.
8. Powell M.J.D. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis // *Numerical Analysis*. 1978. V. 630. P. 144-157.
9. Shunmugam M.S., Radhakrishnan G. Comparison of difference methods for computing the two-dimensional envelope for surface finish measurements // *Computed Aided Design*. 1976. V. 8, Iss. 2. P. 89-83. DOI: 10.1016/0010-4485(76)90090-7

Информация об авторах

Печенин Вадим Андреевич, аспирант кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru. Область научных интересов: координатные измерения, процессы сборки.

Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: maikl.bol@gmail.com. Область научных интересов: координатные измерения, процессы сборки.

Рузанов Николай Владимирович, аспирант кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: kinform@mail.ru. Область научных интересов: координатные измерения, разработка информационных систем.

Янюкина Мария Викторовна, аспирант кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. E-mail: mary392@mail.ru. Область научных интересов: размерные цепи, координатные измерения.

STUDY OF UNCERTAINTY OF MEASURING GEOMETRICAL PARAMETERS OF GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADE PROFILES

© 2016 V. A. Pechenin, M. V. Bolotov, N. V. Ruzanov, M. V. Yanyukina

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

Compressor blades are among the numerous and complicated parts of gas turbine engines. A freeform surface of compressor blades is characterized by a complex of parameters distinguishing the geometry of their individual sections. The paper presents a model of calculating a complex of geometric parameters of blade profiles by a measured array of points. A method of estimating the uncertainty of measurement of a set of geometrical parameters with the use of coordinate measuring machines is developed. Software algorithms have been designed for the implementation of the proposed models and methods. The paper presents the results of analyzing errors of measurement of a set of geometrical parameters of the gas turbine engine compressor blade airfoil. We obtained the probabilistic characteristics of arising errors for three cross sections of the blade airfoil. The proposed models and algorithms for computing a complex of geometric parameters of the measured profiles by an array of points can be applied to software for measuring machines.

Coordinate measurement, compressor blade, freeform surface, section, complex of geometrical parameters, model, interval estimate of uncertainty.

References

1. Lewis W.J., Brew J.S., Bryanston-Cross P., Nawasra J. Form-finding as a modeling tool for shaping mechanical components: A feasibility case study of an axial-flow compressor blade. *Engineering Structures*. 2011. V. 33, Iss. 9. P. 2612-2620. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.008
2. Savio E., De Chiffre L., Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2007. V. 56, Iss. 2. P. 810-835. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008
3. Rak A., Wozniak A. Probe Radius Correction Methods – Review and Comparison of Existing Methods. *Journal of Automation Mobile Robotics & Intelligent Systems*. 2009. V. 3, Iss. 4. P. 169-171.
4. Walton K., Blunt L., Fleming L., Goodhand M., Lung H. Areal parametric characterisation of ex-service compressor blade leading edges. *Wear*. 2014. V. 321. P. 79-86. DOI: 10.1016/j.wear.2014.10.007
5. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Propagation distributions using a Monte Carlo method. JCGM. Elsevier, 2008. 120 p.
6. Rajamohan G., Shunmugam M.S., Samuel G.L. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine. *Measurement*. 2011. V. 44, Iss. 5. P. 832-841. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.01.020
7. Lee K. *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)* [Foundations of CAD (CAD/CAM/CAE)]. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2004. 560 p.
8. Powell M.J.D. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis. *Numerical Analysis*. 1978. V. 630. P. 144-157.
9. Shunmugam M.S., Radhakrishnan G. Comparison of difference methods for computing the two-dimensional envelope for surface finish measurements. *Computed Aided Design*. 1976. V. 8, Iss. 2. P. 89-83. DOI: 10.1016/0010-4485(76)90090-7

Citation: Pechenin V.A., Bolotov M.V., Ruzanov N.V., Yanyukina M.V. Study of uncertainty of measuring geometrical parameters of gas turbine engine compressor blade profiles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 162-170. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-162-170

About the authors

Pechenin Vadim Andreevich, postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru. Area of Research: coordinate measurements, assembly processes.

Bolotov Michael Alexandrovich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: maikl.bol@gmail.com. Area of Research: coordinate measurements, assembly processes.

Ruzanov Nikolay Vladimirovich, postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: kinform_@mail.ru. Area of Research: coordinate measurements, software development.

Yanukina Marija Viktorovna, postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara National Research University, Samara, Russian Federation. E-mail: mary392@mail.ru. Area of Research: dimensional chains, coordinate measuring.