

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

В.А. Печенин, М.В. Янюкина, М.А. Болотов

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

В работе проведено исследование возникающих погрешностей измерения основных геометрических параметров пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Разработана методика оценки погрешностей, алгоритмы расчета геометрических параметров, применена модель процесса измерения. Получены вероятностные характеристики возникающих погрешностей для трех сечений пера лопатки. Разработанные алгоритмы могут быть применены в программном обеспечении измерительных машин для контроля геометрии лопаток и для прогнозирования погрешностей измерений геометрии данного типа деталей.

От точности результатов измерения деталей на координатно-измерительной машине (КИМ) зависит точность определения геометрических параметров объекта измерения. Особенно остро задача «точности» возникает при измерении деталей сложной геометрической формы.

В настоящей работе объектом исследования является лопатка компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Для выбранного типа деталей рассматривается методика и реализующие ее модели оценки точности измерения геометрических параметров пера лопатки, таких как радиусы входной и выходной кромок (R_1 , R_2), хорда профиля пера (b), максимальная толщина профиля (C_{max}), толщины входной и выходной кромок пера C_1 и C_2 .

Контроль геометрии пера лопаток компрессора ГТД осуществляется по сечениям вдоль оси z (рис. 1).

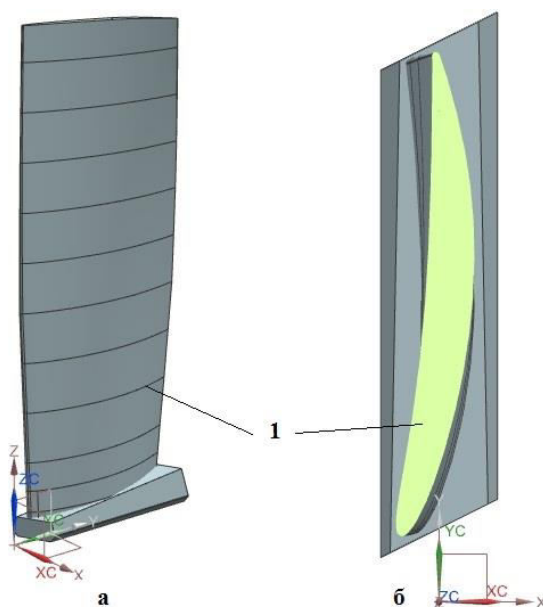


Рисунок 1 – Лопатка: контролируемые сечения пера

Погрешности измерения геометрических параметров зависят от рассеивания параметров отклонения формы и расположения поверхностей пера.

Для оценки погрешности измерения с учетом вероятностного характера была разработана методика, учитывающая степень рассеивания параметров отклонения формы и расположения поверхностей свободной формы (рисунок 2). Методика реализует метод Монте-Карло с последовательным повторением пунктов 3, 4, 5, 6 и 7.

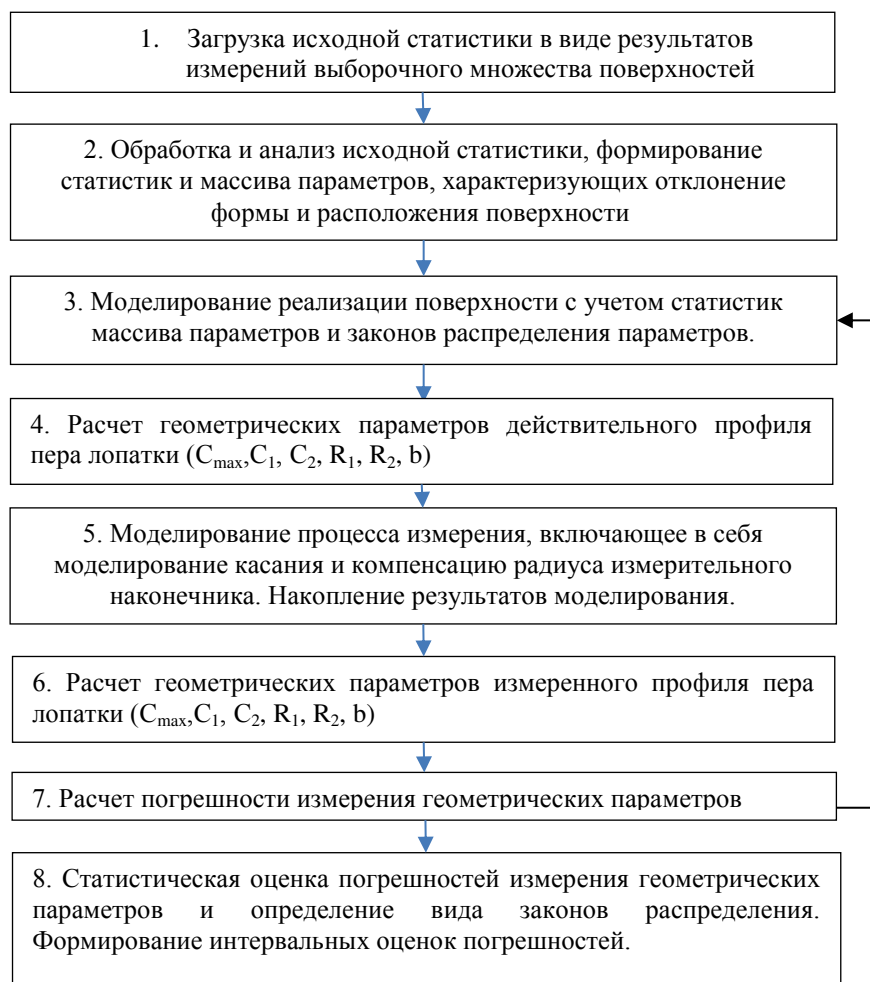


Рисунок 2 – Методика оценки погрешности определения геометрических параметров лопаток компрессора

Моделирование измеряемой поверхности осуществлялось посредством добавления к координатам точек номинальных поверхностей отклонения формы и расположения. Величины отклонений формы и расположения выбирались исходя из статистических наблюдений для серии лопаток.

Координату точки поверхности пера лопатки можно выразить формулой:

$$\bar{P}_{meas} = (\bar{P}_{CAD} + \bar{N}_{1 \times 3} \cdot dF) \cdot R_{3 \times 3} + \bar{T}_{1 \times 3}, \quad (1)$$

где \bar{P}_{meas} , \bar{P}_{CAD} – вектор координат точек (x, y, z) измеряемой (моделируемой) и номинальной поверхностей, соответственно;

$\bar{N}_{1 \times 3}$ – вектор нормали в точке \bar{P}_{CAD} ;

dF – величина отклонения формы в точке \bar{P}_{CAD} ;

$R_{3 \times 3}$, $\bar{T}_{1 \times 3}$ – матрица поворота и вектор транспонирования координат точки \bar{P}_{CAD} .

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: систематическое и случайное δ_γ . Соответственно, в модель измеряемой поверхности закладывались два этих типа отклонений. Систематические отклонения состоят из: макроотклонения формы δ_m и гармонической составляющей отклонения формы δ_s [1].

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

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

Макроотклонение формы представляет собой профиль, отличный (уменьшенный) по толщине от теоретического профиля. В [2] описаны рекомендации по предельным значениям и характеру этого отклонения. При максимальном отклонении формы получается так называемый «минимальный» профиль. Значения отклонения неодинаковы для различных частей профиля. Максимальное значение отклонения принимает в месте расположения максимальной толщины профиля и составляет $0.5 \cdot \delta_{m_max}$ на сторону, минимальное в области кромок.

Модель измерения. Для имитации процесса измерения создана модель, позволяющая рассчитывать координаты точки касания, координаты центра измерительного наконечника и координаты измеренных точек при контакте с поверхностью детали [3].

Погрешность расчета геометрического параметра вычисляется по формуле:

$$\delta_{нар} = \Pi_{изм} - \Pi_{дейст}, \quad (3)$$

где $\Pi_{изм}$ - значение геометрического параметра, рассчитанного после измерения профиля;

$\Pi_{дейст}$ - действительное значение геометрического параметра.

На рисунке 4 изображены рассчитываемые геометрические параметры профиля пера лопатки.

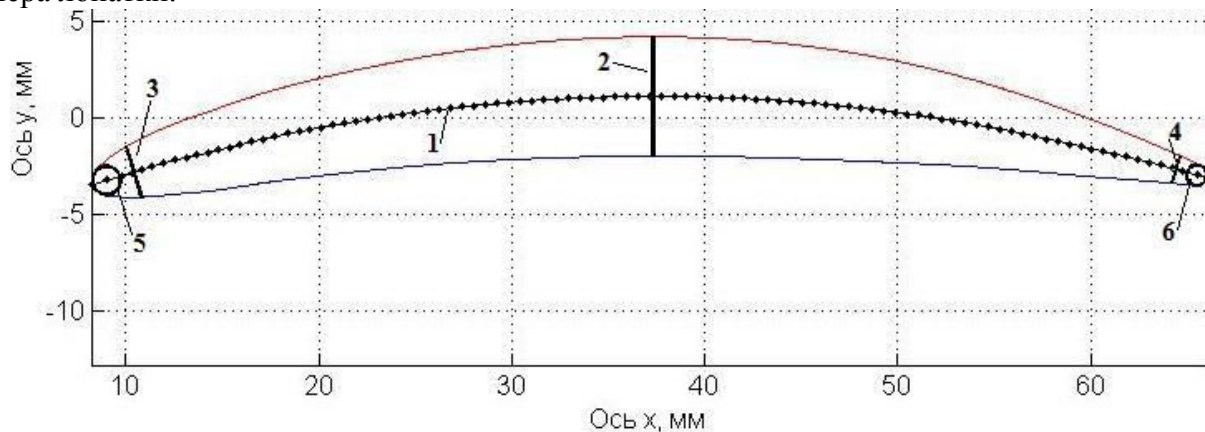


Рисунок 3 – Геометрические параметры профиля: 1 – Средняя линия; 2 - C_{max} ; 3 - C_1 ; 4 - C_2 ; 5 - окружность R_1 ; 6 – окружность R_2

Расчет геометрических параметров осуществляется по следующим алгоритмам.

Алгоритм расчета радиуса входных и выходных кромок (R_1 и R_2). Радиусы и координаты центров входной и выходной кромок сечения рассчитывались как соответствующие параметры идеальной окружности. Идеальная окружность определялась методом аппроксимации измеренного массива точек кромок с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Алгоритм расчета средней линии профиля. Множество геометрических параметров определяются исходя из средней линии профиля лопатки ГТД, представляющую собой кривую, проходящую через центры вписанных в профиль окружностей. Центры вписанных по методу МНК в точки кромок окружностей так же являются точками средней линии.

Поиск таких точек средней линии профиля осуществляется по следующей схеме:

1) Задаются параметрические сплайны Эрмита по точкам профилей спинки и корыта P_i и P_{1i} .

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

$$N = \left[\frac{f'_x(P_i)}{\sqrt{(f'_x(P_i))^2 + (f'_y(P_i))^2}} \quad \frac{-f'_y(P_i)}{\sqrt{(f'_x(P_i))^2 + (f'_y(P_i))^2}} \right], \quad (4)$$

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 (п.2) и сплайна спинки P_{li} из системы уравнений нормали и сплайна.

4) Через точку P_{li} задается нормаль.

5) Осуществляется поиск координат точки пересечения нормали спинки и корыта H_i , так, чтобы $|H_i P_i| = |H_i P_{li}|$ методами нелинейной оптимизации.

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 задается кусочный сплайн.

На заключительном этапе сплайн экстраполируется до пересечения с кривыми кромок. Точки пересечения рассчитываются оптимизационным методом последовательного квадратичного программирования [4].

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

Алгоритм расчета толщин входной и выходной кромок пера C_1 и C_2 . Толщины C_1 и C_2 рассчитываются на расстояниях n_1 и n_2 от точек средней линии профиля на входной и выходной кромках соответственно. Величины n_1 и n_2 выбираются в соответствии с методикой, описанной в [2]. На расстояниях n_1 и n_2 задаются нормали к средней линии и рассчитываются точки пересечения этих нормалей с кривыми спинки и корыта. Расстояния между рассчитанными точками в областях входной и выходной кромок соответственно является толщинами C_1 и C_2 .

Алгоритм расчета максимальной толщины профиля C_{max} . Координаты центров вписанных в профиль окружностей рассчитываются в соответствии с пп. 2-5. алгоритма расчета средней линии профиля. Расчет максимальной толщины профиля производится методом оптимизационного поиска в границах точек толщин C_1 и C_2 соответственно. Целевая функция представляет собой:

$$f = d \rightarrow \max, \quad (5)$$

где d – диаметр вписанной в профиль окружности.

Результаты. Было смоделировано 100 сечений корневой, средней и торцевой части пера лопаток компрессора ГТД, предельные значения отклонения формы которых изменялись по нормальному закону. На основании статистических данных по измерениям этого типа деталей и согласно [2] принято, что максимальное значение отклонения формы не превышает 0.16 мм в тело детали. Диапазон изменения амплитуды волнистости составил ± 0.01 мм. Случайная составляющая отклонения формы не превышала 0.002мм.

Максимальное смещение сечения относительно системы координат хвостовика лопатки составляет 0.2 мм, угол разворота профиля изменяется в пределах $\pm 15^\circ$.

В таблице 1 приведены наиболее вероятные и предельные значения параметров для выборки профилей.

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

Параметры	Номинальное значение, мм	Минимальное отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм	Математическое ожидание отклонения, мм
Корневое сечение пера лопатки				
C_{max}	6.1607	$-6 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$
C_1	2.7275	-0,0063	0,0017	-0,0033
C_2	1.4927	-0,0045	0,0006	-0,0023
R_1	0.75	-0,0031	0,0011	-0,0016
R_2	0.55	-0,0033	0,0006	-0,0017
b	57.7685	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,0092	0,0018
Средние сечение пера лопатки				
C_{max}	4,1703	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-5}$

C_1	1,4793	-0,0139	0,0134	-0,0048
C_2	0,7612	-0,0056	0,0054	-0,0019
R_1	0,4204	-0,0075	0,0086	-0,0022
R_2	0,3032	-0,0070	0,0084	-0,0018
b	59,4892	-0,0003	0,0212	0,0046
Торцевое сечение пера лопатки				
C_{max}	1,9005	$-1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-6}$
C_1	0,5211	-0,0407	0,0118	-0,0192
C_2	0,3535	-0,0001	0,0058	-0,0011
R_1	0,2	-0,0041	0,0151	$9,6 \cdot 10^{-4}$
R_2	0,1702	-0,0013	0,0202	-0,0036
b	55,8986	$-5 \cdot 10^{-5}$	0,0337	0,0077

Выводы. В результате работы получены границы распространения погрешностей измерения геометрических параметров профилей лопаток компрессора ГТД при измерении на КИМ. На основании полученных данных можно сделать вывод, что погрешности измерения рассматриваемых геометрических параметров увеличиваются по высоте пера.

Литература

1. Rajamohan, G. Effect of probe size and measurement strategies on assessment of freeform profile deviations using coordinate measuring machine [Text]/ G. Rajamohan, M.S. Shunmugam, G.L. Samuel // Measurement. – 2011. – № 44. – Pp. 832-841.
2. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера [Текст] – Введ. 1987-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 36 с.
3. Печенин, В.А. Модель оценки точности координатных измерений при контактном методе [Текст]/ В.А.Печенин, М.А. Болотов, А.В. Рыжков // Материалы международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн», г. Тамбов. - 2014 г. - С.215-220.
4. Powell, M.J.D. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis [Text]/ ed. G.A. Watson, Lecture Notes in Mathematics. - Springer Verlag. - 1978.