

УДК 621.431.75

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2015 В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. В. Рузанов, Е. Р. Степанова

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

В статье приводятся три алгоритма измерения геометрии пера лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) (спинки, корыта, входной и выходной кромок) на координатно-измерительных машинах. Первый алгоритм представляет собой однократное сканирование измерительным наконечником сечений лопатки по высоте. Второй алгоритм основан на предварительном совмещении номинального профиля с измеряемым действительным профилем. Для выполнения процедуры наилучшего совмещения измеренного профиля с его номинальными значениями использовался итеративный алгоритм ближайших точек. В третьем алгоритме координаты измеряемых точек кромок вычисляются с использованием сплайна, задаваемого по координатам центров измерительного наконечника (ИН). Выполнено исследование погрешностей измерения геометрии элементов с использованием рассматриваемых алгоритмов. Для выполнения исследований была разработана модель касания ИН об измеряемую поверхность детали, позволяющая рассчитывать координаты точки касания, координаты центра ИН и координаты измеренных точек. Поиск координат точки касания осуществлялся с использованием метода последовательного квадратичного программирования. Применена методика, позволяющая имитировать отклонение формы и расположения действительной поверхности от номинальной. В ходе моделирования были получены зависимости, позволяющие определить средние, нижние и верхние границы распространения погрешности измерения для любой измеряемой точки пера лопатки.

Контактный метод измерения; метод компенсации; отклонение формы; отклонение расположения; ИСП-алгоритм; нелинейная оптимизация; кривизна профиля; погрешность измерения.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-438-447

Точность изготовления лопаток компрессора и турбины значительно влияет на топливную эффективность, надёжность и ресурс авиационного двигателя. Лопатки подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок.

Рабочими поверхностями лопатки является сложная аэродинамическая поверхность, также называемая пером. Перо лопатки – профилированная часть лопатки, находящаяся в потоке воздуха (газа) [1]. К нему предъявляют высокие требования по точности геометрических параметров.

Для измерения поверхностей пера 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 поверх-

ность измеряемой детали или изделия. После осуществления касания выполняется фиксация точки центра измерительного наконечника, а затем расчёт точки касания. В результате множества измерений образуется облако точек, по которому определяют поверхности, плоскости, линии и точки детали, необходимые для нахождения геометрических величин изделия. Контроль геометрии пера лопаток компрессора ГТД производится по сечениям вдоль оси Z [2] (рис. 1).

В работе приводится описание алгоритмов измерения сечений пера лопатки компрессора на координатно-измерительных машинах. Для сравнения алгоритмов приведена методика, позволяющая оценить погрешность контактного измерения, учитывающая вариацию формы и расположения измеряемых поверхностей, обусловленную производственными погрешностями, проявляющимися в ходе изготовления деталей по определённой технологии.

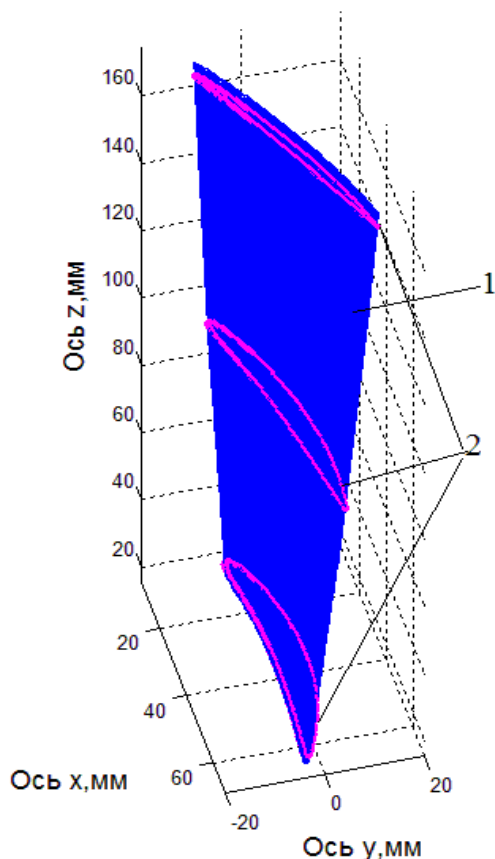


Рис. 1. Поверхность пера лопатки компрессора ГТД (1), контролируемые сечения пера (2)

Методика позволяет имитировать отклонение формы и расположения поверхности, рассчитывать координаты точек касания, центры измерительных наконечников и координаты измеренных точек.

Точки измеряемых поверхностей моделировались из номинальных путём добавления к координатам точек теоретических (CAD) поверхностей отклонения расположения и формы. Величины отклонений формы и расположения выбирались исходя из статистических наблюдений для серии лопаток и справочных данных.

Таким образом, координату точки измеренной поверхности 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) соответственно измеряемой (моделируемой) и номинальной поверхностей;

$\bar{N}_{1 \times 3}$ – 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. Названные компоненты позволяют моделировать отклонения расположения профилей, вызванных погрешностями изготовления, которые встречаются в практике.

В практике производства деталей встречаются две составляющих отклонения формы: систематическое и случайное δ_r . Соответственно в модель измеряемой поверхности закладывались два этих типа отклонений. Систематическое отклонение состоит из макроотклонения формы δ_m и гармонической составляющей отклонения формы δ_s . Случайное отклонение вносится инструментальной погрешностью средства измерения.

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

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

Рассмотрим каждую из этих составляющих.

Макроотклонение формы представляет собой профиль, уменьшенный по толщине от теоретического профиля. В [3] описаны рекомендации по предельным значениям и характеру этого отклонения. При максимальном отклонении формы имеется так называемый «минимальный» профиль. Значения отклонения неодинаковы для различных частей профиля. Максимальное значение отклонения принимает в месте расположения максимальной толщины профиля и принимает $0.5 \cdot \delta_{m_max}$ на сторону, минимальное в местах кромок (рис. 2).

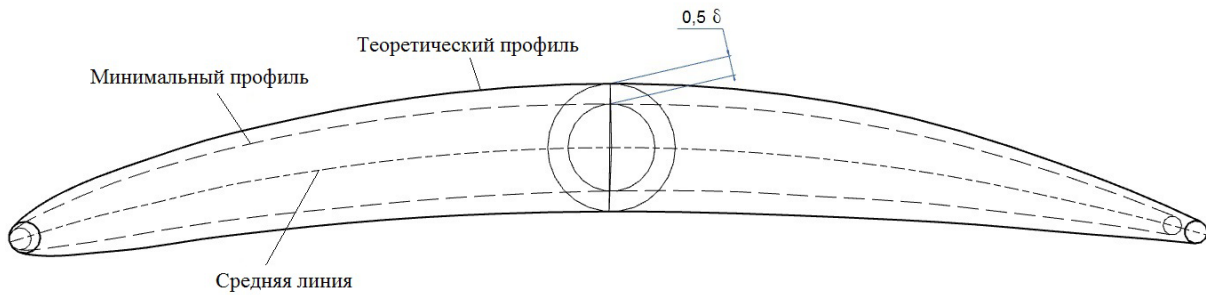


Рис. 2. Моделируемое макроотклонение формы для корневого сечения

Гармоническое отклонение формы может быть аппроксимировано с использованием композиции функций синуса и косинуса по следующей формуле:

$$\delta_s = A \cdot \sin(w_{\sin} \cdot x + \varphi_{\sin}) + B \cdot \cos(w_{\cos} \cdot x + \varphi_{\cos}), \quad (3)$$

где A и B – амплитуды составляющих синуса и косинуса соответственно; w_{\sin} и w_{\cos} задано как $k_{\sin} \cdot 2\pi/L_x$ и $k_{\cos} \cdot 2\pi/L_x$ соответственно; k_{\sin}, k_{\cos} – частоты гармонических компонентов вдоль оси x ; L_x – опорная длина вдоль оси x ; $\varphi_{\sin}, \varphi_{\cos}$ – фазы угла синуса и косинуса.

Для воспроизведения процесса измерения создана модель, позволяющая производить оценку возникающей погрешности определения точки касания измерительного наконечника о поверхности деталей [4].

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 измеряемой поверхности и определяется точка касания. Измеряемая поверхность математически описывается с помощью кусочных сплайнов [5].

Для расчёта координат точек касания измерительного наконечника о поверхность детали в декартовой системе

координат используется базовый метод [6]. Для удобства расчётов 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:

$$f(x, y) = |z_o - z_n| \rightarrow \min, \quad (4)$$

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:

$$\begin{aligned} |O_x - x| &\leq R, \\ |O_y - y| &\leq R, \\ x &\in E_x, \\ y &\in E_y, \end{aligned} \quad (5)$$

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 .

Поиск координат точки касания C осуществляется с использованием метода последовательного квадратичного программирования. 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 [7].

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

$$D = O + R \cdot N_{comp}. \quad (6)$$

5. Отклонение координат точки на действительной поверхности C_i от координат соответствующей точки измеренной поверхности D_i характеризует погрешность компенсации радиуса измерительного наконечника в i -й точке измерения:

$$\delta_{R_{comp.}} = \|C_i - D_i\|. \quad (7)$$

Первый алгоритм представляет собой однократное сканирование измерительным наконечником сечений лопатки по высоте.

При контроле пера лопаток компрессора ГТД на контактных КИМ особую сложность составляют области входной и выходной кромок. Контроль сечения лопаток осуществляется, как правило, методом сканирования и измеряется множество точек вдоль всего профиля (первый алгоритм измерения). Плотность точек измерения на входной и выходной кромках целесообразно брать выше, чем на спинке и корыте. Радиусы кромок близки или даже меньше радиусов измерительных наконечников, и при наличии

относительно высокого отклонения расположения и/или формы пера погрешности измерения кромок слишком велики.

Одним из ключевых параметров, характеризующих сложность изготовления и контроля детали, является величина кривизны в точках её поверхностей и скорость изменения этой кривизны. Чем более криволинейна поверхность, тем сложнее её описать конструктору, выполнить обработку поверхности и проконтролировать точность изготовления. Детали типа лопаток ГТД, пресс-формы, штампы, ряд корпусных деталей имеют существенную кривизну.

Формулы для нахождения центров кривизны и радиусов кривизны параметрически заданной кривой f профиля детали в точке P_i имеют вид:

$$x_{кр} = f_x(P_i) - \frac{(f_x'(P_i))^2 + (f_y'(P_i))^2}{f_x'(P_i) \cdot f_y''(P_i) - f_x''(P_i) \cdot f_y'(P_i)} \cdot f_y'(P_i), \quad (8)$$

$$y_{кр} = f_y(P_i) - \frac{(f_x'(P_i))^2 + (f_y'(P_i))^2}{f_x'(P_i) \cdot f_y''(P_i) - f_x''(P_i) \cdot f_y'(P_i)} \cdot f_x'(P_i), \quad (9)$$

$$R_{кр} = \frac{((f_x'(P_i))^2 + (f_y'(P_i))^2)^{3/2}}{|f_x'(P_i) \cdot f_y''(P_i) - f_x''(P_i) \cdot f_y'(P_i)|}. \quad (10)$$

Значение кривизны в точках поверхности обратно пропорционально радиусу кривизны.

Наибольшая величина погрешностей измерений возникает в точках кромок. Это связано с более высокими значениями кривизны в точках кромок относительно точек спинки и корыта.

Для снижения погрешности измерения входной и выходной кромок предлагается второй алгоритм измерения, основанный на предварительном совмещении действительного профиля с теоретическим.

1. Предварительно измерить точки спинки или корыта с 5% отступом от границ этих участков и невысокой плотностью точек.

2. Выполнить процедуру наилучшего совмещения измеренного профиля с его номинальным значением с использовани-

ем итеративного алгоритма ближайших точек (ICP) [8]. Это часто используемый в координатных измерениях итерационный алгоритм, у которого на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль координатных осей. Целевую функцию алгоритма можно представить в виде

$$f(R, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|R \cdot p_i + T - q_i\|^2 \rightarrow 0, \quad (11)$$

где n – количество точек совмещения;

q_i – координаты точки на САД-модели;

p_i – координаты точки измеренной поверхности, соответствующей q_i .

Таким образом определяются параметры отклонения расположения (матрицы T и R из (2)).

3. Произвести компенсацию отклонения расположения измеряемого профиля путём поворота и транспонирования координат точек номинального профиля.

4. Произвести полное измерение профиля.

Таким образом, с помощью рассмотренного выше алгоритма возможно снизить погрешность измерения, вызванную отклонением расположения профиля. Для определения координат точек измеряемых поверхностей кромок лопатки, совмещения теоретического и действительного профилей может применён иной способ вычисления измеренной точки, нежели (6).

В третьем алгоритме помимо предварительного совмещения измеряемого и теоретического профилей применяется способ расчёта координат измеренных точек, основанный на характере действительного профиля, а не теоретического. Векторы нормалей для расчёта координат точек касания определяются по интерполирующей кривой (поверхности), проходящей через координаты центров ИН. Геометрическая постановка модели расчёта представлена на рис. 3. Исходные данные для третьего алгоритма (рис.3): координаты центров ИН P при измерении реального профиля, количество точек n , радиус ИН R_h .

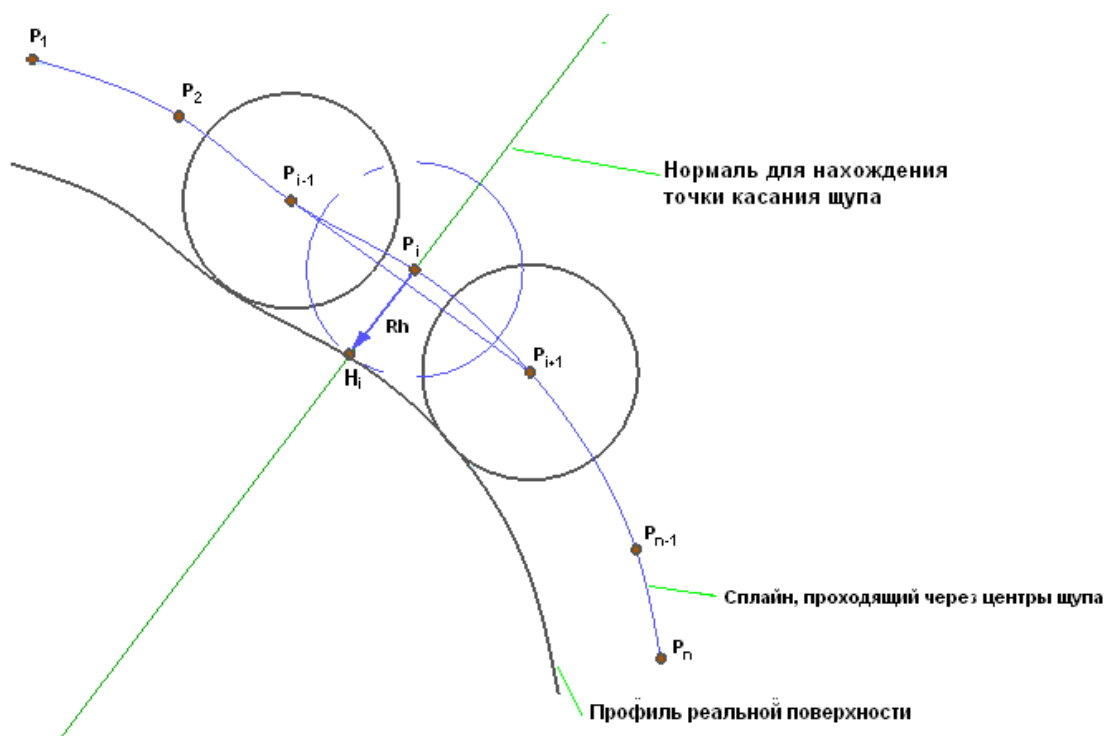


Рис. 3. Расчёт координат измеренных точек путём аппроксимации массива центров ИН

Рассмотрим этапы третьего алгоритма измерения:

1. По координатам точек P и их количеству задаётся кусочный сплайн третьей степени.

2. Через точки центров ИН к сплайнам строятся нормали.

3. По направлению движения щупа (найденным нормальям) откладывается расстояние, равное радиусу щупа. Рассчитанные координаты точки H_i на нормалях сплайна характеризуют точки касания ИН о действительную поверхность детали.

Для исследования возникающих погрешностей измерения пера и сравнения перечисленных выше алгоритмов было произведено имитационное моделирование процесса координатных измерений серии профилей с отклонениями формы и расположения, сгенерированных случайным образом.

Было смоделировано 100 сечений корневой, средней и торцевой частей пера лопаток компрессора ГТД, предельные значения отклонения формы которых изменялись по нормальному закону. На основании статистических данных по измерениям этого типа деталей и согласно [3] принято, что максимальное значение отклонения формы не превышает 0.11 мм в тело детали. Диапазон изменения амплитуды волнистости составил ± 0.01 мм. Погрешность измерения определялась как значения расстояний между кривыми измеренного и действительного профиля пера лопатки в точках действительного профиля.

Максимальное смещение сечения относительно системы координат хвостовика лопатки составляет 0.1 мм, угол разворота профиля изменяется в пределах $\pm 9^\circ$.

Проводилось измерение спинки и корыта по 30 точкам, входной и выходной

кромки – по 20 точкам. Для третьего алгоритма измерения было рассмотрено два случая: измерение кромок по 20 и 40 точкам. Радиус ИН в исследованиях принят равным 0.5мм.

Распределение погрешностей в точках подчиняется двум основным законам: нормальному и обобщающему бета-распределению, которое представлено экспоненциальным законом. Для выборки погрешностей в каждой измеренной точке проводился тест Лиллиефорса на непротиворечие распределения генеральной совокупности значений случайной величины нормальному закону [9]. 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 в диапазон $[0,1]$ и рассчитывались параметры бета-распределения. Соответственно в каждой измеренной точке рассчитывалось математическое ожидание, а также верхняя и нижняя оценка погрешности измерения координат рассматриваемой точки с доверительной вероятностью 99,73%.

По полученным значениям погрешности измерения в точках профиля рассчитывались средние, нижние и верхние границы распространения погрешностей вдоль измеряемого профиля (рис.4).

В табл. 1 приведены максимальные погрешности измерений для участков спинки, корыта, входной и выходной кромок при использовании рассматриваемых алгоритмов.

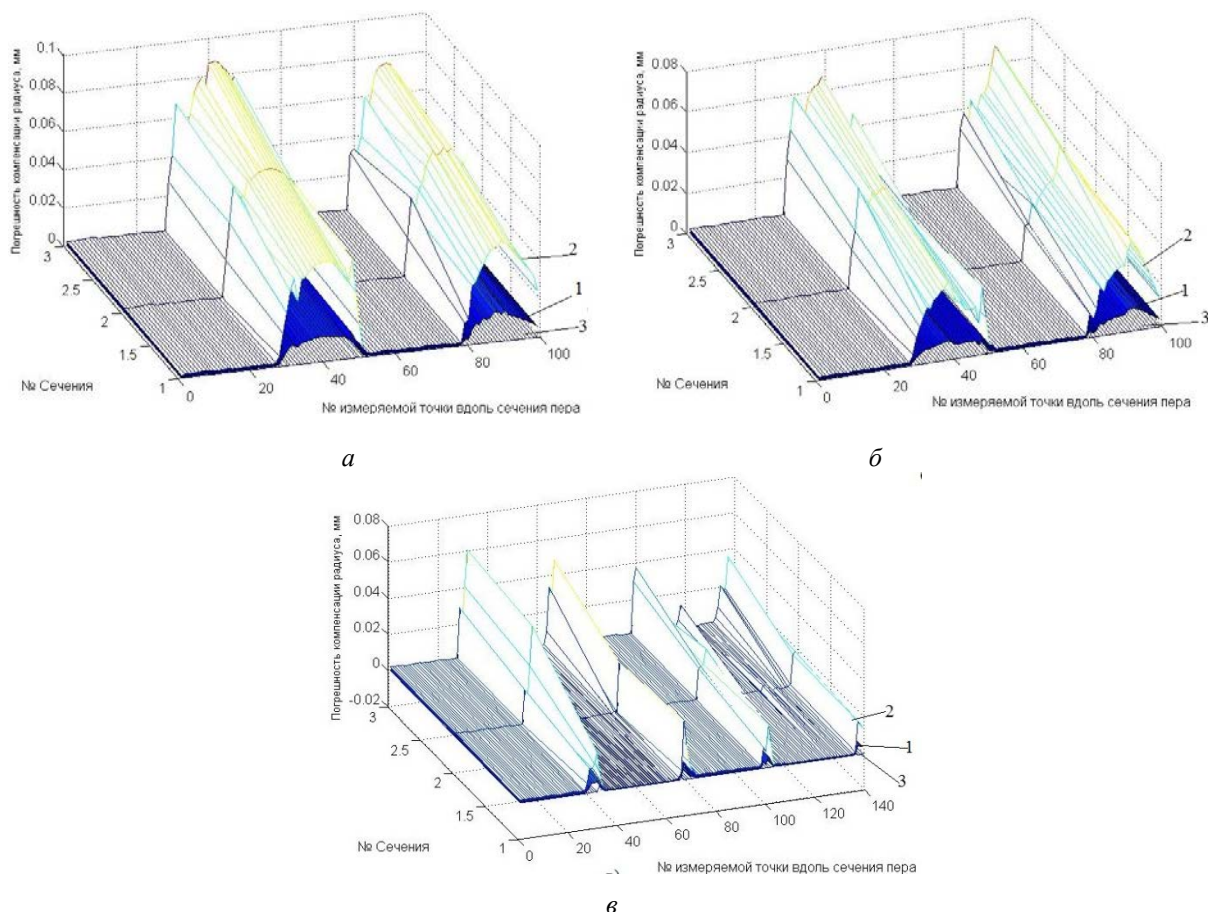


Рис. 4. Вероятностное распределение погрешности измерения сечений 100 лопаток с помощью первого (а), второго (б) и третьего (в) алгоритмов:
 1 – наиболее вероятное, 2 – верхняя граница, 3 – нижняя граница значений погрешности

Таблица 1. Математическое ожидание (М), верхние (Max) и нижние (Min) границы величин погрешностей измерения точек сечений пера лопаток при разных алгоритмах измерения, мм

Сечение	Вероятностная характеристика	Спинка	Корыто	Входная кромка	Выходная кромка
Первый алгоритм – однократное сканирование					
Корневое сечение	М	0,0046	0,0153	0,0050	0,0159
	Max	0,0171	0,0523	0,0173	0,0524
	Min	0,0004	0,0019	0,0010	0,0022
Среднее сечение	М	0,0055	0,0218	0,0067	0,0210
	Max	0,0207	0,0658	0,0213	0,0682
	Min	0,0004	0,0028	0,0012	0,0034
Торцевое сечение	М	0,0073	0,0311	0,0089	0,0249
	Max	0,0273	0,0870	0,0314	0,0764
	Min	0,0005	0,0079	0,0008	0,0053
Второй алгоритм – использование частичной компенсации отклонения расположения					
Корневое сечение	М	0,0038	0,0267	0,0034	0,0123
	Max	0,0134	0,0614	0,0116	0,0442
	Min	0,0005	0,0070	0,0005	0,0010
Среднее сечение	М	0,0057	0,0250	0,0053	0,0160
	Max	0,0205	0,0709	0,0187	0,0554
	Min	0,0004	0,0036	0,0005	0,0023
Торцевое сечение	М	0,0077	0,0305	0,0084	0,0209
	Max	0,0290	0,0649	0,0299	0,0682
	Min	0,0004	0,0039	0,0007	0,0032

Окончание таблицы 1

Сечение	Вероятностная характеристика	Спинка	Корыто	Входная кромка	Выходная кромка
Третий алгоритм – использование координат центров ИН для расчёта координат точек касания					
Корневое сечение	М	0,0038	0,0266	0,0034	0,0110
	Max	0,0134	0,0614	0,0116	0,0318
	Min	0,0005	0,0070	0,0005	0,0040
Среднее сечение	М	0,0057	0,0260	0,0053	0,0163
	Max	0,0205	0,0709	0,0187	0,0348
	Min	0,0004	0,0062	0,0005	0,0105
Торцевое сечение	М	0,0077	0,0582	0,0084	0,0249
	Max	0,0290	0,0827	0,0299	0,0433
	Min	0,0004	0,0409	0,0007	0,0190
Третий алгоритм – использование координат центров ИН для расчёта координат точек касания. Количество точек измерения кромок в 2 раза больше, чем в предыдущих случаях.					
Корневое сечение	М	0,0038	0,0118	0,0034	0,0092
	Max	0,0134	0,0329	0,0116	0,0249
	Min	0,0005	0,0040	0,0005	0,0065
Среднее сечение	М	0,0057	0,0309	0,0053	0,0098
	Max	0,0205	0,0551	0,0187	0,0288
	Min	0,0004	0,0196	0,0005	0,0024
Торцевое сечение	М	0,0077	0,0323	0,0084	0,0150
	Max	0,0290	0,0623	0,0299	0,0375
	Min	0,0004	0,0023	0,0007	0,0064

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

Также можно заключить, что точность измерения кромок по первому алгоритму (однократного сканирования) недостаточна для адекватного расчёта геометрических величин сечения.

При сравнении погрешностей измерения, возникающих при использовании трёх рассматриваемых алгоритмов, можно сделать вывод, что третий алгоритм позволяет производить контроль геометрии

пера с наименьшей погрешностью. При использовании третьего алгоритма для повышения точности компенсации радиуса можно использовать большее количество точек при измерении кромок. Это связано с тем, что при большем количестве точек измерения сплайн, задаваемый по координатам центров ИН, позволяет более точно описать действительную геометрию. При использовании первого и второго алгоритмов величина погрешностей не зависит от количества точек измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 по договору № 27/13 от 15.02.2013г с использованием оборудования центра коллективного пользования САМ технологий.

Библиографический список

1. ГОСТ 23537-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1979. 30 с.

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.org/ 10.1016/j.cirp.2007.10.008

3. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. М.: Издательство стандартов, 1986. 36 с.

4. Печенин В.А., Болотов М.А., Рыжков А.В. Модель оценки точности коор-

динатных измерений при контактном методе // Материалы международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2015. С. 215-220.

5. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.

6. Shunmugam M.S., Radhakrishnan M.S. Comparison of difference methods for computing the two-dimensional envelope for surface finish measurements // Computer-Aided Design. 1976. V. 8, Iss. 2. P. 89-93. doi.org/10.1016/0010-4485(76)90090-7

7. Powell M.J.D., Watson G.A. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis // Lecture Notes in Mathematics. 1978. V. 630. P. 144-157. doi.org/10.1007/BFb0067703

8. Besl P.J., MckayN.D. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. V. 14, Iss. 2. P. 239-256. doi.org/10.1109/34.121791

9. Lilliefors H. On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown // Journal of the American Statistical Association. 1967. V. 62, Iss. 318. P. 399-402. doi.org/10.2307/2283970

Информация об авторах

Печенин Вадим Андреевич, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru. Область научных интересов: координатные измерения, процессы сборки, математические методы.

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

Рузанов Николай Владимирович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kinform@mail.ru. Область научных интересов: координатные измерения, математические методы, разработка информационных систем.

Степанова Екатерина Робертовна, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: ekaterinka198787@mail.ru. Область научных интересов: координатные измерения, процессы сборки, математические методы.

COMPARATIVE RESEARCH OF ALGORITHMS OF MEASURING THE GEOMETRY OF COMPLEX PROFILES OF GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADES

© 2015 V. A. Pechenin, M. A. Bolotov, N. V. Ruzanov, E. R. Stepanova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The paper presents three algorithms for the measurement of gasturbine engine (GTE) compressor blades airfoil (suction side, pressure side, leading and trailing edges) geometry using coordinate measuring machines. The first algorithm is a single scan of the heightwise blade section using a test point. The second algorithm is based on the pre-alignment of the nominal profile with the measured actual profile. An iterative closest-point algorithm is used to carry out the procedure of the best possible alignment of the measured ptofile and the nominal one. In the third algorithm, the coordinates of the measured points of the edges are calculated using the spline defined by the coordinates of the test point (TP) center. The research of errors of measuring the geometry of the

elements using the algorithms mentioned above was carried out. To perform the research a model was developed simulating the contact of the TP and the surface of the part being measured. The model makes it possible to calculate the coordinates of the contact point, the center coordinates and the coordinates of the MT of the measured points. The search for the coordinates of the contact was performed using the method of sequential quadratic programming. A procedure was also used that makes it possible to simulate the deviation of the profile and surface position from the nominal. In the course of the simulation dependences for determining the average, lower and upper boundaries of the measurement error distribution for any airfoil point being measured were obtained.

Contact measurement method; method of compensation; profile and surface position deviation; ICP-algorithm; nonlinear optimization; curvature; measurement uncertainty.

References

1. GOST 23537-79. Vines of aircraft axial-flow compressors and turbines. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 30 p. (In Russ.)
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.org/10.1016/j.cirp.2007.10.008
3. OST 1 02571-86. Compressor and turbine blades. Tolerances size, shape and location of the blade airfoil. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. 36 p. (In Russ.)
4. Pechenin V.A., Bolotov M.A., Ryzhkov A.V. Model estimates of the accuracy of coordinate measurements with contact method. *Materials of international scientific and practical conference «Virtual simulation, prototyping and industrial design»*. Tambov: Tambov State Technical University Publ., 2015. P. 215-220. (In Russ.)
5. Lee K. *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)* [Foundations of CAD (CAD/CAM/CAE)]. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2004.
6. Shunmugam M.S. Radhakrishnan M.S. Comparison of difference methods for computing the two-dimensional envelope for surface finish measurements. *Computer-Aided Design*. 1976. V. 8, Iss. 2. P. 89-93. doi.org/10.1016/0010-4485(76)90090-7
7. Powell M.J.D., Watson G.A. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis. *Lecture Notes in Mathematics*. 1978. V. 630. P. 144-157. doi.org/10.1007/BFb0067703
8. Besl P.J., McKay N.D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. V. 14, Iss. 2. P. 239-256. doi.org/10.1109/34.121791
9. Lilliefors H. On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*. 1967. V. 62, Iss. 318. P. 399-402. doi.org/10.2307/2283970

About the authors

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

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

Ruzanov Nikolay Vladimirovich, postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University. E-mail: kinform@mail.ru. Area of Research: coordinate measurements, assembly processes, software development.

Stepanova Ekaterina Robertovna, external postgraduate student of the Department of Engine Production Technology, Samara State Aerospace University. E-mail: ekaterinka198787@mail.ru. Area of Research: coordinate measurements, assembly processes, mathematical methods.