## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД, КОНТРОЛИРУЕМОЙ НА КИМ, ПРИ БАЗИРОВАНИИ ПО ХВОСТОВИКУ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ

© 2013 М.А. Болотов, В.А. Печенин, А.О. Чевелева

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

#### Поступила в редакцию 14.09.2013

В статье приводятся результаты исследований части погрешностей измерений пера лопатки компрессора ГТД, вызванных процессом базирования по хвостовику трапециевидной формы при контроле на координатно-измерительных машинах.

Ключевые слова: погрешность, базирование, хвостовик трапециевидной формы, лопатка компрессора ГТД, метод «минимума-максимума», метод Монте-Карло.

Необходимость контроля профиля пера лопатки компрессора ГТД определяется тем, что его геометрия в значительной степени определяет работоспособность, расходные характеристики и показатели эффективности ГТД [1]. Допуск на форму пера для большинства лопаток находится в диапазоне от 0,04...0,1мм, допуск на расположение от 0,1...0,3 мм [2]. Задачей контроля профиля пера является выявление отклонения точек профиля поверхности в пределах поля допуска (контроль геометрического параметра формы), а также определения положения контрольных сечений в допустимых пределах (контроль расположения профиля).

Контроль геометрических параметров пера в случае прямого базирования по хвостовику с использованием координатно-измерительных машин укрупненно осуществляется в следующем порядке:

 Измеряются базовые поверхности хвостовика, относительно которых координируются расположение пера, осуществляется расчет «физической» системы координат (репера) и задана поверхность пера в САD модели;

2. Выполняется измерение координат точек пера, оценивается совокупное отклонение формы и положения сложной поверхности;

3. Выполняется метод наибольшего соответствия, после которого становится возможным оценивание отклонения положения профиля пера

E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru

Чевелева Анастасия Олеговна, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: Stasia-5@yandex.ru по полученным трансформациям исходной системы координат.

На рис. 1 приведен возможный способ крепления лопатки в тисках для обеспечения одновременного доступа измерительного наконечника координатно-измерительной машины к элементам хвостовика и пера лопатки.

Расчёт отклонений координат точек пера выполняется относительно системы координат получаемой вычислением по измеренным координатам точек базовых поверхностей хвостовика. Поэтому погрешность измерений геометрических параметров пера лопаток, в том числе складывается из погрешностей вносимых процессом базирования, и может быть определена как расстояние между её координатами в номинальной и "деформированной" системах координат (реперах):

$$\Delta = \sqrt{(\mathbf{x}_{H}"-\mathbf{x}_{H})^{2} + (\mathbf{y}_{H}"-\mathbf{y}_{H})^{2} + (\mathbf{z}_{H}"-\mathbf{z}_{H})^{2}}, (1)$$

где х<sub>н</sub>, у<sub>н</sub>, z<sub>н</sub> – координаты измеряемой точки в номинальной системе координат (репере);

х"<sub>н</sub>, у"<sub>н</sub>, z"<sub>н</sub> – координаты измеряемой точки в "деформированной" системе координат (репере).

Координаты точки в "деформированной" системе координат могут быть определены исходя из выражения:

$$P_0 = P_0 \cdot A, \tag{2}$$

где **Р**<sub>0</sub> – матрица однородных координат ряда точек построенных на системе поверхностей в "деформированной" системе координат;

**P**• – матрица однородных координат ряда точек построенных на системе поверхностей в номинальной системе координат;

 А – матрица перехода между номинальной и "деформированной" систем координат (реперах) учитывающая все погрешности.

Таким образом, необходимо определить матрицы А, характеризующие погрешность процес-

Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства двигателей летательных annapamos. E-mail: maikl.bol@gmail.com Печенин Вадим Андреевич, студент факультета двигателей летательных annapamos.



Рис. 1. Крепление лопатки с использованием тисков

са базирования и содержащие информацию о погрешностях по лишаемым степеням свободы. Для определения матриц А можно предложить метод «минимума-максимума»[3] и численное моделирование процесса координатных измерений с использование метода Монте-Карло [4]. Рассмотрим перечисленные методы.

В соответствии с методом «минимума-максимума» необходимо определить крайние границы в пределах, которых можно ожидать появление погрешности. Для плоских поверхностей трапециевидного хвостовика контролируемых заменяющим элементом «плоскость» погрешность, вносимую КИМ при измерении плоскостей можно принять как направленную по нормали к измеряемой плоскости, поскольку измерение производится подводом измерительного наконечника также по нормали. В соответствии с этим в пространстве возникает область вероятных положений плоскости, аналогичная нормированию параметра плоскостности. На рис. 2 приведена геометрическая постановка задачи определения поля рассеивания репера при базировании по хвостовику трапециевидной формы в двух- и трёх- мерной постановках для метода «минимума-максимума».

Поле рассеивания репера рассчитывается исходя из крайних положений заменяющего элемента «плоскость» в трёхмерной постановке и заменяющего элемента «линия» в двухмерной постановке (рисунок 1). Для ряда плоскостей (линий) возможно множество таких положений, которые формируют множество матриц А. Максимальная оценка погрешности базирования выбирается с использованием выражений (1) и (2), путём перебора возможного множества значений А.

Методика оценки с использованием метода Монте-Карло заключается в воспроизведении процесса измерения координат точек плоских поверхностей хвостовика. Каждая плоская повер-



Рис. 2. Геометрическая постановка задачи определения поля рассеивания репера для метода «минимума-максимума»: а – в двухмерной постановке; б – в трёхмерной постановке



**Рис. 3.** Геометрическая постановка задачи определения поля рассеивания репера для метода Монте-Карло

хность аппроксимируется заменяющим элементом «плоскость» с вычислением вектора нормали а и координаты точки лежащей на плоскости. Геометрическая постановка задачи определения поля рассеивания репера для метода Монте-Карло приведенана рис. 3.

На рис. З отображены плоскости: ПЛ1 – подошвы замка, ПЛЗ, ПЛ4 – угла клина ласточкиного хвоста, ПЛ2 – торца у входной кромки. Точка P<sub>0</sub> является центром системы координат. По полученным в ходе аппроксимации геометрическим параметрам плоскостей определяется репер и соответствующая матрица A, с использованием которой вычисляется погрешность по выражениям (1) и (2).

Часть погрешности измерения, обусловленная процессом базирования, будет зависеть от координат точек пера лопатки, поскольку присутствует угловая компонента. Для исследований была выбрана лопатка компрессора 2 ступени двигателя НК-12 с длиной пера 172 мм.

Рассмотрим ряд выделенных точек пера приведенных на рисунке 4,а и в таблице 1. На рисунке 4,6приведена графическая иллюстрация отклонения от плоскостности поверхностей хвостовика полученных шлифованием. В соответствии с техническими требованиями к хвостовику лопатки отклонение от плоскостности ограничивается величиной до 0,006 мм.

Исследования проводились на координатноизмерительной машине DEA GlobalPerformance 07.10.07 с инструментальной погрешностью:

 $E_{\rm L, MPE} = 1,7 + L/333,$  мкм, (3) где L – длина измеряемого расстояния в пределах рабочего объема, мм.

Для практического подтверждения проводился эксперимент по определению повторяемости измерения координат точек. Он заключался в 30-ти кратном повторении измерения 9-ти точек пера лопатки, при полном выполнении цикла управляющей программы включая базирование по замку трапециевидной формы.



**Рис. 4.** Экспериментальные точки пера (а) и графическая иллюстрация отклонения от плоскостности поверхностей хвостовика (б)

Nº	Координаты точки, (x; y; z)	Модели оценки погрешностей измерения			
		По методу		Монте-Карло	Эксперимен-
		«минимума-максимума»		при четырёх	тальные 6 (о)
		Вдвухмерной	В трехмерной	измеряемых	
		постановке	постановке	точках	
1	-1.886; 64.433; 17.001	0.0050	0,0082	0,0123	0,0090 (0,0015)
2	4.115; 36.406; 17.002;	0,0059	0,0074	0,0090	0,0072 (0,0012)
3	-1.330; 10.243; 16.994;		0,0065	0,0082	0,0063 (0,0011)
4	-6.253; 9.453; 100.115;	0.0120	0,0148	0,0105	0,0090 (0,0015)
5	3.372; 36.394; 100.126;	0,0138	0,0153	0,0126	0,0120 (0,0020)
6	5.824; 64.643; 100.133;		0,0166	0,0159	0,0120 (0,0020)
7	12.191;60.978;172.837;	0.0045	0,0273	0,0214	0,0144 (0,0024)
8	4.064; 36.383; 172.827;	0,0245	0,0262	0,0192	0,0156 (0,0026)
9	-9.620; 13.276; 172.813		0,0258	0,0178	0,0144 (0,0024)

Таблица 1. Контролируемые точки на поверхности пера и оценки погрешности измерения, мм

Анализируя полученные результаты можно отметить, что:

- оценки погрешностей, полученных с помощью метода Монте-Карло превышают на величину до 15% оценки, полученные в результате эксперимента, что вероятно можно объяснить тем, что на практике сложно реализовать весь ансамбль реализаций случайной величины;

- оценки, полученные с помощью метода «минимума-максимума» больше по величине до 15% оценок полученных с использованием метода Монте-Карло, что можно объяснить тем фактом, что в основе метода «минимума-максимума» закладываются предельные значения погрешностей, проявление которых маловероятно;

- оценки, полученные с помощью метода «минимума-максимума» в трехмерной постановке больше по величине до 8...20% оценок полученных в двухмерной постановке, что можно объяснить тем, что появляется дополнительная компонента погрешностей (вдоль оси Х), которая влияет на положение определяемой системы координат.

На рис. 5 приведена зависимость часть погрешности измерения, обусловленная процессом базирования от количества измеряемых точек на поверхностях хвостовика и высоты сечения.

Анализируя характер погрешности можно отметить, что в процессе измерений наибольшую составляющую вносит угловая компонента позиционирования, что подтверждается возрастанием погрешности по высоте контролируемых сечений.

Часть погрешности базирования составляет 0,024 мм при величине инструментальной погрешности координатно-измерительной машины 2,22 мкм для измеряемой длины 172, что превосходит на порядок и определяет актуальность исследований.

На рис. 6 приведен график распределения



**Рис. 5.** Зависимости погрешностей измерения точек 1, 6 и 7 от количества измеряемых точек на базовых поверхностях лопатки 2 ступени



**Рис. 6.** Распределение погрешности измерения точек пера

погрешности измерения точек поверхности пера при 4 контролируемых точках на базовых поверхностях, для различных точек табл. 1.

Анализируя данные характеристики можно отметить, что вид распределения близок к Гамма-распределению, однако данная гипотеза подтвердилась лишь для нескольких случаев. Можно предположить, что распределение включает в себя композицию из закона Гаусса, Гамма и равновероятного распределений.

Данная научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Производство газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин [под.ред. В.В. Крымова]. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.
- Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учебное пособие / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев. М.: Машиностроение, 2002. 328 с.
- 3. Иващенко И.А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
- Болотов М.А., Лёзин И.А. Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно измерительных машинах // Вестник СГАУ. 2011. №2 (26). С. 140-150.

## PROCESS MEASURING OF FEATHER COMPRESSOR BLADE OF GTE BASED ON SHANK TRAPEZOIDAL TYPE CONTROLLED ON CMM MODELING

© 2013 M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, A.O. Cheveleva

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

The article has been represented results of research of part measuring uncertainty feather compressor GTE blade caused with based process on shank of trapezoidal type under the control on the coordinate measuring machines. Keywords: uncertainty, basing, shank of trapezoidal type, compressor GTE blade, method «minimum-maximum», method Monte-Carlo.

Michael Bolotov, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Aircraft Engine Production Department. E-mail: maikl.bol@gmail.com. PecheninVadim, Student at the Aircraft Engine Faculty. E-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru Anastasia Cheveleva, Graduate Student at the Aircraft Engine Production Department. E-mail: Stasia-5@yandex.ru