

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДИСКАХ ТУРБИН И КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2011 М. А. Болотов, А. Н. Жидяев, И. Л. Шитарев, А. О. Чевелева

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

Разработаны модели погрешности измерения угловых параметров расположения отверстий в дисках турбин и компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием положений теории вероятностей и математической статистики. Проведены исследования зависимостей погрешности измерения от различных факторов.

Погрешность, плотность вероятности, методика измерения, координатный метод контроля, угловое положение.

Рабочие характеристики турбомашин в значительной степени определяют-ся точностью исполнения технических требований, предъявляемых к составляющим их деталям. Высокие технические требования накладывают жёсткие условия к точности изготовления и к методике выполнения контрольных операций [1].

Традиционно при осуществлении контрольных операций при производстве авиационной техники используется большое количество специальных приборов и оснастки. Однако в последнее время наблюдается тенденция увеличения использования универсальных измерительных средств типа трёхосевых координатно-измерительных машин (КИМ). Данные средства позволяют решать различные по сложности задачи контроля.

В дисках и валах ГТД часто для углового и осевого позиционирования используется система равномерно расположенных периферийных отверстий и центрирующий поясok. Точность углового расположения отверстий оказывает влияние на равномерность радиальных зазоров между лопатками и статором, а также на вибрационное состояние ротора. Последнее обусловлено возникновением переко-са оси вращения диска или вала относительно оси статора вследствие низкой

точности, что может вызвать смещение центра масс.

Рассмотрим систему конструкторских баз, обеспечивающих соединение дисков и валов ряда моделей ГТД. Она включает в себя: упорные торцы, к которым предъявляется требование по взаимному биению на уровне 0,02 мм, центрирующий поясok с допуском 0,024 мм, а также серию равномерно расположенных позиционных отверстий с допуском на диаметр в пределах 0,023 мм и допуском на позиционное отклонение до 0,02 мм. Параметры углового расположения приведены на рис. 1, а.

Контроль углового расположения в соответствии с традиционной методикой осуществляется с помощью измерительных скоб, которые позволяют измерить расстояние между соседними образующими отверстий. Далее на основе измеренных диаметров отверстий и расстояний рассчитывается величина хорды, которая сравнивается с номинальным значением. Номинальная величина хорды, образованной центрами отверстий, определяется по формуле

$$F = 2R \sin(a / 2), \quad (1)$$

где

R – радиус делительной окружности, на которой располагаются центры, мм;

α – угол между отверстиями, рад.

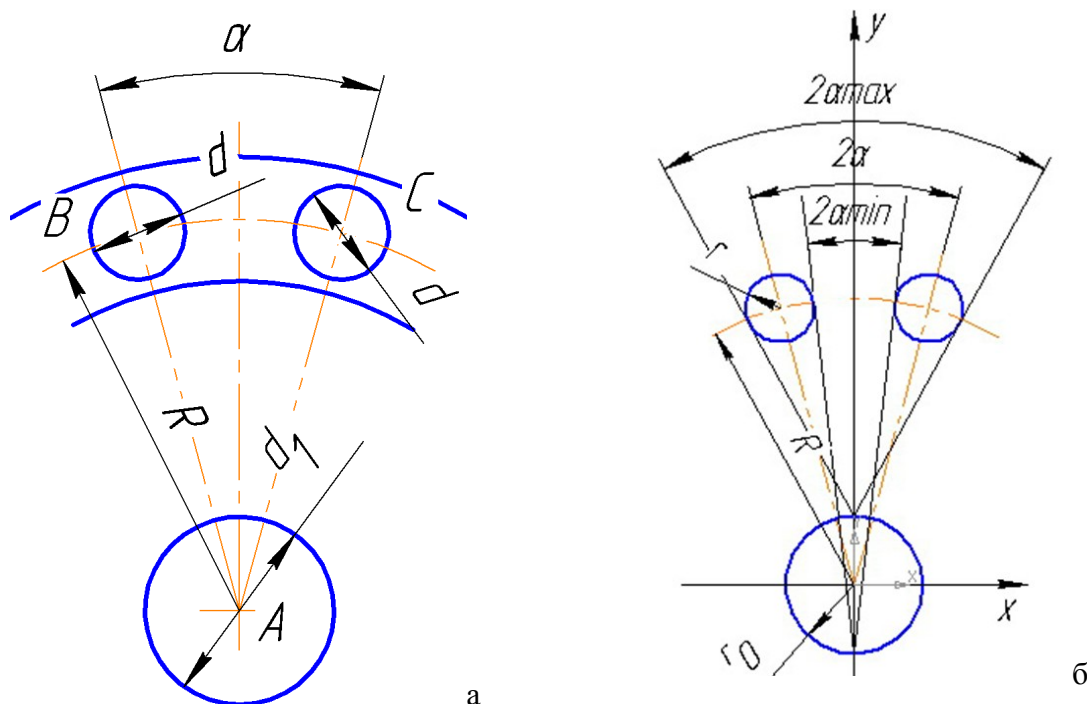


Рис. 1. Параметры углового расположения отверстий:

а) задание углового расположения между осями отверстий; б) геометрическая постановка задачи

Максимально допустимая погрешность средства измерения при контроле хорды, образованной двумя центрами, определяется следующим образом:

$$\Delta = 0,3 \cdot T = 0,3 \cdot 0,02 = 0,006 \text{ мм.} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) устанавливают взаимосвязь между предельными значениями погрешности измерения углового расположения и допуском на расположение, выраженным в линейном виде.

Измерение с использованием КИМ реализует координатный метод. Он основан на дискретной замене реальных поверхностей деталей конечным числом точек, измеряемых на их поверхностях. На основе измеренного облака точек рассчитываются параметры заменяющих элементов (ЗЭ), таких, как линия, окружность, плоскость, цилиндрическая поверхность, сфера и т.д. [2].

Рассмотрим методику измерения углового параметра КИМ. Суть методики состоит в измерении угла между двумя лучами. Первый луч, базовый, проходит через центральные точки: ЗЭ окружность,

соответствующий центрирующему пояску (отверстие А на рис.1, а), и одного ЗЭ, принятого в качестве угловой базы (отверстие В на рис.1, а). Второй луч образуется построением между центральными точками: ЗЭ окружность, соответствующего центрирующего пояска (отверстие А на рис.1, а) и ЗЭ окружность соответствующего отверстия (отверстие С на рис.1, а), до которого производится измерение углового положения относительно базового углового отверстия. На рис.1, а используются следующие обозначения:

d1 – диаметр центрирующего пояска,
d – диаметры периферийных отверстий,
R – радиус делительной окружности,
 α – угол между данными лучами.

Как видно, поле рассеивания измеряемого угла α будет зависеть от полей рассеивания центров ЗЭ окружность, соответствующих данным отверстиям, радиуса делительной окружности R, номинального измеряемого угла α . Таким образом, погрешность измерения может быть представлена [3,4] в следующем виде

$$\sigma_{изм} = f(\sigma_A; \sigma_B; \sigma_C; \alpha; R_{дел}), \quad (3)$$

где

$\sigma_A; \sigma_B; \sigma_C$ – среднеквадратичные отклонения положений центров периферийных отверстий и центрирующего пояска диска.

Установим аналитическую взаимосвязь между данными параметрами путем определения максимального α_{max} и минимального α_{min} значения угла в соответст-

вии с обозначениями, представленными на рис.1, б:

r – радиус поля рассеивания от измерения периферийного отверстия,

r_0 – радиус поля рассеивания от измерения центрирующего пояска.

Минимальное значение угла между осями отверстий определяется по формуле:

$$2\alpha_{min} = 2 \cdot \arctg(k), \quad (4)$$

где

$$k = \frac{R \sin \alpha - a}{\sqrt{r^2 - (a - R \sin \alpha)^2}}, \quad a = \frac{-B - \sqrt{D}}{2A}, \quad D = B^2 - 4AC, \quad A = R^2 + r_0^2 + 2r_0 R \cos \alpha,$$

$$B = 2r^2 R \sin \alpha - 2R^3 \sin \alpha - 2Rr_0^2 \sin \alpha - 4R^2 r_0 \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$C = r^4 - 2r^2 R^2 + r^2 R^2 \cos^2 \alpha + R^4 - R^4 \cos^2 \alpha - r^2 r_0^2 - 2r^2 r_0 R \cos \alpha + R^2 r_0^2 - R^2 r_0^2 \cos^2 \alpha + 2R^3 r_0 \cos \alpha - 2R^3 r_0 \cos^3 \alpha.$$

Максимальное значение угла между осями отверстий определяется по формуле:

$$2\alpha_{max} = 2(\pi - \arctg(k)), \quad (5)$$

где

$$k = \frac{R \sin \alpha - a}{\sqrt{r^2 - (a - R \sin \alpha)^2}}, \quad a = \frac{-B + \sqrt{D}}{2A}, \quad D = B^2 - 4AC, \quad A = R^2 + r_0^2 - 2r_0 R \cos \alpha,$$

$$B = 2r^2 R \sin \alpha - 2R^3 \sin \alpha - 2Rr_0^2 \sin \alpha + 4R^2 r_0 \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$C = r^4 - 2r^2 R^2 + r^2 R^2 \cos^2 \alpha + R^4 - R^4 \cos^2 \alpha - r^2 r_0^2 + 2r^2 r_0 R \cos \alpha + R^2 r_0^2 - R^2 r_0^2 \cos^2 \alpha - 2R^3 r_0 \cos \alpha + 2R^3 r_0 \cos^3 \alpha.$$

Данные выражения позволяют оценить крайние границы ошибок на основе известных данных о полях рассеивания центров измеряемых периферийных отверстий и центрирующего пояска. Они могут быть полезны в случае аттестации методик измерения. Однако с целью оптимизации методик измерения желательно получить вероятностную оценку поля рассеивания измеряемого угла, а также оценить закон распределения и моментные характеристики. С этой целью была разработана модель, основанная на методе Монте-Карло [5].

Поле рассеивания измеряемого угла α зависит от поля рассеивания центров отверстий и центрирующего пояска.

Поле рассеивания координаты центра ЗЭ окружность зависит от:

- 1) измерительной погрешности КИМ,
- 2) эффекта от взаимодействия массива измеряемых точек и геометрии детали с присущей ей погрешностью формы.

Эксперимент проводился поэтапно:

- 1) осуществлялось измерение цилиндрических поверхностей отверстий и центрирующего пояска с большой плотностью расположения точек;
- 2) из полученного массива измеренных точек формировались выборки, соответст-

вующие определённым значениям по количеству и расположению точек;

3) методом наименьших квадратов проводилась обработка сформированных выборок, в результате чего были получены параметры ЗЭ окружность;

4) вычислялось среднеквадратичное отклонение геометрического параметра углового расположения.

В ходе детальных измерений были получены следующие результаты. Отклонение формы периферийных отверстий (рис. 2, а) составило от 0,005 до 0,01 мм и представляло собой овальность, скорее всего, вызванную силовым воздействием, применённым в процессе сборки / разборки ротора. Форма центрирующего пояска (рис. 2, б), находилась в пределах до 0,03 мм и представляла собой овальность с небольшой волнистостью.

На рис. 3, а и 3, б показаны зависимости поля рассеивания (среднеквадратичного отклонения) от количества измеряемых точек для периферийного отверстия и центрирующего пояска. С увеличением количества точек контроля наблю-

далось приближение оценки параметров ЗЭ (окружность и цилиндр: положение центра диаметр и отклонение т формы) к их истинным значениям. Наблюдалось также сужение поля рассеивания этих параметров. Как было отмечено выше, поле рассеивания обусловлено измерительной погрешностью и эффектом от взаимодействия массива измеряемых точек и геометрии детали с присущей ей погрешностью формы.

Модель для определения поля рассеивания угла с использованием метода Монте-Карло основывалась на генерации случайных координат центров окружностей в пределах их поля рассеивания. На основе сгенерированной выборки далее осуществлялось вычисление угла α , образованного лучами, построенными на центрах этих окружностей:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{(a, b)}{|a| |b|} \right), \quad (6)$$

где a и b – лучи (векторы), построенные на центрах соответствующих окружностей.

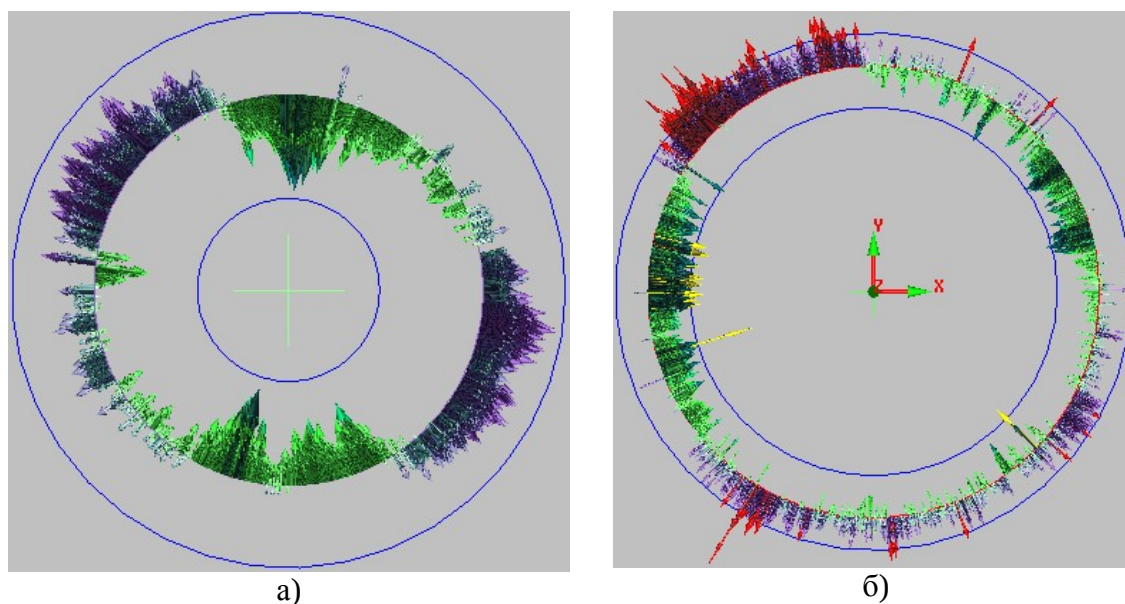


Рис. 2. Отклонение формы:
а) периферийных отверстий, б) центрирующего пояска

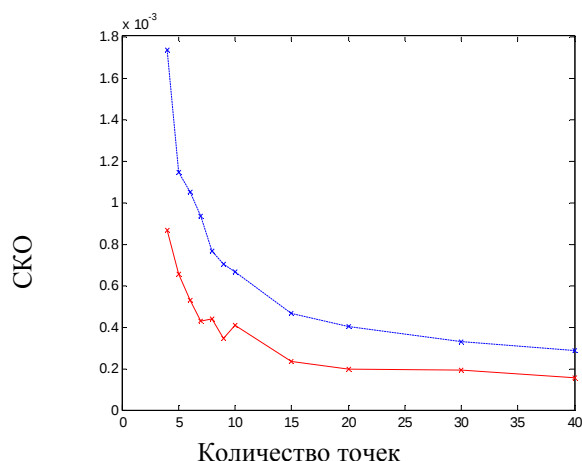


Рис. 3. Зависимость СКО рассеивания центра 3Э окружность от количества точек:
а – периферийного отверстия (сплошная линия);
б – центрирующего пояску (прерывистая линия)

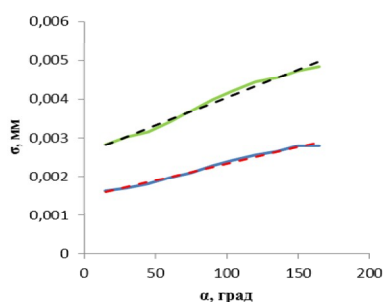
Было проведено порядка 10000 испытаний. В рекомендациях МИ 2232-2000 отмечено, что погрешности измерений и внешние влияющие факторы имеют равновероятностное и нормализованное рас-

пределение. С учётом этого проведём серию экспериментов и отобразим частные зависимости от различных факторов.

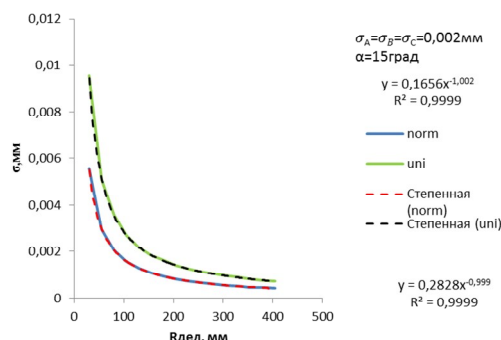
Зависимость σ_α от номинального угла α (рис.4, а) хорошо описывается линейной функцией, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации $R^2=0,9863$.

Зависимость σ_α от делительного радиуса (рис.4, б) аппроксимируется степенной функцией ($R^2=0,9999$). Зависимость σ_α от σ_A , σ_B , σ_C (рис. 4, в) описывается линейной функцией ($R^2=0,9997$).

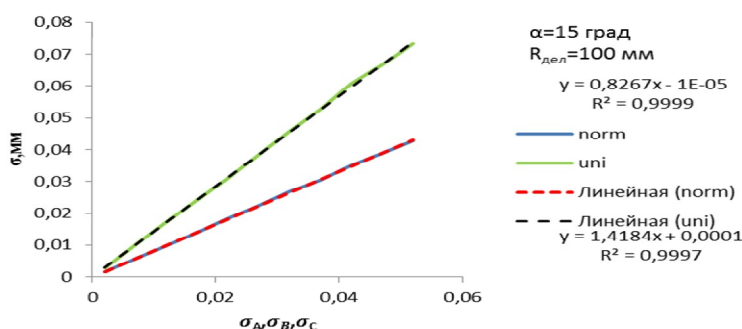
С целью проверки согласованности аналитической и вероятностной моделей проведено сравнение результатов погрешностей при одинаковых исходных условиях.



а



б



в

Рис. 4. Зависимости СКО погрешности углового расположения σ_α от:

а - номинального угла α ;

б - делительного радиуса $R_{дел}$;

в - среднеквадратичных отклонений σ_A , σ_B , σ_C центров 3Э окружность по отверстиям и центрирующему пояску

Расхождение между аналитической и вероятностной моделями при распре-

лении поля рассеивания по равновероятностному закону составило менее 5%.

На рисунке 5 приведено расхождение между аналитической и вероятностной моделями при распределении поля рассеивания по закону Гаусса (в % по оси ординат). Для углов $180^\circ - 360^\circ$ зависимость зеркальна.

Таким образом, вид распределения значительным образом влияет на погрешность, предсказываемую моделью. Результаты вероятностной модели с достаточно высокой достоверностью (5%) соответствуют аналитической модели при принятии равномерного распределения. Данное положение может быть использо-

вано при расчёте крайних значений погрешности и аттестации методик измерений. При принятии распределения поля рассеивания по закону Гаусса оценка погрешности, получаемая с использованием вероятностной модели, является заниженной по сравнению с оценкой, возвращаемой по методу «минимума-максимума». В ряде случаев, поле рассеивания ЗЭ окружность в значительной степени близко к распределению Гаусса, что позволяет принять эту модель в данном случае.

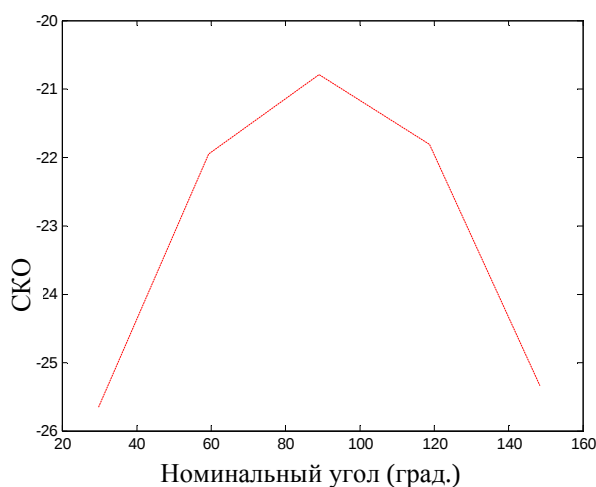


Рис. 5. Расхождение (в % по оси ординат) между аналитической и вероятностной моделями при распределении поля рассеивания по закону Гаусса

На основе разработанных моделей осуществлена оптимизация методики измерения угловых параметров расположения отверстий при следующих исходных данных: $R_{\text{делит}} = 91\text{мм}$, $\alpha_{\text{ном}} = 30, 60, \dots, 330$ град., с учётом максимально допустимой погрешности измерения хорды, рассчитанной по (2).

Особенностью модели (3) является то, что одинаковый уровень погрешностей может быть обеспечен при различных сочетаниях σ_A , σ_B , σ_C , что, в свою очередь, определяет различное количество контролируемых точек, соответствующих ЗЭ. Поскольку периферийные отверстия одинаковы, примем $\sigma_B = \sigma_C = \sigma_{\text{п}}$. С учётом данной особенности оптимизация методик измерения может осуществляться, исходя из следующих условий:

1) допустимый уровень погрешности определяется как

$$\Delta \leq [\Delta_d], \quad (7)$$

где $[\Delta_d]$ рассчитывается по формуле (2);

2) минимум затрат времени на измерение достигается минимально необходимым количеством измеряемых точек и способом их измерения (измерение триггерным или сканирующим датчиком);

3) на измеряемых поверхностях обеспечивается равномерная плотность распределения точек.

В соответствии с этим для определения оптимального соотношения количества контролируемых точек, может быть составлена система уравнений:

$$\begin{cases} n_n N + n_u \rightarrow \min, \\ s_a = f(s_n, s_u, a, R_{del}) \leq [s_d], \\ s_n = f(n_n), \\ s_u = f(n_u), \\ r(n_n) \approx r(n_u), \end{cases} \quad (8)$$

где

n_n и n_u – соответственно количество контролируемых точек на периферийных отверстиях и центрирующем пояске;

N – количество периферийных отверстий;

σ_a – СКО при измерении углового параметра расположения, возвращаемого в соответствии с вероятностной моделью;

$[s_d]$ – СКО, допускаемое при измерении углового параметра расположения;

σ_n и σ_u – соответственно СКО центра периферийных отверстий и центрирующего пояска при их контроле количеством точек n_n и n_u ;

$\rho(n_n)$ и $\rho(n_u)$ – плотность покрытия измеряемой поверхности контрольными точками.

В случае невыполнения условия $s_a = f(s_n, s_u, a, R_{del}) \leq [s_d]$ при различных сочетаниях σ_n и σ_u , принимается решение о непригодности данной КИМ для измерения углового расположения с требуемой точностью.

На основе решения данной системы уравнений обоснована методика измерения, обеспечивающая оптимальное использование КИМ при допустимом уровне погрешности. Для контроля периферийных отверстий необходимо использовать 28 точек, а для центрирующего пояска – 101 точку. Такое количество точек целесообразно снимать с поверхности при помощи датчика сканирующего типа.

Отметим, что разработанные модели могут использоваться при моделировании

погрешностей базирования и измерения, осуществляемых с помощью шуповых систем, которыми оснащаются современные обрабатывающие центры.

Таким образом, актуальность разработанной методики определяется возможностью прогнозирования погрешности на различных технологических стадиях производства ГТД и общего машиностроения.

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

Библиографический список

1. Крымов, В. В. Производство газотурбинных двигателей [Текст] / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2002. – 376 с.
2. Гапшис, В. А. Координатные измерительные машины и их применение [Текст]: Учебник / В. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов и др. М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
3. МИ 2552-99 Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
4. Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement [Текст] / JCGM – Elsevier, 2008. – 120 с.
5. Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations [Текст] // Jean-Pierre Kruth, Nick Van Gestel, Philip Bleys, Frank Welkenhuyzen. – CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 (2009). – С. 463 – 466.

RESEARCH OF ERRORS OF MEASURING ANGULAR LOCATION PARAMETERS OF HOLES IN TURBINE AND COMPRESSOR DISCS OF GAS TURBINE ENGINES

© 2011 M. A. Bolotov, A. N. Zhidyaev, I. L. Shitarev, A. O. Cheveleva

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

Models of measuring errors of angular location parameters of holes in turbine and compressor discs of gas turbine engines are developed using the probability theory and mathematical statistics. Research of measurement error dependence on various factors has been carried out.

Uncertainty, frequency function, measurement technique, coordinate measuring method, angular location.

Информация об авторах

Болотов Михаил Александрович, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов, аспирант. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: координатные измерения. E-mail: maikl_bol@rambler.ru.

Жидяев Алексей Николаевич, аспирант, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: обработка сложных поверхностей. E-mail: bududai@mail.ru.

Шитарев Игорь Леонидович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой производства двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: производственный менеджмент. E-mail: pdla@ssau.ru.

Чевелева Анастасия Олеговна, студент факультета двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: координатные измерения. E-mail: pdla@ssau.ru.

Bolotov Michael Alexandrovitch, post-graduate student, engineer of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: maikl_bol@rambler.ru. Area of research: coordinate measurement.

Zhidyaev Alexey Nikolaevitch, post-graduate student, engineer of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: bududai@mail.ru. Area of research: machining of airfoil.

Shitarev Igor Leonidovitch, doctor of technical sciences, professor, head of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: production management.

Cheveleva Anastasia Olegovna, student of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: pdla@ssau.ru. Area of research: coordinate measurement.