

УДК 621.9.08

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПРИ ИХ КОНТРОЛЕ НА КИМ

© 2011 М. А. Болотов, А. О. Чевелева, А. Н. Жидяев

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

В работе производится оптимизация методик контроля геометрических параметров деталей типа «мало- жесткое кольцо» и «ласточкин хвост» лопаток ГТД. Задача решалась с использованием теории вероятностей и математической статистики.

Координатно-измерительная машина (КИМ), погрешность, методика измерения, ГТД.

Существенной тенденцией на предприятиях авиационного двигателестроения и в целом по машиностроению является внедрение в производственный процесс координатно-измерительных машин (КИМ). Данные средства контроля характеризуются высокой степенью универсальности и малыми значениями паспортных погрешностей. Они могут использоваться для решения широкого круга задач – от контроля деталей до аттестации технологической оснастки.

Паспортные данные о погрешностях КИМ могут приписываться лишь к небольшому количеству простейших измеряемых геометрических параметров, остальное же большинство не может быть однозначно характеризовано ими по следующим причинам:

1) паспортная погрешность аттестуется при определенных условиях, как правило, для случая контроля линейных размеров при высокой точности исполнения поверхностей;

2) полученные различными методами обработки поверхности имеют существенное отклонение формы, что открывает вопрос о влиянии количества контролируемых точек на достоверный результат измерений;

3) в практике измерения сложные геометрические параметры рассчитываются на основе результатов измерений нескольких поверхностей и имеют сложный пространственный характер.

В силу приведенных выше причин актуальным вопросом является исследование погрешностей измерения геометрических параметров, а также разработка гарантирующих заданную точность методик изме-

рения с учетом экономической эффективности их использования.

Обзор моделей и методик определения погрешностей при измерении геометрических параметров с помощью координатно-измерительных машин приведен в статье [1]. Поскольку процесс измерения является случайным и зачастую для большинства задач невозможно разработать аналитические модели, то в качестве основного инструмента моделирования используется метод Монте - Карло.

В конструкции ГТД присутствует большое количество деталей типа «кольцо», которые характеризуются как мало жесткие. При их контроле ставятся задачи: 1) выявления отклонения формы; 2) определения радиуса (диаметра) поверхности, 3) определения координат центра. Параметр «координаты центра» используется для расчета положения цилиндрической поверхности относительно других поверхностей (координационный размер). Проведем исследование зависимостей погрешностей контроля для данных параметров от количества контролируемых точек. На основе полученных зависимостей получим рекомендации по формированию методик измерения данного типа деталей.

Критерием оптимизации методик является выявление измеряемого геометрического параметра (ГП) заменяющего элемента (ЗЭ) с погрешностью, не превышающей 30% от заданного технологического допуска при доверительном уровне 95%:

$$\Delta \leq \Delta_{\text{доп}} \quad (1)$$

В свою очередь, данная погрешность зависит от ряда факторов: инструментальной погрешности $\Delta_{\text{изм}}$ КИМ, действительного заданного значения отклонения f_e формы, вида

отклонения формы поверхности от номинальной формы, обозначаемого Υ (в случае детали типа «кольцо» – степень огранки), количества N точек контроля. Таким образом, общую погрешность можно представить в виде функции:

$$\Delta = f(\Delta_{изм}, f_e, \Upsilon, N). \quad (2)$$

Для удобства обозначим возможные случаи отклонения формы круглых и цилиндрических поверхностей параметром степень огранки. Так, степень 2 будет характеризовать овальность, 3 - трехгранный профиль и т.д. Для оценки отклонения результата измерения от истинного значения удобно использовать показатель относительной доли ошибки для i -го параметра (отклонения от формы, радиуса, положения центра):

$$B_i = \frac{P_i^{оцененное} - P_i^{ист}}{M}, \quad (3)$$

где $P_i^{ист}$ – истинное значение параметра i в единицах измерения параметра;
 $P_i^{оцененное}$ – оцененное значение параметра i в единицах измерения параметра;
 M – параметр, задающий масштаб отклонения.

Если в качестве M принимать значение $P_i^{ист}$, то данный параметр будет характеризовать относительную ошибку при измерениях. Принятие для параметра M других значений позволяет использовать его как безразмерный показатель.

В качестве параметра $P_i^{оцененное}$ может выступать математическое ожидание или границы ошибок в соответствии с требуемым доверительным интервалом (обычно принимаемым на уровне 95%). Параметр M может задавать масштаб отклонений, в качестве него может выступать истинное значение измеряемого параметра (удобно для оценки отклонения от формы), а также величина априорно известного отклонения от формы (для оценки параметров радиуса и положения центра).

Исследование зависимостей производилось путем имитации различных степеней огранки профилей окружностей в соответствии с различными параметрами методики измерения. Имитация огранки профиля будет осуществляться с помощью тригонометрического ряда Фурье.

Имитация выборок точек будет основана на алгоритмах, приведенных в работе [2].

Анализ технологий изготовления показывает, что после обработки маложесткие детали типа «кольцо» характеризуются отклонениями от круглости, которые возникают вследствие внутренних напряжений материала (овальность) или связаны со способом закрепления заготовки (огранка). Наиболее частые случаи огранки: три грани (закрепление в трехкулачковом патроне), четыре грани (закрепление в четырехкулачковом патроне, специальном приспособлении), шесть граней (усилия от частей специального приспособления).

В работе анализируются детали диаметром 150 мм в соответствии с планом экспериментов, представленным в табл. 1.

Таблица 1. План экспериментов для детали типа «кольцо»

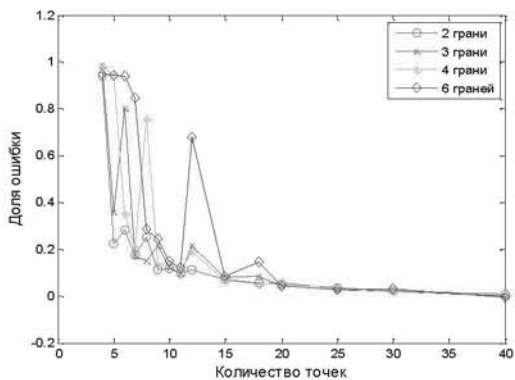
Параметр	Значения
Измерительная погрешность ($\Delta_{изм}$)	1,7+L/333, где L-длина измеряемого параметра
Отклонение формы (f_e)	0,01
Число граней (w)	2, 3, 4, 6
Количество точек контроля (N)	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 25, 30, 40

В соответствии с разработанным планом получены зависимости, приведенные на рис.1. Анализируя зависимость относительной доли ошибки рис.1,а, можно отметить, что при количестве контролируемых точек кратном степени огранки, возникает существенная ошибка. В соответствии с этим рекомендуется для деталей, имеющих огранку n -й степени, не использовать для контроля кратное n количество точек.

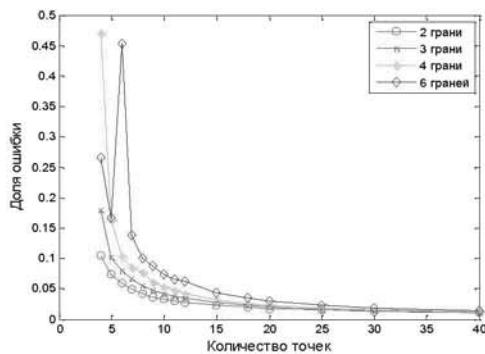
Исходя из данных, полученных в теоретических экспериментах, надежное выявление отклонения формы происходит при количестве контролируемых точек 10 (для 2, 3 и 4 - гранного профиля) и 15 (для шестигранного профиля).

Анализируя поле рассеивания радиуса, можно отметить, что наблюдается неустойчивость при количестве контролируемых точек, равном степени огранки. Приведенный на рис.1,б график отражает степень приближения измеряемого радиуса к истинному положению, отнесенному к значению отклонения формы поверхности. Аналогичное

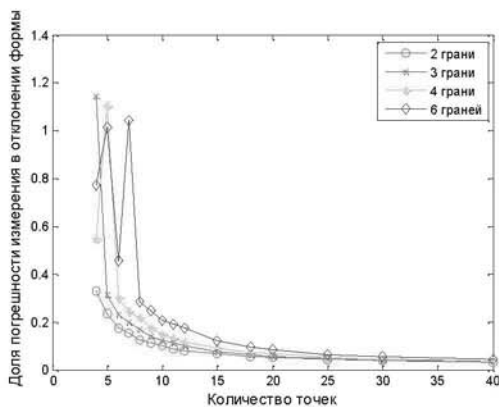
явление наблюдается и для параметра поля рассеивания координаты центра (рис. 1, в).



а



б



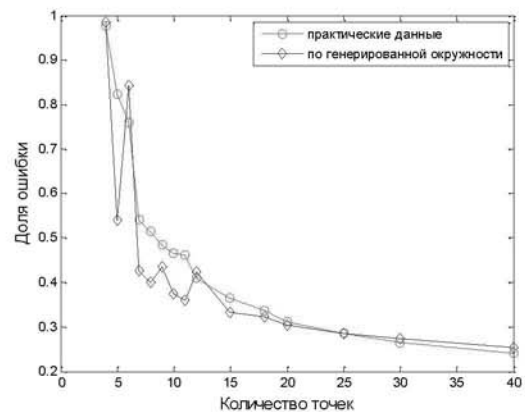
в

Рис. 1. Результаты эксперимента для разной огранки при отклонении формы 0,01 мм: а – доля ошибки выявления отклонения формы; б – поле рассеивания радиуса, отнесенного к величине отклонения формы (0,01мм); в - поле рассеивания координаты центра (по оси абсцисс), отнесенной к величине отклонения формы (0,01мм)

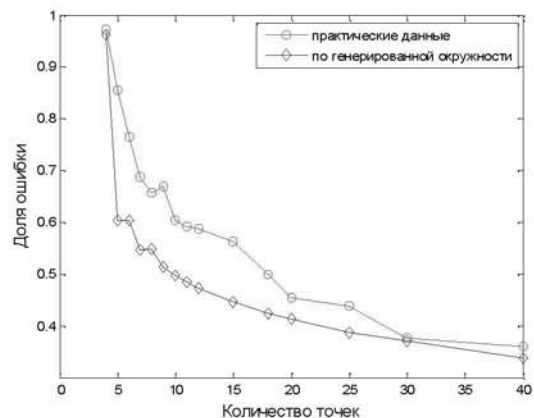
С целью оценки согласованности полученных зависимостей на практике был проведен подтверждающий теоретический эксперимент. Он заключался в имитации выборок, соответствующих различным методикам измерения из предварительно сканированного массива точек (около 3000) для кольца.

Рассматривались следующие виды колец: 1) прошедшее токарную обработку в трехшлицевом патроне, 2) обработанное разверткой и подвергнутое установке-снятию с изделия (после чего образовалась огранка порядка 2).

На рис.2 рассмотрено сравнение данных экспериментов. Для огранки порядка 3 наблюдается значительное расхождение при количестве контролируемых точек, равном 5. В остальном диапазоне до 15 контролируемых точек наибольшее расхождение составляет до 25%.



а



б

Рис. 2. Сравнение результатов по двум моделям для кольца:

- а - имеющего огранку порядка 3;
- б - имеющего огранку порядка 2

Для огранки порядка 2 имеются расхождения в пределах 20 ... 30%. Это объясняется тем, что реальный 2-х и 3-х огранный профиль отличается от построенного с помощью выражения (4) номинального. При проведении спектрального анализа были обнаружены дополнительные гармонические составляющие. Учет данных составляющих при построении профиля позволяет приблизиться с

большой достоверностью к практическим данным.

Полученные зависимости хорошо аппроксимируются при исключении выбивающихся точек из плана контроля выражением вида:

$$B_F = a_1 e^{-\left(\frac{N-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{N-b_2}{c_2}\right)^2}, \quad (5)$$

где B_F – относительная доля ошибки при контроле параметра отклонения от формы поверхности;

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ – некоторые коэффициенты.

Зависимость погрешности от априорно известного отклонения формы (f_e) фактически не наблюдается. Однако в малых диапазонах погрешностей (0,003 ... 0,005) возникает эффект завышения отклонения формы и радиуса, что объясняется близостью измерительной погрешности ($\Delta_{изм}$) по ее величине к значению отклонения формы.

Рассмотрим другой важный случай в авиационном двигателестроении, заключающийся в контроле угла клина расположения боковых поверхностей, образующих замок лопаток компрессора. На данные поверхности задаётся угловой допуск, равный 4 минутам. Установим взаимосвязь между погрешностями, вносимыми КИМ при измерении боковых поверхностей, и угловым расположением.

Данная задача решалась двумя способами. Первый заключается в создании аналитической модели, позволяющей определять предельные значения погрешностей. Вторая будет решаться с использованием метода Монте-Карло.

В соответствии с чертежом хвостовика лопатки построена графическая постановка задачи (рис. 3). Анализируя чертеж, можно сказать, что замок типа «ласточкин хвост» характеризуется на нем следующими линейными и угловыми параметрами: высота замка h , высота срезанных углов d , ширина замка B , углы β и γ .

Погрешность, вносимую КИМ при измерении плоскостей, можно принять как направленную по нормали к измеряемой плоскости, поскольку измерение производится подводом измерительного наконечника также по нормали.

На рис.3 она численно равна ширине GF, которую обозначим ω .

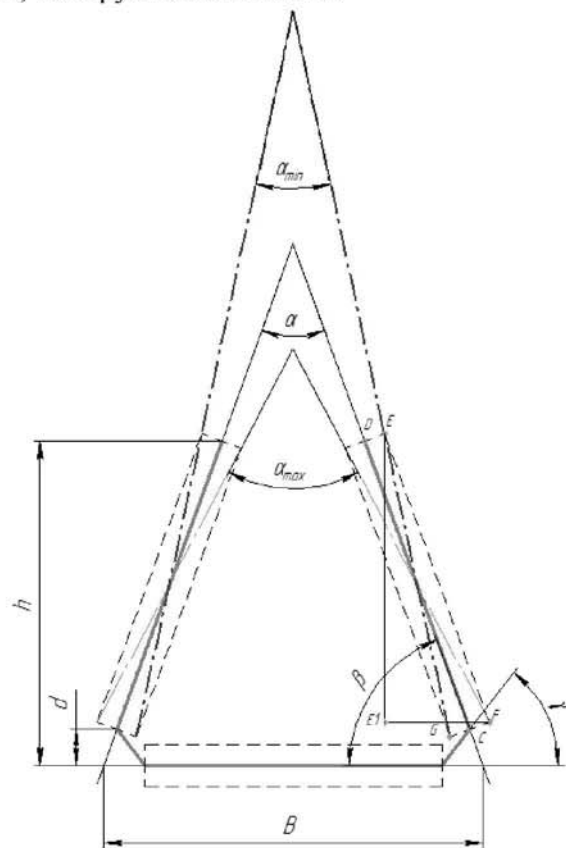


Рис. 3. Геометрическая постановка задачи контроля угла клина

Таким образом, в пространстве возникает область вероятных положений плоскости аналогичная нормированию параметра плоскостности, представленной на рис. 3 в виде прямоугольника.

На основании графической постановки можно определить следующую зависимость предельных значений угла $R\Delta_\alpha$ от исходных параметров:

$$\begin{aligned} \Delta_\alpha &= \alpha_{max} - \alpha_{min} = \\ &= 4 \operatorname{arctg} \left(\frac{\omega \cdot \sin \beta}{h - d} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где α_{max} и α_{min} – предельные значения измеряемого угла,

α – номинальное значение угла клина.

В соответствии с поставленными целями определим, возможно ли достижение заданной точности при измерении геометрического параметра элементом «прямая» по 2 точкам. Технологический допуск T_α на изготовление клина равен 8 минутам. Тогда допускаемое значение измерительной погрешности составит:

$$\begin{aligned} \Delta_{\alpha}^{\text{дон}} &= 0,3T_{\alpha}, \\ \Delta_{\alpha}^{\text{дон}} &= 0,3 \cdot 8' = 2,4'. \end{aligned} \quad (7)$$

В соответствии с паспортом КИМ предельное значение погрешности измерения линейного расстояния равно 0,0021мм. Тогда предельное значение угла, рассчитанное по данной формуле (6), составит 4 минуты. Как видно $\Delta_{\alpha} > \Delta_{\alpha}^{\text{дон}}$, что означает невозможность контроля данного параметра рассматриваемой методикой.

Приведенная зависимость позволяет определять предельный случай, который маловероятен. Кроме того, она не учитывает тот факт, что измерения производятся по ряду точек. Поскольку измерение производится элементом «плоскость» по некоторому количеству точек. С целью оценки погрешности контроля в зависимости от количества точек осуществлено моделирование с использованием метода Монте-Карло. Для этого было произведено детальное сканирование хвостовика лопатки. На основе полученного множества точек проведен имитационный эксперимент, заключающийся в воспроизведении процесса измерения плоскостей рядом контролируемых точек.

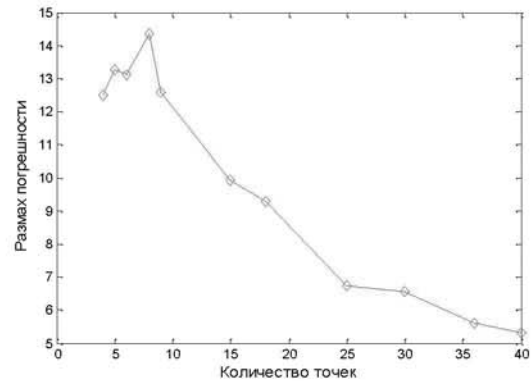
В соответствии с ним получена следующая зависимость, представленная на рис.4,а.

Как видно, измерение с заданной погрешностью не обеспечивается. Это вызвано тем, что изготовленные плоскости имеют отклонение формы больше нормируемого (0,006мм) до величины 0,038мм.

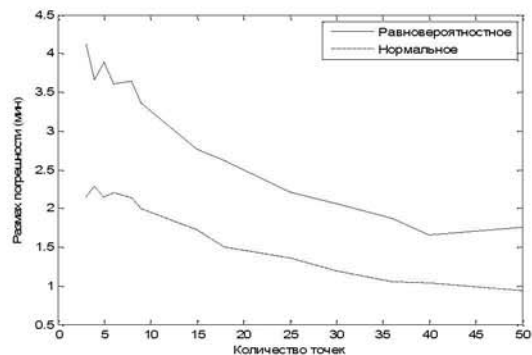
Для оценки доли погрешности, вносимой КИМ при измерении угла, проведен имитационный эксперимент. Суть его заключалась в имитации номинальных поверхностей без отклонения от формы, но с наличием измерительной погрешности, генерированной по равновероятностному и нормальному законам распределения. Изучался также вопрос зависимости $R\Delta_{\alpha}$ от количества измеряемых точек. Результаты эксперимента приведены на рис.4,б.

Как видно из графика, величина $R\Delta_{\alpha}$, обусловленная измерительной погрешностью КИМ, находится в пределах от 1' до 2,4' (в случае действия погрешности по нормальному закону распределения) и от 1,9' до 4' (в случае действия погрешности по

равновероятностному закону распределения). Гарантированно заданная точность контроля углового параметра обеспечивается при 25 точках, однако в производстве следует обратить внимание на повышение точности исполнения базовых поверхностей хвостовика.



а



б

Рис.4. Зависимость $R\Delta_{\alpha}$ от количества контролируемых точек на плоскостях:

а- при действии отклонения от формы и измерительной погрешности; б- при действии только измерительной погрешности

Предельная величина погрешности, рассчитанная с использованием модели по методу Монте-Карло (при допущении, что измерительная погрешность распределена по равновероятностному закону), совпала со значением, полученным по модели максимума-минимума (4 минуты). Это может служить подтверждением разработанных моделей.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Болотов, М.А. Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно измерительных машинах [Текст] / М.А. Болотов, И.А. Лёзин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва №2 (26) 2011. – 10с.

2. Чевелева, А.О. Имитационные алгоритмы генерации разреженных выборок контролируемых точек при координатных измерениях [Текст] / А.О. Чевелева, М.А. Болотов // Региональная научно-практическая конференция, посвящённая

50-летию первого полёта человека в космос. Самара, 14-15 апреля 2011г.: тезисы докладов. – Самара: Издательство Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 298 с.

3. Координатные измерительные машины и их применение [Текст]: учебник / А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов [и др.] – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

4. Иващенко, И.А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов [Текст] / И.А. Иващенко. - М.: Машиностроение, 1981. – 224с.

5. Крымов, В.В. Производство газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин, под. ред. В.В. Крымова.-М.: Машиностроение, 2002. – 376с.

MEASUREMENT PROCEDURE OPTIMIZING GEOMETRICAL PARAMETERS OF MEASURE GTE FEATURE ON COORDINATE MEASURING MACHINE

© 2011 M. A. Bolotov, A. O. Cheveleva, A. N. Zhidyayev

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

Measurement techniques optimization of geometrical parameters of parts “small rigidity ring” and “dove tail” of GTE blade is performing in the article. The goal is achieving using the provisions of a theory of probabilities and mathematical statistics.

Coordinate-measuring machine (CMM), uncertainty, measurement techniques, GTE.

Информация об авторах

Болотов Михаил Александрович, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-47-76. E-mail: maikl.bol@gmail.com. Область научных интересов: координатные измерения.

Чевелева Анастасия Олеговна, магистр факультета двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-47-76. E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Область научных интересов: координатные измерения.

Жидяев Алексей Николаевич, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-47-76. E-mail: bududai@mail.ru. Область научных интересов: обработка сложных поверхностей.

Bolotov Michael Alexandrovich, engineer, assistant of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-47-76. E-mail: maikl_bol@rambler.ru. Area of research: coordinate measurement.

Cheveleva Anastasia Olegovna, magister, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-47-76. E-mail: Stasia-5@yandex.ru. Area of research: coordinate measurement.

Zhidyayev Alexey Nikolaevich, engineer, assistant of the aircraft engine production department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-47-76. E-mail: bududai@mail.ru. Area of research: machining of airfoil.