

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ КОНТРОЛЕ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

© 2011 М. А. Болотов, И. А. Лёзин

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

Рассматриваются методики измерения и методы их оптимизации с использованием положений теории вероятностей и математической статистики, проводятся исследования зависимости разработки методик измерения от технологической наследственности.

Погрешность, плотность вероятности, методика измерения, координатный метод контроля, метод обработки, производство, эффективность.

В процессе производства изделий аэрокосмической техники и в особенности деталей газотурбинных двигателей ГТД важнейшим звеном технологического процесса является контроль. 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.

Сущность координатного метода контроля заключается в замене реальных поверхностей детали их математическим представлением с использованием заменяющих элементов. На основе измеренного облака точек реальных поверхностей деталей рассчитываются параметры заменяющих элементов (ЗЭ), таких, как линия, окружность, плоскость, цилиндрическая поверхность, сфера и т.д. [1]. Далее на основе образованной совокупности элементов рассчитываются пространственные геометрические параметры.

Наиболее общая классификация погрешностей контроля и источников их возникновения применительно к координатным измерениям приведена в [1, 2]. Из

всех погрешностей выделяются те, которые связаны с методиками измерения, именно они открывают резерв повышения точности и производительности контрольных операций, а также служат гарантом получения заданной точности.

Под методикой измерения (МИ) понимают совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений (в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009). В случае контроля на КИМ под МИ подразумевают выбор типов ЗЭ, количество и расположение контролируемых точек на них, их последовательность измерения, построение вспомогательных систем координат и расчёт геометрических параметров (ГП) относительно них.

Практика использования таких средств показывает, что повышение количества контролируемых точек повышает достоверность контроля ГП, однако при этом возрастает трудоёмкость, а стало быть, стоимость контрольных операций, или снижается пропускная способность КИМ. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация их количества с учётом требуемого уровня точности к контролю ГП.

Исходные требования к выбору средств контроля и, соответственно, уста-

новления предельных значений погрешностей контроля отражены в МИ 2232-2000. В соответствии с ней границы погрешности измерений могут считаться удовлетворительными, если относительная погрешность оценки не превышает 30%. Таким образом, можно сформировать совокупность условий, при которых средство измерения будет использоваться экономически целесообразно и предоставлять требуемый уровень погрешностей:

$$\Delta i \leq [\Delta i], \quad (1)$$

где

$[\Delta i]$ – допустимая погрешность измерения для i -го геометрического параметра (линейно-углового, погрешности формы или погрешности расположения).

Погрешность средства измерения и реализуемой МИ считается допустимой также при выполнении соотношения (1). Это, в свою очередь, будет критерием оптимизации методик измерения.

Погрешность измерения ЗЭ может быть представлена в виде

$$\bar{\Delta} = f(\bar{P}), \quad (2)$$

где

$\bar{\Delta}$ – вектор параметров, возникающих при контроле ЗЭ, к ним относятся координаты центральной точки, направляющий вектор (для плоскости, линии, цилиндрической и конусной поверхности), величина выявленной погрешности формы;

$\bar{P}$ – вектор параметров МИ данного ЗЭ, включающего в себя количество контрольных сечений, число контролируемых точек в них и правило их расположения по измеряемой поверхности.

Аттестация и разработка МИ сводится к решению двух видов задач. Первую задачу можно сформулировать как прямую, на основании которой по заданным параметрам МИ находятся действующие уровни погрешностей, после чего они сравниваются с допустимыми в соответствии с выражением (1) и делается вывод о пригодности МИ. Вторую задачу можно сформулировать как обратную к первой: первоначально задаются допус-

тимый уровень погрешности, а далее на основании выражения (2) находятся параметры МИ, обеспечивающие их. В случае, если допустимый уровень погрешности не может быть обеспечен с использованием данного средства измерения и обоснованной МИ, делается соответствующий вывод о технической невозможности контроля данного ГП. Рассмотрим подходы отечественных и зарубежных авторов к моделированию процесса координатных измерений геометрических параметров.

Погрешность контроля ГП является случайным процессом, и поэтому необходимо использовать элементы теории вероятности и математической статистики.

В работе [3] процесс контроля рассматривается как случайный в интервале измерения, подчинённый нормальному распределению. На основании данного предположения определяется зависимость количества контрольных точек с учётом того, что измеряемая величина не выйдет за границы принятой доверительной вероятности. Отметим, что инструментальная погрешность КИМ в достаточной степени приближена к нормальному распределению, что, с одной стороны, оправдывает данный подход. С другой стороны, практика измерения реальных поверхностей показывает, что не все измеряемые ГП подчиняются нормальному распределению. Это обусловлено взаимодействием контролируемых точек с отклонением формы измеряемых поверхностей деталей.

Поэтому результаты, полученные по данному методу, не всегда могут быть достоверными, а МИ – не оптимальными в ряде случаев.

В трудах зарубежных учёных практикуется подход, основанный на использовании метода Монте-Карло [2, 4]. Это вызвано невозможностью создания аналитических моделей данного процесса. Для оценки неопределённостей измерений и описания зависимости от различных факторов существуют формальные подходы, отраженные в [5, 6].

В работах [7, 8, 9] и множестве других исследуется влияние количества и способа расположения точек при измерении часто встречающихся простых поверхностей на погрешность выявления их основных параметров: центра, диаметра и формы ЗЭ. При этом используется метод Монте-Карло. Однако в них учитывается только инструментальная погрешность измерения, вносимая КИМ. Данные работы отражают влияние измерительной погрешности КИМ на результат контроля. Однако, как показывает практика [10], в большой степени достоверность результата контроля зависит от отклонений формы измеряемой поверхности. В работе [11] проводится исследование и оптимизация МИ для контроля цилиндрических поверхностей, имеющих систематические отклонения формы, обусловленные технологией изготовления. Показывается необходимость учёта технологического фактора при разработке МИ, отмеченная в [10].

С целью формирования оптимальных МИ и обоснования достоверности результатов контроля в данной работе предложена наиболее общая методика, приведённая на рис. 1. Данная методика позволяет:

1) оценивать зависимость оптимальной МИ от технологической наследственности и других влияющих факторов;

2) предоставлять возможность подтверждения получаемых зависимостей.

Наиболее достоверный путь исследований – это работа с реальным массивом точек (1, рис.1) поверхности детали, так как он включает в себя погрешности, действующие от совокупности технологических методов обработки деталей ГТД, и измерительные – от КИМ, что представляет собой этап 1 (в случае возможности его реализации). На следующем этапе, реализуемом с помощью прямого преобразования Фурье [12, 13], анализируются спектральные характеристики поверхности, что позволяет дать заключение о структуре погрешности и значениях её составляющих. Для оценки влияния раз-

личных составляющих погрешности необходима фильтрация поверхности. Предлагается осуществлять её на основе обратного преобразования Фурье с учётом корректировки спектра. На выходе (2, рис. 1) формируется заключение о составе и амплитудах погрешностей, а также отфильтрованный массив точек в случае необходимости.

Этап 3 осуществляется с целью моделирования поверхностей, имеющих заранее известное отклонение формы в случае, когда невозможно детально измерить реальные поверхности. В основе реализации этапа заложены алгоритмы конструирования ЗЭ (прямой, окружности, плоскости, цилиндрической, сферической и конической поверхностей) и воспроизведения инструментальных погрешностей КИМ. К наиболее часто встречающимся видам зависимости отклонений форм от методов обработки, реализуемых при производстве деталей ГТД, относятся седлообразность, бочкообразность, отгиб, волнистость, гранёность.

Для представления технологических погрешностей бывает достаточно использовать полиномы различной степени (седловидность, бочкообразность, спираль, смещение оси) и тригонометрический ряд Фурье (волнистость, гранёность):

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (3)$$

где

a_n , b_n , n – коэффициенты, характеризующие амплитудные и частотные характеристики гармоник.

На выходе из данного этапа формируется облако точек конструированной поверхности (4, рис. 1).

Задаются возможные варианты и параметры исследуемых МИ (3, рис.1).

На следующем этапе производится многократное имитирование выборок точек в соответствии с параметрами МИ. Основными параметрами на данном этапе являются количество сечений и точек в них, регулярность сетки покрытия.

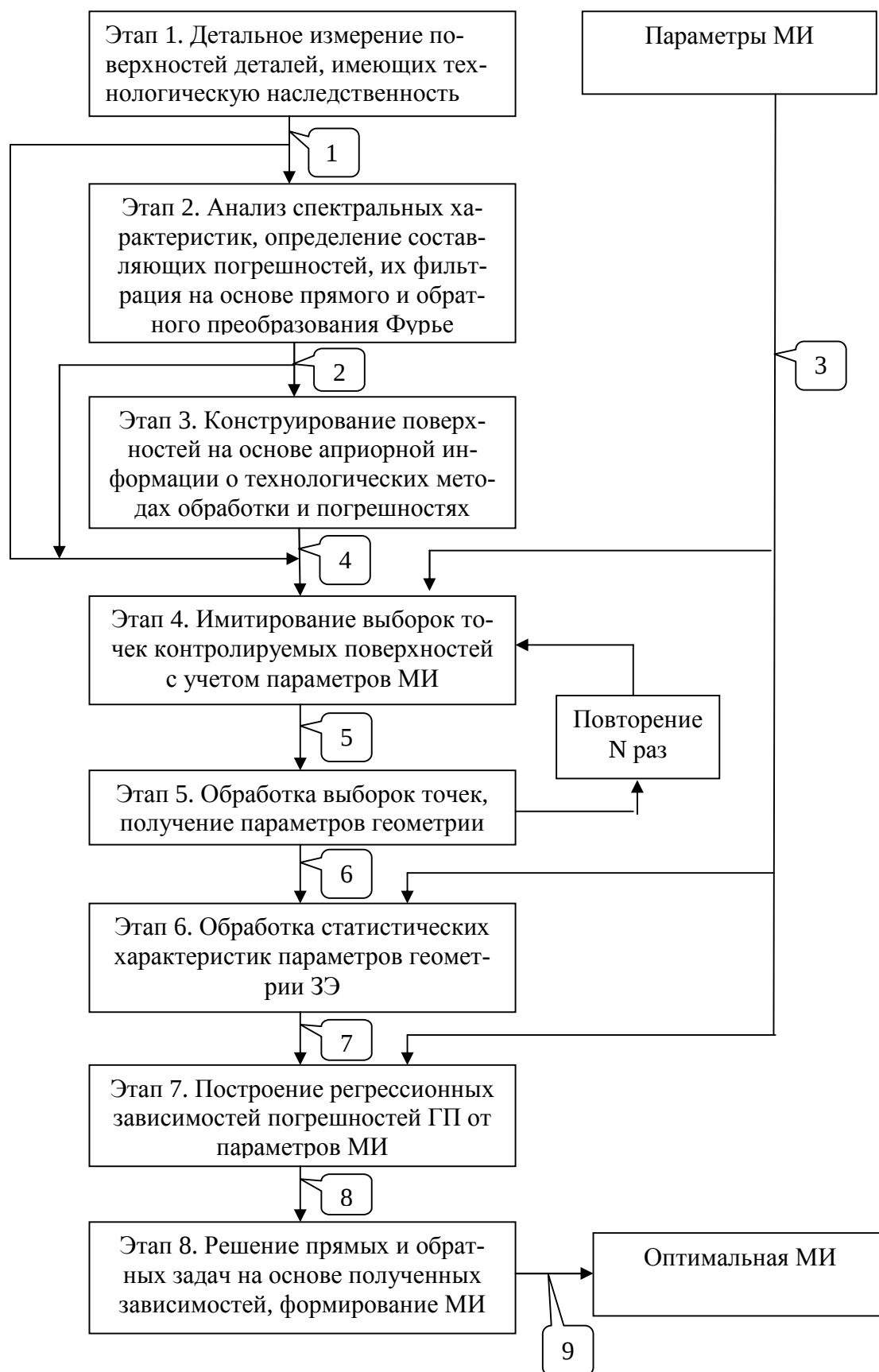


Рис. 1. Блок - схема исследования и формирования МИ

На выходе из данного этапа формируются выборки точек измеряемой поверхности в соответствии с требуемой МИ (5, рис.1).

Этап 5 содержит процедуры обработки сформированного облака точек. Вычисляются параметры ЗЭ с помощью различных методов аппроксимации измеренных точек. Распространёнными методами являются: метод наименьших квадратов, методы описывания и вписывания геометрии ЗЭ, метод среднего между описанной и вписанной геометриями ЗЭ.

Реализация метода Монте - Карло осуществляется путём многократного повторения этапов 4 и 5. В результате формируются имитируемые выборки ГП (6, рис. 1). Количество повторений N выбрано на уровне 10000 раз.

На 6 этапе обрабатываются выборки, получаемые на предыдущем этапе. На выходе данного этапа формируются оценки выборок в виде нижней и верхней границы, а также математического ожидания. Данные оценки рассчитываются для различных параметров МИ (3, рис. 1), вследствие чего получается многомерный массив оценок (7, рис. 1).

В ходе исследований было выявлено, что случайные величины чаще всего являются композицией нескольких законов распределения, что затрудняет получение достоверных оценок случайных величин. В соответствии с этим в данной работе был предложен инвариантный к виду закона распределения метод получения оценок случайных величин. Его суть сводится к аппроксимации гистограмм распределения выборок на основе кубических полиномов Эрмита и определению интервальных оценок с учётом заданной доверительной вероятности α , обычно принимаемой на уровне 99,73% или 95%. Рассмотрим данный алгоритм подробнее.

Для построения сплайна, описывающего плотность вероятности исследуемой выборки, требуется определить оптимальное количество коридоров в гис-

тограмме. Это можно сделать на основе правила Стёрджеса:

$$M = \lceil \log_2 N + 1 \rceil. \quad (4)$$

Построив гистограмму и определив «узловые» точки плотности вероятности $\{x_i, y_i\}$, переходим к построению кубического сплайна Эрмита. Внутренние точки определяются через середины столбцов, а крайняя левая x_0 и правая x_{M+1} точки равны $\{x_{\min}, 0\}$ и $\{x_{\max}, 0\}$, соответственно.

Кубический сплайн Эрмита по переменной x записывается в виде [14]:

$$s_x(x) = s_x^{(i)}(x), x_i \leq x < x_{i+1}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} s_x^{(i)}(x) = & y_i \left(2 \left[t_x^{(i)}(x) \right]^3 - 3 \left[t_x^{(i)}(x) \right]^2 + 1 \right) + \\ & + k_x^{(i)} \left(\left[t_x^{(i)}(x) \right]^3 - 2 \left[t_x^{(i)}(x) \right]^2 + t_x^{(i)}(x) \right) + \\ & + y_{i+1} \left(-2 \left[t_x^{(i)}(x) \right]^3 + 3 \left[t_x^{(i)}(x) \right]^2 \right) + \\ & + k_x^{(i+1)} \left(\left[t_x^{(i)}(x) \right]^3 - \left[t_x^{(i)}(x) \right]^2 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $t_x^{(i)}$ является взвешенным аргументом x :

$$t_x^{(i)} = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}. \quad (7)$$

Коэффициенты $k_x^{(i)}$ рассчитываются как

$$\begin{aligned} k_x^{(0)} &= \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \\ k_x^{(M+1)} &= \frac{y_{M+1} - y_M}{x_{M+1} - x_M}, \\ k_x^{(i)} &= \frac{y_{i+1} - y_i}{2(x_{i+1} - x_i)} + \frac{y_i - y_{i-1}}{2(x_i - x_{i-1})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученный сплайн (5) обладает свойством неотрицательности, но не удовлетворяет свойству нормировки. Площадь под кривой плотности равна

$$S = \int_{x_0}^{x_{M+1}} s_x(x) dx = \sum_{i=0}^M \int_{x_i}^{x_{i+1}} s_x^{(i)}(x) dx. \quad (9)$$

Коэффициенты сплайна $k_x^{(i)}$ и y_i корректируются с целью выполнения условия нормировки:

$$\hat{k}_x^{(i)} = \frac{k_x^{(i)}}{S}, \quad (10)$$

$$\hat{y}_i = \frac{y_i}{S}.$$

Площадь под кривой на каждом интервале обозначим:

$$\hat{s}_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \hat{s}_x^{(i)}(x) dx. \quad (11)$$

Для оценки границ интервала, в который попадает значение случайной величины с вероятностью α , нужно определить точки x_l и x_r , для которых выполняются условия:

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_l} \hat{s}_x(x) dx &= \frac{1-\alpha}{2}, \\ \int_{x_r}^{x_{M+1}} \hat{s}_x(x) dx &= \frac{1-\alpha}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Определение границ оценок осуществляется путём решения двух кубических уравнений (12).

На этапе 7 осуществляется построение регрессионных зависимостей границ оценок от параметров МИ. На выходе (8, рис. 1) формируются выражения для различных ГП в зависимости от параметров МИ (3, рис. 1).

Окончательно полученные выражения (8, рис. 1) используются для решения прямой и обратной задач, сформулированных выше. Кроме того, данные выражения будут составлять базис для аттестации и формирования МИ деталей ГТД. Оптимальные параметры (9, рис. 1) закладываются в действующие МИ.

Рассмотрим практическую реализацию данной методики на примере контроля ГП ЗЭ «плоскость». Наиболее важными технологиями при производстве ГТД являются шлифование, электроэрозионная и фрезерная обработки. В исследованиях участвовали образцы пластин, прошедших соответствующие методы обработки, раз-

мером с допуском к форме 0,015 – 0,02 мм и высокой точностью координации относительно других поверхностей.

Эксперимент осуществлялся КИМ DEA Global с объёмной измерительной погрешностью:

$$\Delta = 1,7 + \frac{L}{333}, \quad (13)$$

где

L – длина измеряемой поверхности, мм.

В нашем случае $L = 117$ мм, соответственно $\Delta = 2,05$ мкм. Как видно, измерительная погрешность близка к допуску.

Исходные поверхности в соответствии с 1 этапом измерены по 3000 точкам. Далее проведён спектральный анализ, исходная поверхность отфильтрована от погрешности измерения (рис. 2). С целью определения частотной составляющей спектральной плотности мощности, отвечающей за измерительную погрешность, был проведён эксперимент по измерению стола КИМ, в ходе которого был выявлен диапазон, отвечающий за измерительную погрешность. Очистка спектра измеренной поверхности позволила освободиться от измерительной погрешности и выбросов, тем самым приблизиться к достоверным оценкам измеряемой поверхности.

С целью проверки характера отфильтрованной части была построена функция плотности вероятности по выборке, являющейся разностью между точками исходной и отфильтрованной поверхностями (рис. 2, г). Анализируя её, можно заключить, что наибольшую вероятность составляют разности в диапазоне от 1 до 3 мкм, указывающие на измерительную погрешность КИМ. Остальная маловероятная часть отфильтрованных точек может быть объяснена выбросами.

На этапах 4 и 5 проводилась имитация измерения поверхностей с различными параметрами МИ.

Исследовались геометрические параметры заменяющего элемента «плоскость»: отклонение формы и координата центральной точки.

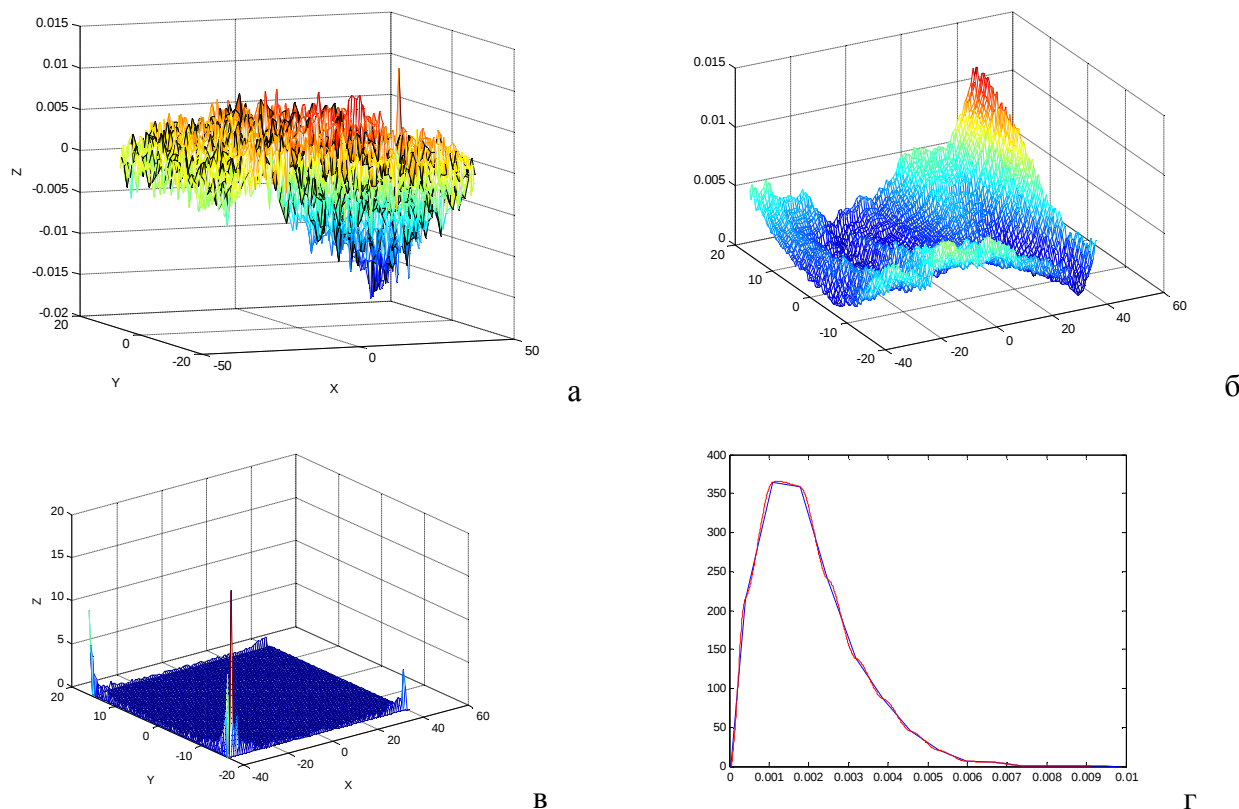


Рис. 2. Шлифованная поверхность:

- а - исходное представление измеренного облака точек;
 б - облако точек, отфильтрованное от измерительной погрешности;
 в - очищенная от высокочастотной составляющей поверхность спектральной плотности мощности;
 г - график плотности вероятности отфильтрованной части.

Для оценки погрешности контроля отклонения формы принят показатель доли ошибки:

$$B_d = \frac{F^* - E_d}{F^*}, \quad (14)$$

где

B_d - ожидаемая погрешность выявления отклонения формы, выраженная в долях от действительного значения;

F^* - величина отклонения формы, принимаемая за действительное. Вычисляется по всему множеству точек отфильтрованной от измерительных ошибок и выбросов поверхности (с использованием прямого и обратного преобразования Фурье);

E_d - оценка выборки, полученная путём аппроксимации функций плотности с использованием полиномов Эрмита.

Данный показатель указывает в долях погрешность измеренного отклонения

формы относительно действительного значения. Значение «ноль» говорит о том, что отклонение формы измерено достоверно. Этот показатель удобен тем, что не зависит от масштаба и величины.

В ходе исследований получены зависимости показателя B_d ЗЭ плоскость (рис.3, а) от параметров МИ.

Отклонение формы пластины после шлифования отражено на рис. 2 и имеет вид изгиба. Образец, прошедший электроэрозионную проволочную обработку, имеет выпуклую в центре форму, что обусловлено термическими деформациями обработки инструментом-проволокой и затруднением отвода шлама из центральной части межэлектродного зазора. После фрезерной обработки концевой фрезой D25 мм наблюдается волнистость, обусловленная появлением строчек между

проходами фрезы. На рис.3, б представлена зависимость показателя Δ от количества контролируемых точек:

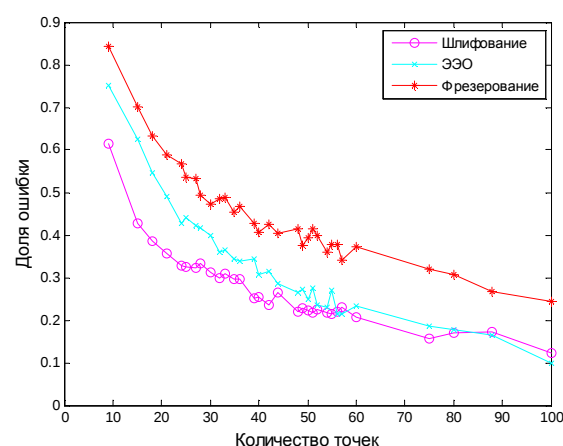
$$\Delta = \bar{z} - z_i, \quad (15)$$

где

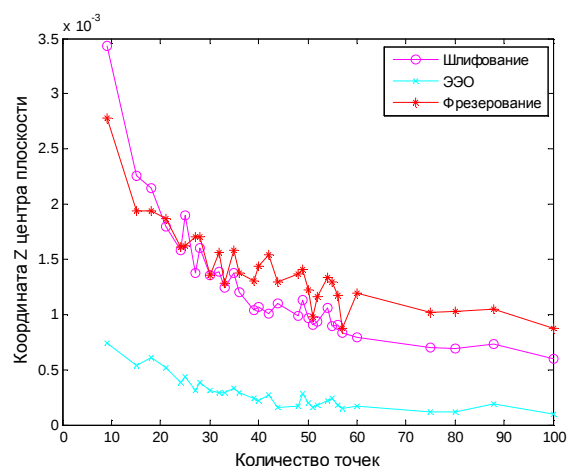
$\bar{z}$ – координата ЗЭ «плоскость» на координатной оси z , вычисленная при количестве контролируемых точек I с достоверной вероятностью 99,73%.

На рис. 3 приведены зависимости параметров V_M и Δ от количества контролируемых точек и метода обработки. Для

высокой достоверности выявления отклонения формы при контроле шлифованных поверхностей с такой же схемой обработки необходимо 30 точек. Рис.3, б показывает, что координата z (используемая для дальнейших расчётов линейных параметров относительно других элементов) является точнее при меньшем количестве контролируемых точек и уже при 15 точках составляет около 2 мкм, что является приемлемой величиной погрешности.



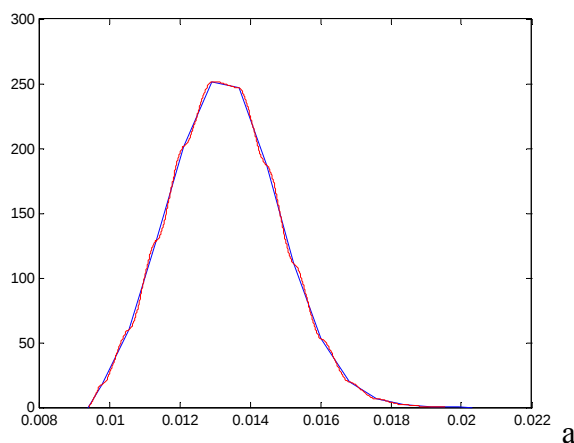
а



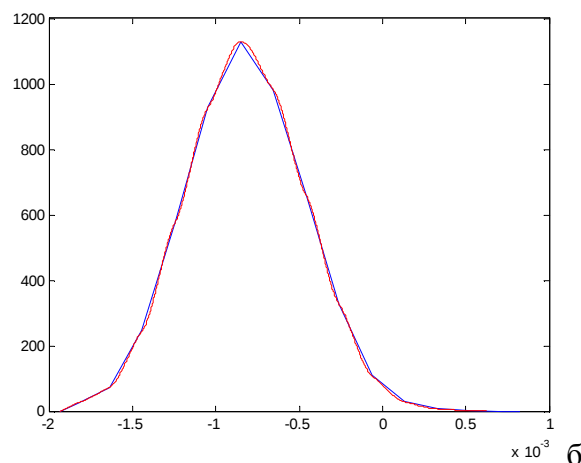
б

Рис. 3. Зависимости V_M и Δ от количества контролируемых точек и метода обработки:

а – для погрешности формы V_M ; б – для параметра Δ



а



б

Рис. 4. Плотность вероятности выборки, аппроксимированной сплайном Эрмита

а – для погрешности формы; б – для координаты z центральной точки ЗЭ «плоскость»

На рис. 4 представлена плотность вероятности выборки, аппроксимированной сплайном Эрмита.

С целью проверки повторяемости модели проведено повторение экспери-

ментов в ряде точек, при этом разброс параметров был в пределах 3%.

Сформированная методика позволяет изучать различные случаи измерения ГП, получать зависимости погрешностей

от параметров МИ и создавать научно-обоснованный базис для формирования и аттестации МИ.

Результаты исследований по данной методике могут быть также использованы при моделировании погрешностей базирования и измерения, осуществляемых с помощью щуповых систем, которыми оснащаются современные обрабатывающие центры.

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. 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.
2. Wilhelm, R. G. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement [Текст] / R. G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke – Elsevier, 2003. – 4с.
3. Ратмиров, В.А. Управление станками гибких производственных систем [Текст] / В. А. Ратмиров. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations Jean-Pierre Kruth, Nick Van Gestel, Philip Bleys, Frank Welkenhuyzen. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009). 463 – 466 с.
5. МИ 2552-99 Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
6. Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement [Текст] / JCGM – Elsevier, 2008. – 120 с.
7. Balakrishna P. An Integrated Approach for the Estimation of Spherical Form Tolerance [Текст] / P. Balakrishna, R. Shivakumar – Elsevier, 2006. – 12 с.
8. Dhanish, P. B. Effect of CMM point coordinate uncertainty on uncertainties in determination of circular features [Текст] / P. B. Dhanish, J Mathew – Elsevier, 2005. – 10 p.
9. Кудрявцев, М. Д. Оценивание погрешностей координатных измерений геометрических параметров в условиях плохо обусловленной измерительной задачи [Текст] / М. Д. Кудрявцев, Н. Л. Яворовская // Сб. тез. докл. VIII конф. Молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб. – 2006. (Гироподия и навигация. №2 (53), 2006г.).
10. Flack, D. Measurement good practice guide: CMM measurement strategies [Текст] / Flack D. – Elsevier, 2001. – 87 с.
11. Summerhays, K. D. Optimizing discrete point sample patterns and measurement data analysis on internal cylindrical surfaces with systematic form deviations [Текст] / K. D. Summerhays, R. P. Henke, J. M. Baldwin, R. M. Cassou, – Elsevier, 2002. – 1 с.
12. Залманзон, Л. А., Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залманзон. – М: Наука, 1989. – 496 с.
13. Bala Muralikrishnan, Jay Raja: “Computational Surface and Roundness Metrology”, [Текст] / Springer-Verlag London Limited. – 2009. – 263 с.
14. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики [Текст] / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

MODELS AND METHODS OF OPTIMIZING THE PROCEDURE OF MEASURING GAS TURBINE ENGINE PARTS USING COORDINATE MEASURING DEVICES

© 2011 M. A. Bolotov, I. A. Lyozin

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

The article deals with measurement techniques and methods of their optimization using the provisions of the probability theory and mathematical statistics. Dependence of measurement techniques on technological heredity is investigated.

Error, probability density, measurement procedure, coordinate measuring method, method of processing, production, efficiency.

Информация об авторах

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

E - mail: maikl_bol@rambler.ru.

Лёзин Илья Александрович, ассистент кафедры информационных систем. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: аппроксимативный анализ случайных процессов. E-mail: ilyozin@yandex.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), maikl_bol@rambler.ru. Area of research: coordinate measurement.

Lyozin Ilya Alexandrovitch, assistant of the information systems and technologies department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: approximate analysis of random processes.