

ВЛИЯНИЕ СТРАТЕГИИ ИЗМЕРЕНИЙ НА КИМ НА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ВАЛОВ МГТД

Петрунько А.А.¹, Болотов М.А.¹

¹Самарский университет, г. Самара, petrunko.aa@ssau.ru

Ключевые слова: точность контроля, координатно-измерительная машина, валы МГТД, неопределённость измерений, длина базы, количество точек.

Современное двигателестроение предъявляет высокие требования к точности изготовления ответственных деталей, в частности валов малоразмерных газотурбинных двигателей (МГТД). Критически важными параметрами, подлежащими контролю, являются геометрия цапф валов, а также радиальные и торцевые биения. Координатно-измерительные машины (КИМ) являются основным инструментом прецизионного контроля в авиадвигателестроении, характеризуясь высокой степенью универсальности и малыми значениями паспортных погрешностей [1].

При контроле геометрии цапф валов МГТД из-за малых измерительных баз возникают повышенные неопределённости, которые не отражаются паспортной погрешностью КИМ. Это приводит к двум негативным последствиям: либо годные детали бракуются, либо дефектные детали принимаются, что снижает надёжность двигателя в эксплуатации [2].

Цель работы – оценка влияния факторов (количества точек в сечении и длины базы) на неопределённость измерения геометрических параметров валов МГТД экспериментальным методом.

Объектом исследования являлись цилиндрические поверхности, геометрические параметры которых наиболее близки к реальным размерам валов МГТД. Номинальный диаметр образцов составлял 10 мм, длина – 74 мм. Измерения выполнялись на координатно-измерительной машине DEA Global Performance с неопределённостью измерения по паспорту: $MPEL=1,7+L/333$, мкм, щуп: диаметр измерительного наконечника – 2 мм, длина – 20 мм., температура: $20 \pm 0,5$ °С. Для проведения исследований был разработан и собран стенд, конструкция которого включает станину, две базирующие призмы для установки цилиндров и зажимы для фиксации начального положения образцов (рис. 1).

Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе выполнено 30 повторных измерений геометрических параметров при фиксированной длине базы 56 мм и различном количестве точек в сечении (6, 12, 18). На втором этапе реализован полный факторный эксперимент с варьированием двух факторов: длины базы (6,0; 25,3; 56,0 мм) и количества точек в сечении (6, 12, 18). Для обработки экспериментальных данных применялись методы математической статистики. Все расчеты выполнялись в среде MATLAB.

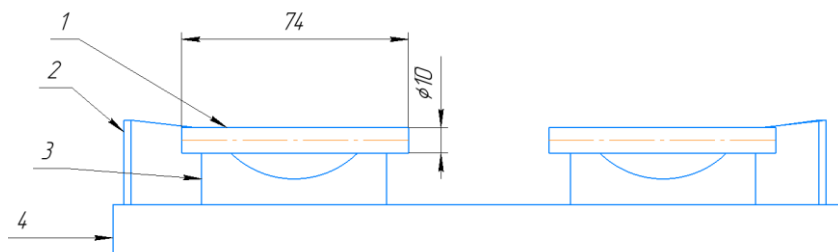


Рис. 1 – Экспериментальная установка:

1 – измеряемая цилиндрическая поверхность 2 – зажим; 3 – призма; 4 – станина

Результаты статистической обработки 30 повторных измерений показали, что полученные значения СКО не превышают паспортной точности КИМ (1,7–1,9 мкм). Доверительная погрешность при доверительной вероятности $P = 0,95$ составила от 0,03 до

0,40 мкм в зависимости от параметра, что подтверждает метрологическую пригодность выбранной методики и разработанного стенда.

На втором этапе для каждого из шести геометрических параметров построены поверхности отклика. Анализ трёхмерных графиков показал, что для параметра «диаметр» ключевым фактором является количество точек в сечении. Увеличение точек с 6 до 18 снижает неопределённость измерения почти в 2 раза. Влияние длины базы выражено слабее: изменение длины с 6 до 56 мм приводит к изменению СКО в 1,5 раза. Для угловых отклонений оси доминирующим фактором является длина базы. Увеличение базы с 6 до 56 мм снижает СКО угловых отклонений в 5–7 раз, что объясняется уменьшением влияния локальных погрешностей формы при оценке интегральных угловых характеристик.

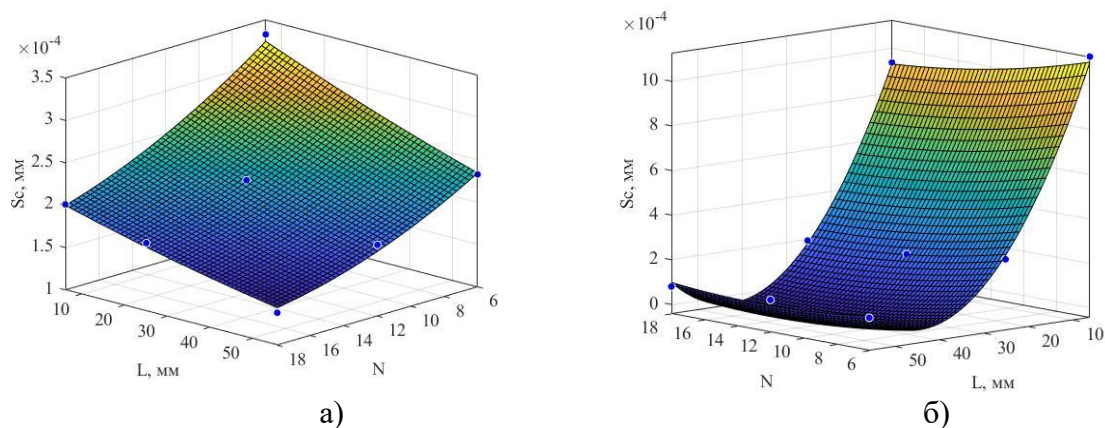


Рис. 2 – Зависимости СКО геометрических параметров от длины базы и количества точек:
а – для диаметра; б – для углового отклонения

Для каждого геометрического параметра были получены коэффициенты квадратичных полиномов вида:

$$Xi = a + b \cdot L + c \cdot N + d \cdot L^2 + e \cdot N^2 + f \cdot L \cdot N,$$

где X_i – геометрический параметр,
 a, b, c, d, e, f – коэффициенты полинома,
 L – длина измеряемой базы, мм,
 N – количество точек в сечении.

Коэффициент детерминации R^2 для всех моделей составил не менее 0,9876, что говорит о хорошей сходимости результатов. Проверка статистической значимости по критерию Фишера ($F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}} = 3,35$ при $\alpha = 0,05$) показала, что все полученные модели статистически значимы, так как $F_{\text{факт}}$ значительно превышает табличное значение.

Разработан стенд, позволяющий проводить исследования неопределённостей измерений цилиндрических поверхностей, имитирующих валы МГТД. Установлено, что для параметра «диаметр» ключевым фактором является количество точек (снижение СКО в 2 раза), а для угловых геометрических параметров – длина базы (снижение СКО в 5–7 раз).

Полученные статистически значимые квадратичные полиномы позволяют прогнозировать ожидаемую неопределённость при заданных условиях измерения и выбирать рациональную стратегию контроля, обеспечивая достоверность при минимизации временных затрат. Результаты работы могут быть использованы для последующей оценки неопределённостей радиальных и торцевых биений шеек валов ГТД.

Список литературы

1. Wen X.L. et al. Uncertainty evaluation of spatial straightness error based on Monte Carlo method // Measurement. – 2020. – Vol. 152. – P. 107324.

2. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. – Введ. 2010-04-15. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

Сведения об авторах

Петрунько Алёна Андреевна – студент группы 3102-240405D, Самарский университет. Область научных интересов: метрология, авиадвигателестроение, контроль деталей МГТД.

Болотов Михаил Александрович – д.т.н., профессор кафедры технологии производства двигателей. Область научных интересов: метрология, авиадвигателестроение, контроль деталей МГТД.

INFLUENCE OF MEASUREMENT STRATEGY ON CMM UNCERTAINTY FOR GEOMETRY CONTROL OF SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE SHAFTS

Petrunko A.A.¹, Bolotov M.A.¹

¹Samara University, Samara, alena.petrunko@ssau.ru

Keywords: coordinate measuring machine, measurement uncertainty, small-sized gas turbine engine, shaft journals, base length, number of points.

This paper presents an experimental study of the influence of base length (6.0, 25.3, and 56.0 mm) and the number of measured points per cross-section (6, 12, and 18) on the measurement uncertainty of geometric parameters of cylindrical surfaces simulating the shafts of small-sized gas turbine engines (SSGTE). A special test rig was developed to ensure stable part positioning. Repeatability assessment confirmed the metrological suitability of the developed methodology. The results revealed that for the diameter parameter, the number of measured points is the dominant factor, providing a two-fold reduction in RMS deviation. For angular parameters, the base length is decisive, reducing RMS deviation by a factor of 5–7. Approximation polynomials were obtained with high statistical significance ($R^2 \geq 0.9876$). The proposed approach enables prediction of measurement uncertainty and optimization of the measurement strategy for SSGTE shafts.