

личны. Анализ Таблица 2 по соотношению между  $T_1/T_2$  показывает, что передаточная функция (1) не является универсальной. Для датчика у нагревателя вторя постоянная времени практически не проявляется.

Таблица 1. СКО между экспериментальными данными и аппроксимацией.

n	1	2	3	5	9
$\theta_1$	1,516794	1,48784	1,83319	1,48171	1,48363
$\theta_2$	1,860959	1,66836	2,58108	1,55669	1,52769
$\theta_3$	2,041848	1,67723	3,43745	1,51361	1,48421
$\theta_4$	8,110907	8,11090	8,11090	8,11090	8,11090

Таблица 2. Соотношение между постоянными времени  $T_1/T_2$ .

n	1	2	3	5	9
$\theta_1$	14,8790	30,435	70,717	72,7962	137,709
$\theta_2$	7,63766	16,179	42,417	40,5791	72,6777
$\theta_3$	3,22534	7,2336	27,599	19,2987	36,3326
$\theta_4$	1,4304e+09	1,4304e+09	1,4304e+09	6,7047e+08	9,6688e+08

**Заключение.** Выбор точки контроля температуры существенно влияет на вид оптимальной передаточной функции аппроксимации. Использование нескольких датчиков температуры позволяет восстановить профиль распределения температуры, может позволить проинтегрировать выделяемую мощность и применить данный параметр для использования в системах управления и стабилизации.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доцент ХтиТ БГТУ.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

В.В. Иванов, О.В. Захаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) получили широкое применение в промышленности для измерения размеров, формы и расположения поверхностей деталей. Точность и производительность измерения на КИМ зависит от применяемой стратегией выбора числа, расположения точек и последовательности их обхода на измеряемой поверхности. На практике, как правило, требуется измерить одну или несколько поверхностей детали с заданной погрешностью и максимальной производительностью [1, 2].

Научное обоснование для выбора числа и расположения контрольных точек на различных типах поверхностей отсутствует, поэтому имеются сложности в практике измерения. Рекомендации производителей КИМ и программного обеспечения носят общий характер и касаются лишь минимального числа контрольных точек для поверхностей (плоскость, цилиндр, сфера и др.). В связи с этим данный вопрос решается непосредственно оператором КИМ и во многом зависит от его квалификации.

В статье представлена методика анализа влияния числа и расположения точек на точность и производительность измерения, построенная на основе метода статистических испытаний Монте-Карло. Эффективность применения этого метода показана в работе [3]. При стабильном технологическом процессе изготовления деталей закон распределения погрешностей в партии заготовок будет постоянным, а его параметры изменяются незначительно [3, 4]. В качестве объекта исследований выбрана цилиндричность, так как такие поверхности имеются на значительном числе деталей машин и механизмов.

Последовательность моделирования по предложенному методу следующая. На основе экспериментальных данных моделируются погрешности на цилиндрической поверхности. Для этого устанавливается закон и параметры распределения погрешностей, а также при необходимости наличие корреляционных связей между отдельными составляющими погрешности. Для партии деталей проводится многократное моделирование погрешностей с применением генератора случайных чисел и последующего преобразования в требуемый закон распределения. Затем по стандартной методике ISO 12180-2:2011 рассчитывается значение цилиндричности. Рассматриваются четыре варианта расположения контрольных точек. В первом варианте используется равномерная сетка по окружности и длине цилиндра, во втором – разреженная по линейному параметру (длине), в третьем – разреженная по угловому параметру (окружности), в четвертом варианте – равномерно разреженная сетка контрольных точек. Сравнение вариантов проводится по среднему значению и стандартному отклонению цилиндричности в моделируемой партии деталей. Кроме того, при задании допуска на цилиндричность могут быть рассчитаны измерительные ошибки первого и второго рода.

По результатам измерения цилиндра диаметром 50 мм и длиной 100 мм построены отклонения для четырех указанных вариантов (рис. 1). Погрешности увеличены в 500 раз. В варианте 1 были использованы 110 контрольных точек с равномерным разбиением по линейному параметру через 10 мм и угловому параметру через  $36^\circ$ . Остальные варианты были получены путем исключения ряда контрольных точек из варианта 1. Обработка результатов проводилась в программной среде Matlab.

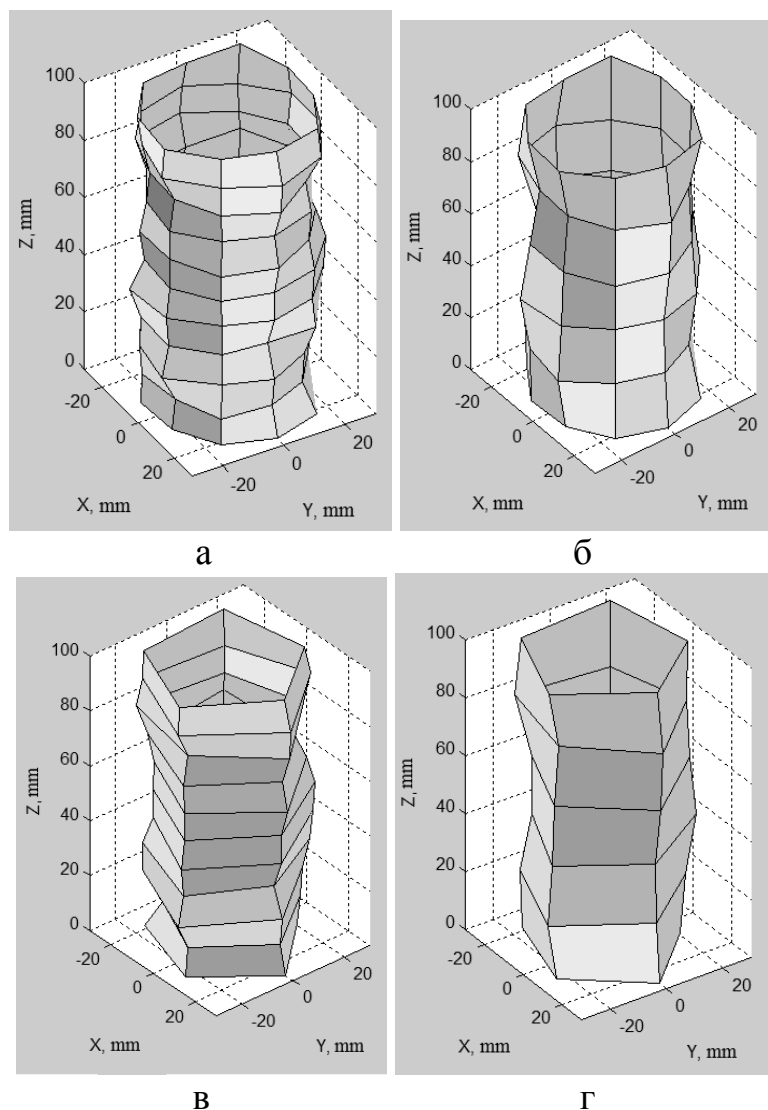


Рис. 1. Контроль цилиндричности: а – 110 точек (вариант 1), б – 60 точек (вариант 2), в – 55 точек (вариант 3), г – 30 точек (вариант 4)

Проведено моделирование контроля цилиндричности для партии из 50 деталей. Результаты показаны на рис. 2, обозначение вариантов расположения измеренных точек на поверхности соответствует рис. 1. Анализ результатов (рис. 3) показал, что контроль по 30 точкам (вариант 4) по сравнению с контролем по 110 точкам (вариант 1) дает заниженное значение среднего арифметического на 21 % и увеличение стандартного отклонения на 16 %. Характерной будет измерительная ошибка второго рода. Если для полученных данных принять, что допуск цилиндричности составляет 11 мкм, то по результатам контроля получаем процент брака для варианта 1 равным 27 %, а для варианта 4 – 4 %. В случае неравномерной сетки наилучший результат дает вариант 3. Расчетная величина брака составляет 10 %. Производительность по сравнению с вариантом 1 повышается более чем в 2 раза.

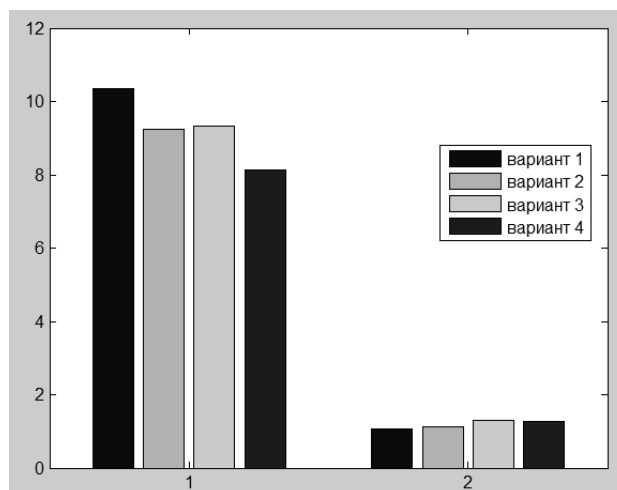


Рис. 2. Сравнительная диаграмма цилиндричности: 1 – среднее арифметическое, 2 – стандартное отклонение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что число и расположение контрольных точек значительно влияет на результат измерения цилиндричности. При уменьшении числа измерений увеличивается вероятность измерительной ошибки второго рода. Рекомендуется использовать неравномерную сетку контрольных точек, что обеспечит выигрыш по производительности при минимальной потере точности.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.
2. Печенкин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В., Янюкина М.В. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18-23.
3. Štrbac B., Radlovački V., Ačko, B., Spasić-Jokić V., Župunski Lj., Hadžistević M. The use of Monte Carlo simulation in evaluating the uncertainty of flatness measurement on a CMM. JPE (2016) Vol.19. pp. 69-72.
4. Захаров О.В. Формообразование сложных поверхностей с применением адаптивных систем контроля / О. В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2014. - 256 с.

Научный руководитель: О.В. Захаров, д.т.н., профессор ИнЭТМ СГТУ им. Гагарина Ю.А.