

DOI: 10/15593/2224-9877/2017.4.07

УДК 531.7

**Ф.В. Гречников<sup>1</sup>, А.С. Яковишин<sup>2</sup>, О.В. Захаров<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет  
им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,  
Саратов, Россия

## **МИНИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Научно обоснована и реализована методика минимизации объема измерений для цилиндрических поверхностей деталей, основанная на статистическом моделировании. Согласно этой методике предложено определять минимальное число измерений точек на поверхности по результатам контроля ограниченной выборки из партий деталей и последующего статистического моделирования процесса контроля. Такой подход позволяет дать предварительную интервальную оценку погрешности измерения и ошибок первого и второго рода. Для партии из 100 деталей выполнено моделирование измерения для четырех вариантов с различным числом и расположением контрольных точек на цилиндрической поверхности. В качестве исходных данных были взяты результаты измерения координат 110 точек цилиндра диаметром 50 мм и длиной 100 мм на мобильной координатно-измерительной машине модели Faro Arm Edge. Исследовано четыре варианта расположения контрольных точек на цилиндрической поверхности с изменением их числа от 110 до 50. Выявлено, что ошибка измерения хорошо описывается нормальным законом распределения, поэтому в качестве оценки можно использовать среднее арифметическое и стандартное отклонение. При уменьшении числа контрольных точек относительно базового варианта характерна измерительная ошибка второго рода. Установлено, что при уменьшении числа контрольных точек уменьшается среднее арифметическое, увеличивается стандартное отклонение ошибки измерения и увеличивается вероятность измерительной ошибки второго рода. Практическая реализация предложенного подхода позволяет уменьшить число контрольных точек при обеспечении требуемой точности измерения и повысить производительность контроля.

**Ключевые слова:** контроль, измерение, погрешность измерения, минимальное число измерений, цилиндрическая поверхность, цилиндричность, координатно-измерительная машина, статистическое моделирование, стандартное отклонение, ошибка второго рода.

**F.V. Grechnikov<sup>1</sup>, A.S. Yakovishin<sup>2</sup>, O.V. Zakharov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Samara National Research University, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup> Yuri Gagarin State Technical University, Saratov, Russian Federation

## **MINIMIZATION OF THE MEASUREMENT VOLUME FOR THE CONTROL OF CYLINDRICAL SURFACES ON THE BASIS OF STATISTICAL MODELING**

The method of minimization of the volume of measurements of cylindrical surfaces of parts based on statistical modeling has been scientifically substantiated and implemented. According to this method, it is proposed to determine the minimum number of measurements of points on the surface based on the results of monitoring a limited sample from parts lots and subsequent statistical modeling of the control process. Such an approach allows us to give a preliminary interval estimation of measurement error,  $\alpha$ -errors and  $\beta$ -errors. For a batch of 100 parts, a measurement simulation for four variants with a different number and arrangement of control points on a cylindrical surface is performed. As initial data, the results of measuring the coordinates of 110 cylinder points with a diameter of 50 mm and a length of 100 mm on a mobile coordinate measuring machine of the Faro Arm Edge model were taken. Four variants of the arrangement of control points on a cylindrical surface with a change in their number from 110 to 50 are investigated. It is revealed that the measurement error is well described by the normal distribution law, therefore the arithmetic mean and standard deviation can be used as an estimate. With a decrease in the number of control points relative to the basic variant, a measurement  $\beta$ -error is characteristic. It is established that when the number of control points decreases, the arithmetic mean decreases, the standard deviation of the measurement error increases and the probability of a measurement  $\beta$ -error increases. Practical implementation of the proposed approach makes it possible to reduce the number of control points while ensuring the required accuracy of measurement and to increase the measurement performance.

**Keywords:** control, measurement, error, measurement error, minimum number of measurements, cylindrical surface, cylindricity, coordinate measuring machine, statistical modeling, standard deviation,  $\beta$ -error.

Детали с цилиндрическими поверхностями составляют более половины всех деталей в машино-, автомобилестроении. Именно они используются в наиболее ответственных сопряжениях и во многом определяют качество изделия или узла. Повышение требований к точности изготовления цилиндрических поверхностей деталей, в свою очередь, обуславливает повышение требований к точности их контроля.

В настоящее время для комплексного контроля деталей применяют координатно-измерительные машины (КИМ). Они обладают достаточной точностью и производительностью, мощным программным обеспечением и позволяют измерять размеры, форму и взаимное положение поверхностей. В зависимости от требований к точности и производительности контроля, а также габаритных размеров измеряемой детали находят применение традиционные трехкоординатные КИМ, шестиосевые КИМ, мобильные КИМ и трекары [1]. Из-за срав-

нительно малой стоимости всё более широкое распространение получают мобильные КИМ. Областью их целесообразного применения можно считать контроль крупногабаритных корпусных деталей, например бандажей барабанов, лопаток турбин, арматуры двигателей, а также измерение непосредственно на обрабатывающем оборудовании [2–8].

Основной недостаток мобильных КИМ заключается в низкой производительности, так как контроль выполняется методом единичных касаний поверхности оператором или сканирования с низкой скоростью. В результате увеличение числа контрольных точек становится обратно пропорционально повышению производительности. Исходя из этого возникает задача минимизации объема измерений при сохранении заданной погрешности измерения. Как правило, данная задача решается путем проведения экспериментальных исследований или производственного опыта операторов КИМ [9–11]. В настоящей статье предлагается методика минимизации числа контрольных точек, базирующаяся на статистическом моделировании процесса измерения.

Статистическое моделирование проводится в следующей последовательности. На первом этапе моделируют последовательности псевдослучайных чисел с заданными законами распределения вероятностей и корреляцией, имитирующие случайные значения составляющих погрешностей при каждом испытании. При стабильном технологическом процессе закон распределения погрешностей не изменяется, а его параметры изменяются незначительно, поэтому определить закон и параметры распределения погрешностей возможно на основе небольшой выборки из партии деталей. На втором этапе выполняют серии расчетов цилиндричности для поверхностей с моделированными отклонениями формы, определяя значения погрешностей размера и формы. Число итераций при моделировании можно связать с числом деталей в партии или задать заведомо большим для получения статистической устойчивости. На третьем этапе выполняют статистическую обработку результатов моделирования – устанавливают закон и определяют параметры распределения или рассчитывают статистические моменты. В итоге имеем интервальную оценку погрешности измерения для сравнения вариантов с различным числом и расположением контрольных точек на цилиндрической поверхности.

Практическая реализация методики минимизации объема измерений была осуществлена для цилиндрической поверхности вала диаметром 50 мм и длиной 100 мм. Измерение выполнялось на мобильной КИМ модели Faro Arm Edge (FARO Swiss, Швейцария). Изначально измерения проводились для цилиндра с равномерным разбиением сеткой контрольных точек через 10 мм по длине и  $36^\circ$  по углу. В результате был получен массив из 110 контрольных точек. Для контроля по этому массиву в программе Power Inspect создана трехмерная модель детали с разметкой контрольных точек на измеряемом цилиндре.

На основе полученных данных измерения выполнено статистическое моделирование для партий из 100 деталей с погрешностями цилиндричности. По стандартной методике рассчитано значение цилиндричности. Статистическое моделирование и обработка результатов проводились с помощью разработанной программы в расчетной среде MatLab.

При моделировании измерения рассмотрено четыре варианта расположения контрольных точек на цилиндре:

- вариант а – равномерная сетка по оси  $Z$  и угловому положению, число контрольных точек 110;
- вариант б – неравномерная сетка, разреженная по оси  $Z$  по сравнению с вариантом а, число контрольных точек 60;
- вариант в – неравномерная сетка, разреженная по угловому положению по сравнению с вариантом а, число контрольных точек 55;
- вариант г – равномерная сетка, разреженная по оси  $Z$  и угловому положению по сравнению с вариантом а, число контрольных точек 30.

Вариант а при моделировании рассматривался как базовый. Все остальные варианты были получены из базового путем исключения ряда контрольных точек по приведенным выше правилам. Результаты одной из реализаций моделирования цилиндричности показаны на рис. 1 (погрешности увеличены в 500 раз).

Статистическая обработка полученных в результате моделирования данных показала, что погрешность измерения хорошо описывается нормальным законом распределения. Оценка проводилась по критерию согласия Пирсона с доверительной вероятностью 95 %. В качестве примера на рис. 2 представлена гистограмма распределения моделированного значения цилиндричности для партии деталей по варианту а.

Таким образом, сравнение вариантов а–г проводилось по среднему арифметическому значению и стандартному отклонению погрешности

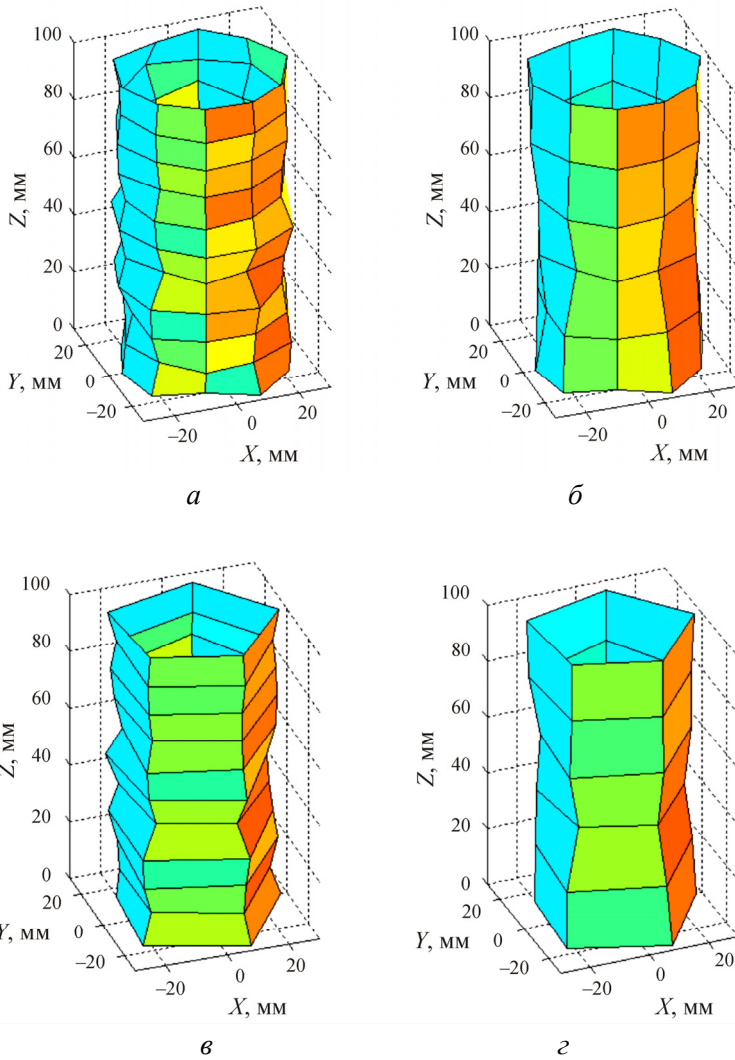


Рис. 1. Пример моделирования погрешности цилиндрической поверхности

измерения цилиндричности. Также было условно задано допуск на цилиндричность 12 мкм и рассчитаны значения брака в процентах и измерительных ошибок первого и второго рода. Установлено, что для рассмотренных вариантов характерна только измерительная ошибка второго рода. Результаты статистической обработки для партии деталей представлены на рис. 3.

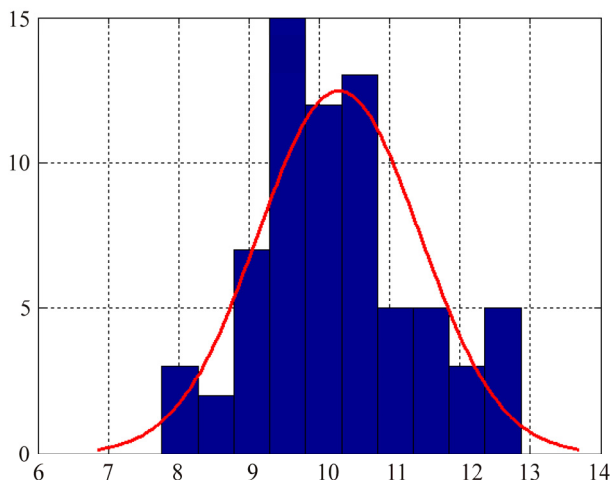


Рис. 2. Гистограмма цилиндричности (вариант а)

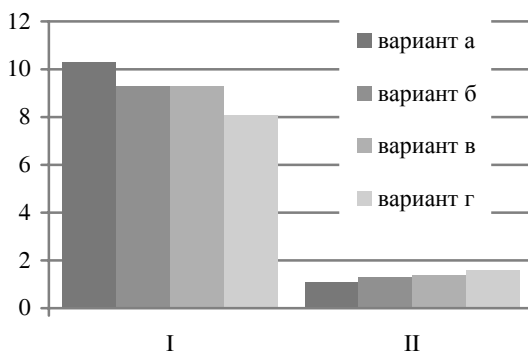


Рис. 3. Погрешность измерения цилиндричности для вариантов а–г: I – среднее арифметическое значение, мкм; II – стандартное отклонение, мкм

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) уменьшение числа контрольных точек приводит к тому, что измеренное значение цилиндричности уменьшается, наибольшее расхождение с базовым вариантом а дает вариант г, где среднее арифметическое меньше на 21 % и стандартное отклонение больше на 31 %;

2) для всех вариантов характерна только измерительная ошибка второго рода, т.е. увеличивается вероятность по результатам измерения признать годной бракованную деталь, наибольшую ошибку дает вариант г с минимальным числом контрольных точек;

3) при измерении цилиндричности удовлетворительный результат дает уменьшение контрольных точек с 110 до 60 (вариант б), при этом выигрыш в производительности составляет примерно два раза.

Таким образом, научно обоснована и экспериментально проверена методика минимизации объема измерений при контроле цилиндрических поверхностей с использованием статистического моделирования. На основе измерения ограниченной выборки из партий деталей проводится статистическое моделирование, которое позволяет получать интервальные оценки погрешности измерения. Проведенные исследования установили, что при уменьшении числа контрольных точек уменьшается среднее арифметическое, увеличивается стандартное отклонение ошибки измерения и увеличивается вероятность измерительной ошибки второго рода. Применение рассмотренной методики делает возможным обоснованный выбор минимального числа измерений при обеспечении заданной точности, что позволяет увеличить производительность контроля цилиндрических и других поверхностей.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).*

#### **Список литературы**

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. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления РАН, 2016. – С. 223–225.
2. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. – М.: Машиностроение, 2004. – 287 с.
3. Иванова Т.Н. Конструкторско-технологическое обеспечение качества поверхности при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 4. – С. 28–29.
4. Моделирование сопряжения деталей по плоско-цилиндрическим поверхностям / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, И.А. Грачев, И.В. Щербаков, Н.Д. Проничев // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 22–28.
5. Балаев А.Ф. Технология стабилизации колец подшипников на основе геометрической наладки оборудования для бесцентровой обкатки // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 5. – С. 7–12.
6. Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Гончаров М.С. Контактные проявления процесса резания при восстановительной обработке бандажей технологических барабанов // Вестник Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 95–100.

7. Захаров О.В., Усынин С.М. Центрирование заготовок по окружности минимальной зоны при сборке и обработке // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10. – С. 43–46.

8. Звонов С.Ю., Попов И.П., Шляпугин А.Г. Особенности процесса формообразования полых конических деталей из кольцевой заготовки // Известия вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 75–76.

9. Васильева А.А., Абляз Т.Р. Исследование процесса измерения корпусных деталей на координатно-измерительной машине Carl Zeiss Contura G2 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – № 3. – С. 32–40.

10. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 18–23.

11. Джунковский А.В., Суслин В.П., Холодов Д.А. Определение оптимального количества точек при измерении колец подшипников качения на координатно-измерительных машинах // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы междунар. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во МАМИ, 2012. – Кн. 7. – С. 62–67.

## References

1. Grechnikov F.V., Zakharov O.V., Korolev A.A. Napravleniia povysheniia proizvoditel'nosti i tochnosti kontroliia slozhnykh poverkh-nostei na koordinatno-izmeritel'nykh mashinakh [The directions of increase in productivity and accuracy of control of difficult surfaces on coordinate measurement machines]. *Sistemy proektirovaniia, tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva i upravleniia etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta*. Moscow, Izdatel'stvo instituta problem upravleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2016, pp. 223–225.

2. Sukhochev G.A. Upravlenie kachestvom izdelii, rabotaiushchikh v ekstremal'nykh usloviiax pri nestatsionarnykh vozdeistviiakh [Quality management of the products working in extreme conditions at non-stationary influences]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 287 p.

3. Ivanova T.N. Konstruktorsko-tekhnologicheskoe obespechenie kachestva poverkhnosti pri shlifovanii [Design-technology ensuring quality of a surface when grinding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2005, no. 4, pp. 28–29.

4. Bolotov M.A., Pechenin V.A., Ruzanov N.V., Grachev I.A., Shcherbakov I.V., Pronichev N.D. Modelirovanie sopriazheniia detalei po plosko-tsilindricheskim poverkhnostiam [Modeling of interface of details on flat and cylindrical surfaces]. *Stanki i instrument*, 2017, no. 3, pp. 22–28.

5. Balaev A.F. Tekhnologiya stabilizatsii kolets podshipnikov na osnove geometricheskoi naladki oborudovaniia dlia bestsentrovoy obkatki [Technology of stabilization of rings of bearings on the basis of geometrical adjusting for a centerless running in]. *Izvestiia volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 5, pp. 7–12.

6. Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Goncharov M.S. Kontaktnye proiavlenniia protsessa rezaniia pri vosstanovitel'noi obrabotke ban-dazhei tekhnologicheskikh barabanov



[Contact manifestations of process of cutting at recovery processing of bandages of technological drums]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*, 2017, no. 4, pp. 95–100.

7. Zakharov O.V., Usynin S.M. Tsentrirovaniye zagotovok po okruzhnosti minimal'noi zony pri sborkе i obrabotke [Centering of preparations on a circle of the minimum zone at assembly and processing]. *Sborka v ma-shinostroenii, priborostroenii*, 2014, no. 10, pp. 43–46.

8. Zvonov S.Iu., Popov I.P., Shliapugin A.G. Osobennosti protsessa formoobrazovaniia polykh konicheskikh detalei iz kol'tsevoi zagotovki [Features of process of shaping of hollow conic details of ring preparation] *Izvestiia vuzov. Aviatsionnaia tekhnika*, 2010, no. 3, pp. 75–76.

9. Vasil'eva A.A., Abliaz T.R. Issledovanie protsessa izmereniia korpusnykh detalei na koordinatno-izmeritel'noi mashine Carl Zeiss Contura G2 [Research of process of measurement of case details on the Carl Zeiss Contura G2 coordinate measurement machine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, no. 3, pp. 32–40.

10. Pechenin V.A., Bolotov M.A., Ruzanov N.V., Ianiukina M.V. Optimizatsiia izmerenii geometrii detalei so slozhnyimi poverkhnostiami [Optimization of measurements of geometry of details with difficult surfaces]. *Izmeritel'naia tekhnika*, 2015, no. 3, pp. 18–23.

11. Dzhunkovskii A.V., Suslin V.P., Kholodov D.A. Opredelenie optimal'nogo kolichestva toчек pri izmerenii kolets podshpnikov kachenii na koordinatno-izmeritel'nykh mashinakh [Determination of optimum quantity of points at measurement of rings of rolling bearings on coordinate measurement machines]. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: prioritety razvitiia i podgotovka kadrov: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii*. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo mashinostroitel'nogo universiteta, 2012, Kniga 7, pp. 62–67.

Получено 22.08.2017

#### Об авторах

**Гречников Федор Васильевич** (Самара, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева, академик РАН; e-mail: gretch@ssau.ru.

**Яковишин Александр Сергеевич** (Саратов, Россия) – аспирант кафедры технологии машиностроения Саратовского государственного технического университета; e-mail: tms@sstu.ru.

**Захаров Олег Владимирович** (Саратов, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения Саратовского государственного технического университета; e-mail: tms@sstu.ru.

**About the authors**

**Fedor V. Grechnikov** (Samara, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Processing, Samara National Research University, Academician of Russian Academy of Sciences; e-mail: gretch@ssau.ru.

**Alexander S. Yakovishin** (Saratov, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Technology of Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University; e-mail: tms@sstu.ru.

**Oleg V. Zakharov** (Saratov, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University; e-mail: tms@sstu.ru.