

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.06

УДК 53.083

Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев, О.В. ЗахаровСаратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия**КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МОБИЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ**

Одной из важных задач является обеспечение требований к точности размеров, формы и расположения поверхностей при обработке технически сложных деталей. Объектом исследования являются детали со сложными поверхностями, такие как коленчатые и распределительные валы, турбинные лопатки и корпусные детали с большим количеством отверстий, сложные корпусные детали, например блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания, штампы, пресс-формы, зубчатые колеса и кузова автомобилей. Геометрия сложных деталей обусловлена их функциональным назначением, таким образом, контроль сложных поверхностей должен осуществляться исходя из требований сборки всей детали в целом.

В современном высокоавтоматизированном производстве измерение сложных деталей на координатно-измерительных машинах (КИМ) имеет большое значение, актуальной является необходимость установить целесообразность контроля. Целью данной работы является формирование наиболее подходящей методики измерения, с помощью которой будет осуществляться контроль технически сложных поверхностей деталей и разработка математических моделей для автоматизированной оценки полученных результатов.

Предлагаемая нами методика координатных измерений включает в себя стратегию измерений (рекомендуемое число точек, их расположение на контролируемых поверхностях и последовательность обхода (траектория движения)), также набор расчетных моделей, математически описывающих взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми линейно-угловыми параметрами.

Первоначально в соответствии с заданной методикой измерения в ручном или автоматическом цикле измеряют координаты отдельных точек, принадлежащих реальным поверхностям контролируемого объекта. Перемещения программируются в системе координат детали (СКД), образуемой ее базами. Главная СКД привязывается к системе координат КИМ (СКМ) с помощью математического базирования. Эта процедура заключается в расчете расположения системы координат по предварительно измеренным в СКМ точкам базовых элементов детали и последующей трансформации координат точек других элементов из СКМ в СКД.

При разработке методики измерений необходим учет количества точек для каждой измеряемой поверхности, это количество должно быть оптимальным.

Далее на втором этапе производятся расчеты заданных размеров, отклонений формы и расположения поверхностей с помощью разработанного комплекса математических моделей.

По результатам данной работы представлен комплекс математических моделей и алгоритмов для контроля геометрических характеристик изделий на мобильных КИМ. Показаны преимущества предложенных методик по сравнению со стандартными. Определена область эффективного применения мобильных КИМ при контроле технически сложных поверхностей. Предложен новый метод координатных измерений для деталей с технически сложными поверхностями, позволяющий осуществлять контроль данных поверхностей с меньшим числом точек по сравнению с рекомендациями известных производителей координатных машин, повысить производительность операций контроля, а также увеличить точность оценки результатов измерений.

Ключевые слова: контроль сложных поверхностей, мобильные координатно-измерительные машины, автоматизация процесса измерений, методика координатных измерений, оптимальное количество точек, отклонение формы и расположения поверхностей, расчет заданных параметров, математические модели, программирование координатных перемещений, алгоритм процесса измерений.

E.P. Reshetnikova, P.Iu. Bochkarev, O.V. Zakharov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russian Federation

COMPLEX MATHEMATICAL MODELS FOR THE CONTROL OF TECHNIQUE COMPLEX SURFACES ON COORDINATE MEASURING MACHINES

One of the important tasks is to ensure that the requirements of dimensional accuracy, form and position of surfaces in the processing of technically complex parts. Object of research are the details of complex surfaces, such as crankshafts and camshafts, turbine blades and body parts with lots of holes, complex body parts, for example, a cylinder block of an internal combustion engine, dies, molds, gears, and car bodies. Geometry of complex parts due to their functional purpose, thus, control of complex surfaces must be based on the requirements of the Assembly of all parts in General.

In today's highly automated production measurement of complex parts on coordinate measuring machines (CMMS) is of great importance, there is an urgent need to establish the feasibility of control. The aim of this work is the formation of the most appropriate methods of measurement, which will be monitored technically complex surfaces of parts and development of mathematical models for automated evaluation of the results.

The proposed method of coordinate measurement includes measurement strategy (recommended number of outlets, their location on a controlled surfaces and sequence of bypass (trajectory)), also a set of computational models that describe mathematically the relationship of the coordinates of the measured points with a defined linear and angular parameters.

Initially in accordance with the specified measurement procedure in manual or automatic cycle, measure the coordinates of the separate points belonging to the real surfaces of the test object. Movements are programmed in the coordinate system of the part (SCD), formed by its bases. Primary SCD is tied to the coordinate system CMM (SCM) using mathematical based. This procedure involves the calculation of the location of the coordinate system in pre-measured points in the SCM basic elements and the subsequent transformation of coordinates of points of the other elements of SCM in SCD.

When developing measurement techniques necessary given the number of points for each of the measured surface, it must be the optimal number.

Further, in the second stage, the settlements of a given size, deviations of form and position of surfaces with the help of the developed complex mathematical models.

The results of this work presents a set of mathematical models and algorithms for control of geometrical characteristics of products on mobile CMM. The advantages of the proposed methods compared to the standard. Defined the field of efficient use of mobile CMM in the control of technically complex surfaces. A new method of coordinate measurement for parts with complex surfaces, enabling control of the data surfaces with fewer points compared with the recommendations of the known manufacturers of coordinate machines, designed to improve the performance of control operations, and to increase the accuracy of the evaluation of the measurement results.

Keywords: control of complex surfaces, the mobile coordinate measuring machine, the automation of the measurement process, the method of coordinate measurement, the optimal number of points, the deviation of the shape and position of surfaces, calculation of the parameters, mathematical models, programming of coordinate displacements, the algorithm of the measurement process.

Высоких экономических показателей в условиях рыночных отношений машиностроительные предприятия достигают благодаря работе с широкой номенклатурой деталей. Одним из важных направлений развития современного машиностроения является обработка деталей с технически сложными поверхностями. Это – эвольвенты, геликоидные и гипоидные поверхности, поверхности турбинных лопаток, асферические поверхности астрооптики, цилиндрические и конические резьбы [1].

Проведенный анализ производства показал несовершенство процесса механической обработки сложных поверхностей деталей, а именно: обработка деталей со сложными поверхностями представляет собой длительный процесс, контроль ответственных поверхностей осуществляется при помощи универсального измерительного инструмента, а входной и межоперационный контроль несовершенен. Решением является автоматизация процесса контроля измерений и применение в качестве средства измерения координатно-измерительной машины (КИМ). Роль координатно-измерительных машин в системе размерного контроля год от года возрастает по причине универсальности и высокой производительности этих средств контроля.

Координатно-измерительные машины представляют собой прецизионные технические устройства, предназначенные для контроля геометрических параметров большой номенклатуры деталей. Специализированные КИМ предоставляют пользователю большие возможности по контролю в производственных условиях деталей больших размеров и массы, но при этом имеют особенности, связанные с ограниченным числом измеряемых контактным методом точек и их неравномерным расположением на поверхности [2].

Использование в качестве средства контроля КИМ обуславливает ряд особенностей. Во-первых, основным измерительным элементом КИМ является головка с наконечником в виде сферы определенного радиуса, которая в процессе контроля огибает (обкатывает) поверхность. В зависимости от радиуса сферы наконечника, кривизны поверхности и характера отклонений формы возможно так называемое «недоощупывание» поверхности. Во-вторых, измерительная головка фиксирует момент касания (механическим способом) и определяет положение центра сферы относительно глобальной системы координат. Измеренная точка на поверхности рассчитывается исходя из предпо-

ложения, что сфера коснулась измеряемой поверхности по нормали, т.е. нормали к сфере и поверхности в данной точке совпали. Для этого необходимо иметь исходный геометрический образ детали и рассчитать траектории перемещения головки со щупом. В-третьих, невысокая производительность контроля контактным методом делает необходимым нахождение минимального числа и определенного положения измеряемых точек на поверхности [1].

В современной промышленности используются различные разновидности известных КИМ. Однако в настоящее время не существует наилучшего варианта, каждая из КИМ имеет как достоинства, так и недостатки. Преимущество мобильных КИМ – возможность применения в лабораторных и производственных условиях, сравнительная простота обслуживания и невысокая стоимость. Однако эффективность работы мобильной КИМ в большей степени зависит от используемой методики сбора и обработки информации. Повышение эффективности использования функциональных возможностей КИМ при измерении технически сложных поверхностей требует решения ряда нетривиальных научных задач и проведения экспериментальных исследований.

Анализ известного программного обеспечения для мобильных КИМ [3, 4] показал, что отсутствует программное обеспечение, пригодное для различных типов КИМ. Исходя из этого актуальна разработка нового программного продукта.

С данной целью в метрологической лаборатории СГТУ им. Ю.А. Гагарина проводятся экспериментальные исследования на координатно-измерительной машине FARO 9 ARM EDGE (фирма FARO Swiss Holding GmbH, Швейцария). Важной задачей является постоянное повышение требований к точности размеров, формы и расположения поверхностей деталей. Проведенный анализ существующих методик контроля технически сложных деталей выявил необходимость создания методики автоматизированного контроля геометрических характеристик таких поверхностей [5].

Основные термины и определения для геометрических характеристик поверхностей дают ГОСТ Р 53442–2009 и ISO 1101:2011. В них рассмотрены четыре типа геометрических элементов для контроля формы: круглость, плоскостность, цилиндричность, форма заданной поверхности. Указанные элементы являются комплексными, все остальные сводятся к ним. Поскольку данный стандарт определяет только термины, то конкретные методики и математические модели не приведены.

В связи с этим разработан комплекс математических моделей для контроля круглости (рис. 1) [6], профиля продольного сечения (рис. 2) [7] и сферичности (рис. 3) [8].

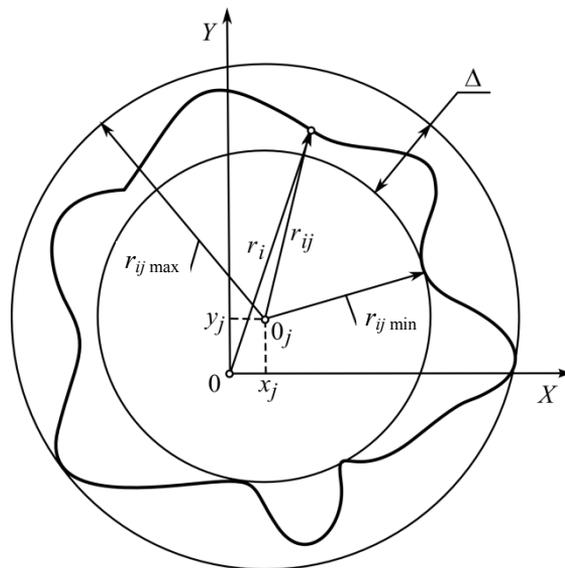


Рис. 1. Расчетная схема контроля круглости

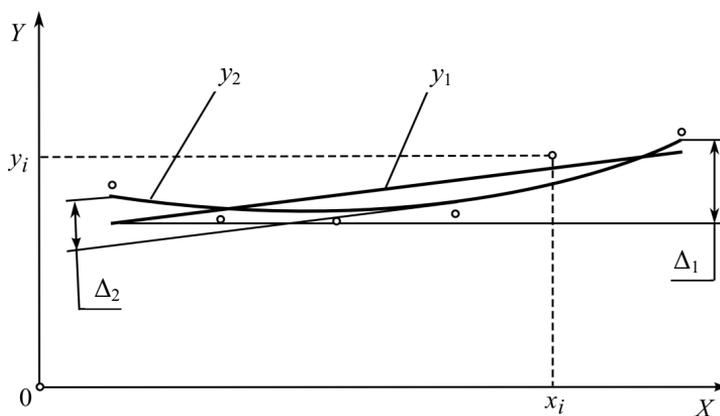


Рис. 2. Схема контроля частных отклонений профиля продольного сечения

Контроль круглости предназначен для так называемых круговых поверхностей, имеющих номинальную форму поперечного сечения в виде окружности: цилиндр, сфера, тор, конус, тело вращения. В настоящее время анализ круглости деталей проводится с применением

трех баз: средней, внутренней и внешней прилегающей окружностей, окружностью минимальной зоны. Согласно стандарту ISO 12181-1:2011, который заменил стандарты отдельных европейских стран (Великобритания, Германия, Франция), все указанные базы считаются равноценными. Аналогичные рекомендации дают и стандарты других стран: США ASME B 89.3.1*ANSI B 89.3.1, Японии JIS B 7451–97. Проведенные исследования показали, что расхождение в результатах для трех указанных баз могут достигать 30 %. Ввиду простоты расчета и однозначности получаемых результатов чаще всего используют среднюю окружность, получаемую методом наименьших квадратов. При использовании окружности минимальной зоны удастся получить параметры окружности исходя из минимальной зоны траекторий движения. Однако требуются итерационные методы решения.

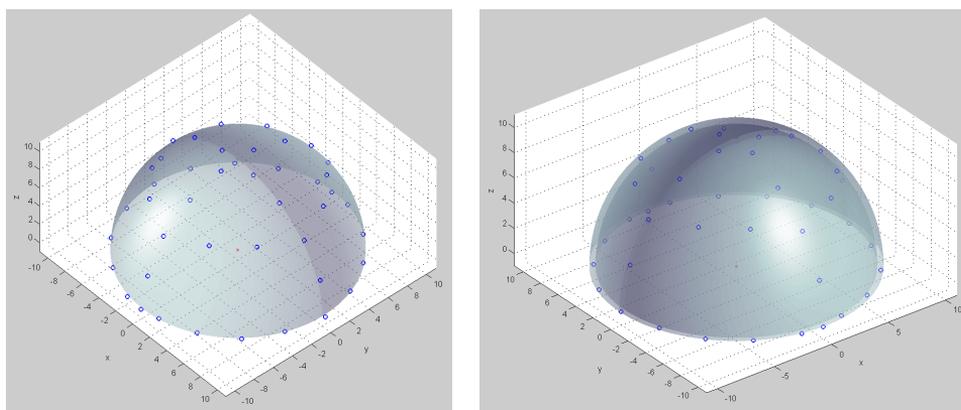


Рис. 3. Контроль сферичности

Предлагается простой и в то же время эффективный численный метод. Его сущность заключается в минимизации собственно ширины кольцевой зоны (см. рис. 1). Сначала профиль детали описывается в полярной системе (φ, r) с варьируемыми координатами (x_j, y_j) центра относительно исходного центра 0 . Затем находится отклонение от круглости Δ (ширина кольцевой зоны), которая минимизируется:

$$\Delta = \{r_{j \max} - r_{j \min}\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $r_{j \max}$, $r_{j \min}$ – максимальное и минимальное значения радиусов профиля детали на j -м шаге варьирования координат центра (x_j, y_j) .

Минимизация может быть выполнена одним из стандартных методов оптимизации, например хорошо зарекомендовавшим себя методом Ньютона–Рафсона [3], реализованным в программной среде MATLAB. Целевая функция от двух переменных (x_j, y_j) имеет только один локальный минимум, овражный эффект отсутствует, поэтому выбор начального приближения не столь важен (рис. 4).

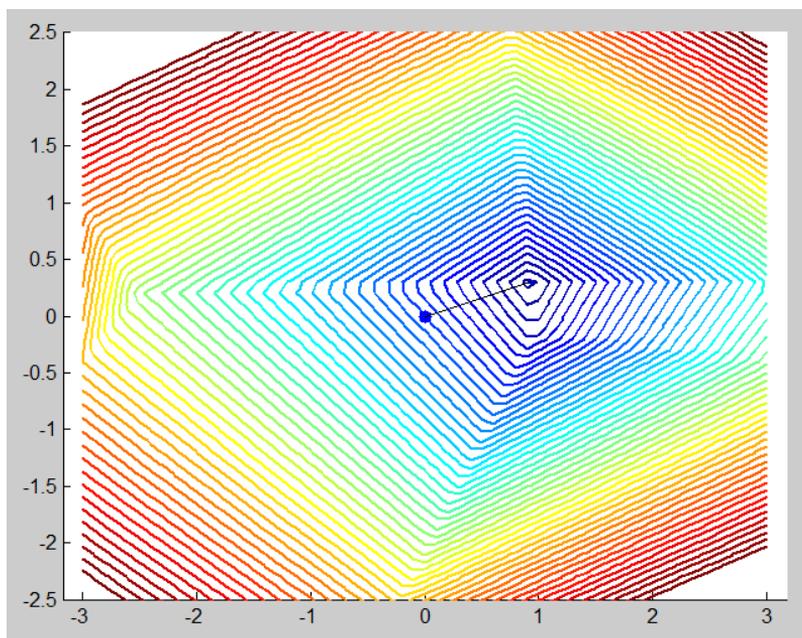


Рис. 4. Целевая функция при оптимизации

Профиль продольного сечения описывается полиномами первой степени (прямой):

$$y_1 = a_1 + b_1x, \quad (2)$$

второй степени (парабола):

$$y_2 = a_2 + b_2x + c_2x^2. \quad (3)$$

Расчет параметров a_1, b_1, a_2, b_2, c_2 выполняют на основе минимизации функций F_1, F_2 квадратичных невязок, согласно МНК имеющих вид

$$F_1 = \sum_i [a_1 + b_1x_i - y_i]^2, \quad F_2 = \sum_i [a_2 + b_2x_i + c_2x_i^2 - y_i]^2, \quad (4)$$

где x_i, y_i – координаты i -й измеренной точки профиля.

Количественная оценка параметров:
конусообразность

$$\Delta_1 = a_1 l,$$

где l – длина детали;

бочкообразность или седлообразность

$$\Delta_2 = \max \{y_2 - y_1\} \sin(\arctg a_1).$$

Для средней сферы (выявленного производного элемента), построенной по методу наименьших квадратов, параметры (координаты центра x_0, y_0, z_0 и радиус R) определяют на основе минимизации функционала Φ_1 вида

$$\Phi_1(x_0, y_0, z_0, R) = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - R \right)^2, \quad (5)$$

где x_i, y_i, z_i – декартовы координаты i -й измеренной точки поверхности; n – число измеренных точек.

Окружность минимальной зоны определяется итерационным методом. Для этого минимизируется целевая функция F :

$$F = \{r_{ij\max} - r_{ij\min}\} \rightarrow \min,$$

где $r_{ij\max}, r_{ij\min}$ – максимальное и минимальное значения радиусов r_{ij} профиля детали на j -м шаге варьирования координат центра (x_j, y_j) .

Определенное минимальное значение F представляет собой круглость.

При разработке программного продукта [6–8] предложены алгоритмы, представленные на рис. 5, 6. Алгоритм расчета круглости по окружности минимальной зоны (см. рис. 5) не зависит от метода получения координат точек детали (координатный, радиусный, разностный), применяемых приборов и допускает неравномерное расположение контролируемых точек. Время расчета составляет не более 0,2 с при числе точек на профиле 300–3000.

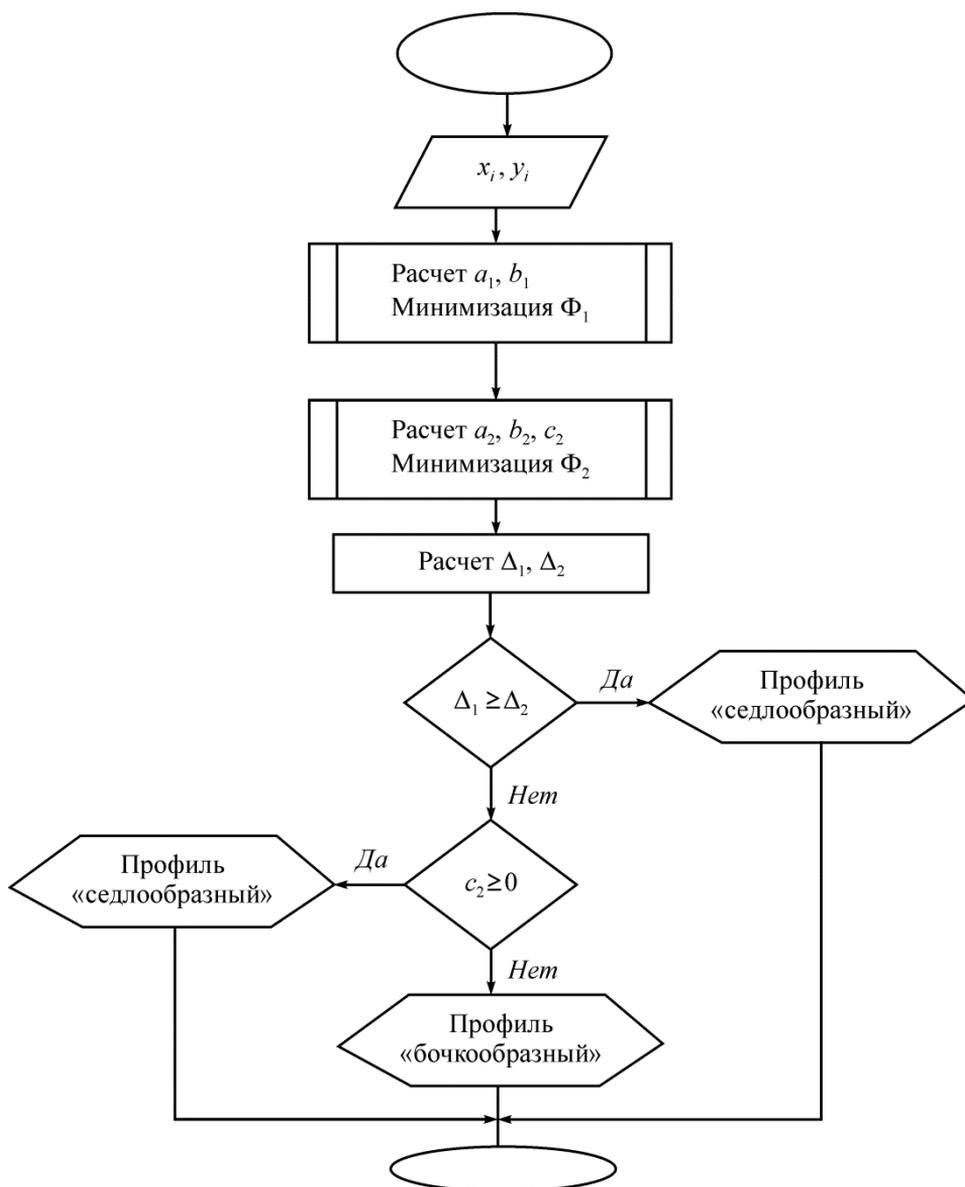


Рис. 6. Автоматизированная оценка отклонений профиля продольного сечения

Для решения задач, связанных с измерением деталей с технически сложными поверхностями, необходима разработка новых методов и методик измерений на современных измерительных приборах, способных обеспечивать всё возрастающие требования к точности получаемых в процессе обработки размеров.

Список литературы

1. Координатно-измерительные машины и комплексы / А.И. Пekarsh, С.И. Феоктистов, Д.Г. Колыхалов, В.И. Шпорт // CALS-технологии. – 2011. – № 3. – С. 36–48.
2. Сурков И.В., Мягкова М.В. Применение КИМ для контроля линейно-угловых параметров зубчатых колес // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 5. – С. 86–89.
3. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 430 с.
4. Сутягин А.Н., Безъязычный В.Ф. Интеграция специальных приложений и подпрограмм в САПР высшего уровня на этапе технологической подготовки производства ГТД // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2011. – № 2 (20). – С. 11–14.
5. Решетникова Е.П. Информационная технология измерения сложных поверхностей на мобильных КИМ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф.: в 2 ч. – Саратов, 2013. – Ч. 1. – С. 51–55.
6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014612744. Расчет отклонений от круглости деталей / П.Ю. Бочкарев, О.В. Захаров, В.В. Шалунов, Е.П. Решетникова. Оpubл. 6.03.2014.
7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014616527. Автоматизированная оценка отклонений профиля продольного сечения / П.Ю. Бочкарев, О.В. Захаров, В.В. Шалунов, Е.П. Решетникова. Оpubл. 20.07.2014.
8. Бочкарев П.Ю., Захаров О.В., Решетникова Е.П. Методика координатного измерения сферических поверхностей // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: сб. науч. тр. – Одесса, 2013. – Вып. 3, т. 9. – С. 28–31.

References

1. Pekarsh A.I., Feoktistov S.I., Kolykhalov D.G., Shport V.I. Koordinatno-izmeritel'nye mashiny i komplekсы [Coordinate measuring machines and system]. *Continuous Acquisition and Lifecycle Support-tekhnologii*, 2011, no. 3, pp. 36-48.
2. Surkov I.V., Miagkova M.V. Primenenie KIM dlia kontrolya lineino-uglovykh parametrov zubchatykh koles [Application of CMM to control linear and angular parameters of ribbed-th wheel]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 5, pp. 86-89.

3. Samarskii A.A., Gulin A.V. Chislennye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1989. 430 p.

4. Sutiagin A.N., Bez"iazychnyi V.F. Integratsiia spetsial'nykh prilozhenii i podprogramm v SAPR vysshego urovnia na etape tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva GTD [Integration of special applications and routines in the CAD-Sheha height level at the stage of technological preparation of production of GTE]. *Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.A. Solov'eva*, 2011, no. 2 (20), pp. 11-14.

5. Reshetnikova E.P. Informatsionnaia tekhnologiia izmereniia slozhnykh poverkhnostei namobil'nykh KIM [Information technology is the measurement of complex surfaces on mobile CMM]. *Sbornik trudov XXVI mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh – ММТТ-26"*. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013. Part 1, pp. 51-55.

6. Bochkarev P.Iu., Zakharov O.V., Shalunov V.V., Reshetnikova E.P. Raschet otklonenii ot kruglosti detalei [Calculation of deviations from roundness details]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2014612744*. 6.03.2014.

7. Bochkarev P.Iu., Zakharov O.V., Shalunov V.V., Reshetnikova E.P. Avtomatizirovannaia otsenka otklonenii profil'no prodol'nogo secheniia [Automated assessment of roughness of longitudinal cross section]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2014616527*. 20.07.2014.

8. Bochkarev P.Iu., Zakharov O.V., Reshetnikova E.P. Metodika koordinatnogo izmereniia sfericheskikh poverkhnostei [Method of coordinate measuring spherical surfaces]. *Sbornik nauchnykh trudov "Nauchnye issledovaniia i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoianie i puti razvitiia"*. Odessa, 2013, vol. 3, pp. 28-31.

Получено 29.06.2015

Об авторах

Решетникова Евгения Павловна (Саратов, Россия) – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; e-mail: purpose22@mail.ru.

Бочкарев Петр Юрьевич (Саратов, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; e-mail: ptk@sstu.ru.

Захаров Олег Владимирович (Саратов, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; e-mail: zov20@mail.ru.

About the authors

Evgeniia P. Reshetnikova (Saratov, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department “Design of Technical and Technological Complexes”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: purpose22@mail.ru.

Petr Iu. Bochkarev (Saratov, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department “Design of Technical and Technological Complexes”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: ptk@sstu.ru.

Oleg V. Zakharov (Saratov, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Design of Technical and Technological Complexes”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: zov20@mail.ru.