

DOI: 10.18721/JEST.25210
УДК 621.9.022:519.21

В.А. Ильиных

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Россия

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ

Представлены результаты исследования точности геометрической формы хвостовиков вспомогательного инструмента (оправок) многоцелевых станков при технологии изготовления с однокоординатным перемещением режущего инструмента. На основе данных измерений оправок построены реализации отклонений от правильной геометрической формы профильной кривой с равноосным контуром и в рамках теории случайных стационарных процессов определены отклонения от правильной геометрической формы посадочной поверхности инструментальных оправок при действии случайных и систематических факторов. Установлено, что наиболее рациональным способом изготовления оправок с профильной кривой поперечного сечения с равноосным контуром при требуемой точности геометрической формы, является обработка шлифованием прямым плоским кругом в сравнении с чашечным кругом. На основании полученных результатов составлена математическая модель геометрической формы деталей профильного соединения с равноосным контуром.

Ключевые слова: инструментальная оправка, погрешность геометрической формы, профильные соединения, математическая модель, многоцелевые станки.

Ссылка при цитировании:

В.А. Ильиных. Статистический анализ геометрии профильных деталей шпиндельного узла многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 132–140. DOI: 10.18721/JEST.25210.

V.A. Ilyinykh

Zabaikalsky railway transport institute, Chita, Russia

STATISTICAL ANALYSIS OF GEOMETRY OF PROFILE PARTS OF SPINDLE UNIT OF MULTI-TASK MACHINES

The paper presents the results of study on the accuracy of the geometric shape of shanks (mandrels) of the auxiliary tool in multi-purpose machines using the manufacturing technology with single-axis movement of the cutting tool. Based on the data of mandrel measurements, we constructed the implementations of deviations from the correct geometric shape of the profile curve with an equiaxial contour and found the deviations from the correct geometric shape of the landing surface of the tool mandrels under the action of random and systematic factors within the framework of theory of random stationary processes. It is established that the most rational method of manufacturing mandrels with a profile cross-section curve with an equiaxial contour with the required accuracy of the geometric shape is processing of grinding with a straight flat circle in comparison with the Cup circle. Based on the obtained results, we developed a mathematical model for the geometric shape of the profile connection parts with an equiaxial contour.

Keywords: instrumental mandrel, accuracy of geometric shape, profile joints, mathematical model, multi-purpose machines.

Citation:

V.A. Ilyinykh, Statistical analysis of geometry of profile parts of spindle unit of multi-task machines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 132–140, DOI: 10.18721/JEST.25210.



Введение. В настоящее время продолжают работы по дальнейшему развитию многоцелевых станков с ЧПУ. Совершенствование известных конструкций и проектирование новых конструкций станков, обладающих высокой производительностью, надежностью, точностью требует качественной подготовки процесса конструирования ответственных узлов станка, а также их интеграции в конструкцию многоцелевого станка.

Научно-практический интерес представляет разработка конструкций быстропереключаемых, моментопередающих соединений технологических комплектов (ТК), реализованных на базе профильных соединений с равноосным контуром (РК-3), обладающих лучшими показателями, такими как: прочность, износостойкость, жесткость, точность в сравнении с традиционными соединениями. В отечественном и зарубежном машиностроении известны отдельные случаи применения разъемных профильных соединений деталей машин, например: известные фирмы «Pittler», «Bamessberger» (Германия) применяют соединения типа РК-3, Кс-4 в механизмах коробок скоростей, гитарах полуавтоматов, механизмах поворотов столов. Фирма «Heinlein» и «Fette» применяет профильные соединения типа РК-3 в инструментальных системах. В России РК-3 профильные соединения получили применение в коробках скоростей и шпиндельном узле горизонтально-фрезерного полуавтомата с ЧПУ модели ДФ-1000. Широкое внедрение данных соединений, в частности в металлорежущие станки ранее сдерживалась технологией их изготовления. В настоящее время данная задача практически решена, но при этом остается ряд нерешенных вопросов связанных с изготовлением профильных деталей типа вал-втулка технологических комплектов многоцелевых станков работающих в условиях многоразовых сборок. Обеспечение высокой точности изготовления деталей соединения технологических комплектов, их геометрической формы посадочных поверхностей за-

висит от технологии и представляет актуальную научную задачу.

Для изготовления профильных поверхностей деталей моментопередающего соединения типа вал – втулка с равноосным контуром, используют различные способы формообразования поверхностей [1–6]. Наиболее известным является однокоординатный способ перемещения режущего инструмента, разработанный в работе [2]. При невысокой производительности процесса изготовления профильных поверхностей деталей на станках оснащенных механизмами-построителями движений, способ позволяет обеспечить 6–9 качество точности диаметральных размеров профильных валов и 7–10 качество точности профильных отверстий во втулках от 13 до 100 мм, в то время как известные способы высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ обеспечивают 7 качество точности для диаметральных размеров профильных конусов валов не более 28–32 мм [3]. Технологический способ обработки профильными дисковыми фрезами с конструктивным исполнением радиальной подачи позволяет достичь 10 качество точности для диапазона диаметральных размеров профильных валов от 13 до 500 мм [1]. Прогнозирование точности изготовления профильных посадочных поверхностей деталей соединений, шпиндельных узлов станков, является важной задачей при оценке точности и жесткости последнего [7–9, 10–14].

Цель исследования – разработка математических моделей геометрической формы профильных деталей шпиндельного узла на основе статистического анализа геометрической формы профильных посадочных поверхностей инструментальных оправок для различных технологий изготовления.

Методы исследования

Разработка математических моделей геометрической формы деталей технологических комплектов МС велась на основе применения

вероятностных методов теории случайных стационарных процессов и теории малой выборки [15, 16]. Обработка результатов исследования проведена с применением метода математической статистики, прикладной и вычислительной математики. Математические модели геометрической формы построены на основе проведенного корреляционного и спектрального анализа, измерений погрешности формы профильных деталей соединений для различных технологий изготовления [2, 10]. Определение погрешности геометрической формы поперечных сечений оправок произведены на оптической делительной головке модели ОДГ-10 с использованием измерительной головки фирмы Carl Zeiss с ценой деления ± 1 мкм. Заданный угол поворота был принят 10° . Измерение угла уклона образующей профильной конической поверхности оправки относительно ее оси произведены на большом инструментальном микроскопе модели БМИ-1. Измерение угла уклона образующей проведены с поворотом оправки через 10° . Для измерения использовался объектив с увеличением 10^{\times} , обеспечивающий обзор образующей на длине более 30 мм. Измерения проведены теневым методом (без верхней подсветки). Получены результаты измерений погрешности геометрической формы профильных посадочных поверхностей инструментальных оправок, для разных технологий. Рассмотрены технологии изготовления профильных поверхностей, а именно: точение безвершинным резцом, шлифование прямым плоским кругом, шлифование чашечным кругом деталей соединения типа вал-втулка с равноосным контуром. При проведении замеров были получены числовые значения текущих размеров оправок. Было установлено, что предельные значения погрешности геометрической формы оправок для технологии при чистовом точении безвершинным резцом находятся в интервале от +28 до +7 мкм, шлифовании чашечным кругом от -10 до -41 мкм и шлифовании прямым плос-

ким кругом от -2 до -22 мкм соответственно. Известно, что погрешность геометрической формы деталей зависит от действия систематических и случайных факторов в процессе ее изготовления.

Воспользуемся зависимостью для определения фактического радиус-вектора точек кривой с равноосным контуром вида [15]:

$$\bar{\rho}_\phi(\phi, n) = \bar{\rho}_n(\phi, n) + \bar{m}_{\Delta\rho}(\phi, n) + \bar{\lambda}_{\Delta\rho}(\phi, n), \quad (1)$$

где $\bar{\rho}_n(\phi, n)$ – номинальный (теоретический) радиус-вектор точки профильной кривой оправки в рассматриваемом сечении; $\bar{m}_{\Delta\rho}(\phi, n)$ – теоретическое математическое ожидание отклонения радиус-вектора точки профильной кривой оправки в рассматриваемом сечении в результате действия систематических факторов; $\bar{\lambda}_{\Delta\rho}(\phi, n)$ – отклонение радиус-вектора точки профильной кривой оправки в рассматриваемом сечении в результате действия случайных факторов; ϕ – текущая угловая координата точки профильной кривой оправки поперечного сечения; n – рассматриваемое поперечное сечение оправки.

Как известно, при изучении периодических процессов, в частности процессов резания, целесообразно разлагать периодические функции, описывающие эти процессы в тригонометрические ряды. При анализе результатов измерений установлено, что изменение погрешности формы поперечных сечений оправок за период (один оборот детали) имеет вид основных тригонометрических функций и их значения являются случайными величинами, которые можно аналитически описать рядами Фурье. Случайная функция определена, если известны ее математическое ожидание, корреляционные моменты и нормированные корреляционные функции [15, 16]. Разложение реализаций (результатов опытов измерений) изменения погрешности геометрической формы поперечных сечений деталей соединения, в ряды Фурье, позволило аналитически

определить теоретические математические ожидания, нормированные корреляционные функции случайных функций отклонений радиус-векторов точек профильной кривой, а также построить распределение дисперсии отклонений геометрической формы профильной кривой по гармоникам. Анализ результатов имитационного моделирования формы оправок ТК позволил установить, что наиболее точным является способ формирования поверхности с равноосным контуром шлифованием прямым плоским кругом, как наиболее близкое к теоретической кривой.

Для воспроизведения профиля поперечного сечения оправки необходимо аналитическое выражение для математического ожидания как функции от круговой координаты.

Учитывая периодичность действия различных факторов технологического процесса, наиболее рациональным будет представление теоретического математического ожидания в виде тригонометрических рядов Фурье [15, 16] вида:

$$\bar{m}_{\Delta p}(\varphi) = a_0 + \sum_{k=1}^m [a_k \cdot \cos(k\varphi) + b_k \cdot \sin(k\varphi)], \quad (2)$$

где a_0, b_k, a_k ($k = 1, \dots, m$) – коэффициенты тригонометрического ряда.

При определении коэффициентов используются известные формулы [16]:

$$a_0 = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_i), \quad (3)$$

$$a_k = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_i) \cdot \cos(k\varphi_i), \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_i) \cdot \sin(k\varphi_i), \quad (5)$$

где $m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_i)$ – экспериментальное математическое ожидание случайной функции отклонения радиус-векторов точек «реальной» кривой профиля оправки; φ_i – значение круговой коорди-

наты точек профиля оправки; $p = (1, \dots, 18)$ – число сечений случайной функции.

Ограничимся шестью гармониками, не считая нулевой, т. е. $k = 6$. Результаты расчетов коэффициентов тригонометрического ряда Фурье представлены в таблице 1 [10]. На основании этих данных построены графические зависимости теоретических математических ожиданий случайной функции для технологий изготовления профильных деталей (оправок) шпиндельного узла. Как показал сравнительный анализ, числовые значения математических ожиданий полученных, теоретическим путем дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [10, 11].

Значения корреляционных моментов случайной функции для различных способов обработки деталей (оправок) определяются по найденным экспериментальным путем величинам, отклонений радиус-векторов Δp_i точек кривой профиля оправок. Для определения корреляционных моментов случайной функции воспользуемся формулой [15, 16]:

$$K_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_k, \varphi_l) = \sum_{i=1}^n [\Delta p_i(\varphi_k) - m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_k)] [\Delta p_i(\varphi_l) - m_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_l)] / (n-1), \quad (6)$$

где $\Delta p_i(\varphi_k)$ – значения случайных величин, отклонений радиус-векторов точек кривой профиля оправки в рассматриваемой точке; φ_k, φ_l – значения круговых координат точек кривой профиля оправки; n – число сечений (в рассматриваемом случае $n = 18$).

Значения нормированных корреляционных моментов случайной функции находятся соответственно с учетом формулы (6) по формуле:

$$k(\varphi_k, \varphi_l) = \frac{K_{\Delta p}^{\text{экс}}(\varphi_k, \varphi_l)}{D_{\varphi_k=\varphi_l}}, \quad (7)$$

где $k(\varphi_k, \varphi_l)$ – нормированный корреляционный момент случайной функции; $D_{\varphi_k=\varphi_l}$ – постоянная дисперсия случайной функции случайного стационарного процесса.

Таблица 1

Числовые значения коэффициентов ряда Фурье для разных технологий изготовления

The numerical values of the coefficients of the Fourier series for different production technologies

Число гармоник	Чистовое точение безвершинным резцом		Шлифование чашечным кругом		Шлифование прямым плоским кругом	
	a_k	b_k	a_k	b_k	a_k	b_k
0	0.011030	0.000000	0.034840	0.000000	-0.927440	0.000000
1	-0.005370	0.003770	-0.000070	-0.001191	-0.002400	-0.009380
2	0.003720	0.007090	0.000100	-0.022390	0.003660	-0.017640
3	-0.008560	0.009550	-0.000091	-0.030170	0.006670	-0.023760
4	0.001920	0.010860	-0.000150	-0.034310	0.003600	-0.027020
5	-0.001240	0.010860	0.000470	-0.034310	-0.002560	-0.027020
6	0.005960	0.009550	0.001220	-0.030170	-0.006110	-0.023760

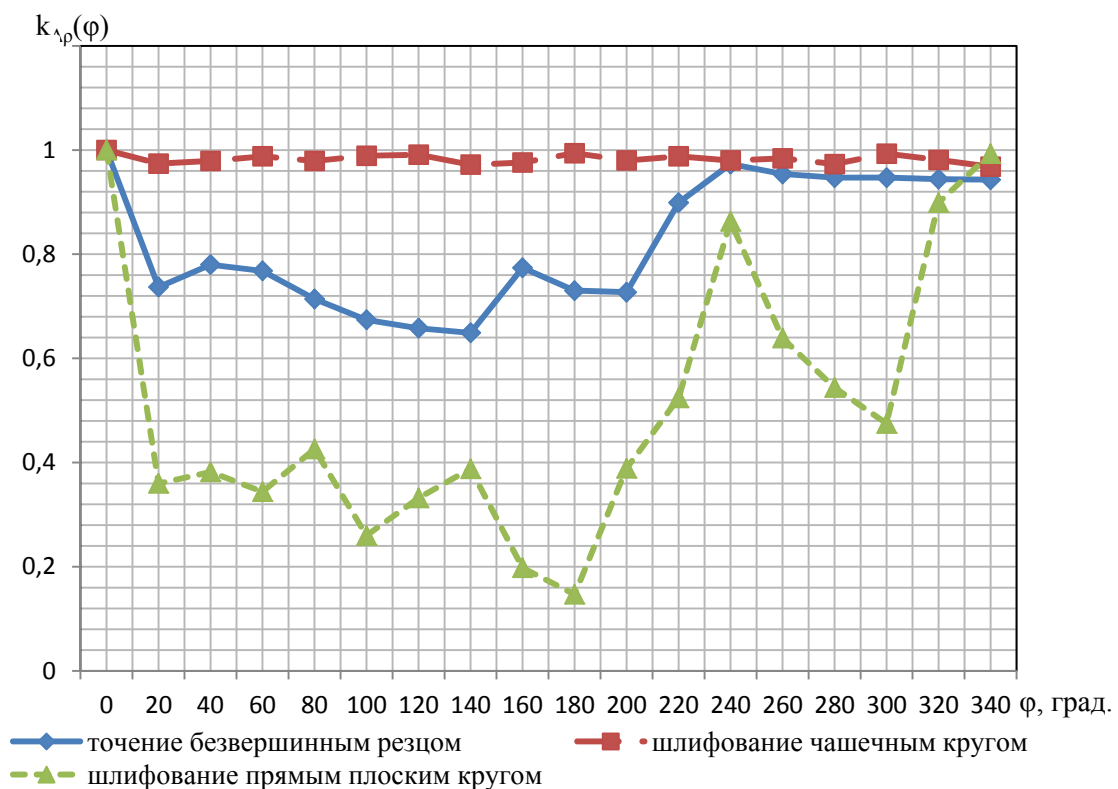


Рис. 1. Нормированная корреляционная функция случайной функции

Fig. 1. Normalized correlation function of a random function

По найденным значениям нормированных корреляционных моментов случайной функции, определяются величины нормированной корреляционной функции случайной функции. Последние представлены для соот-

ветствующих способов изготовления оправок на диаграмме (рис. 1).

Нормированная корреляционная функция случайной функции, полученная для различных способов шлифования, аппроксими-

мируется тригонометрическим рядом Фурье [15, 16] вида:

$$k_{\Delta p}^{\text{теор}}(\varphi) = \sum_{k=0}^6 D_k \cos \omega_k \varphi, \quad (8)$$

где $\omega_k = k \frac{2\pi}{T}$, а коэффициенты D_0, D_k определяются формулами:

$$D_0 = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p k_{\Delta p}(\varphi_i), \quad (9)$$

$$D_k = \frac{2}{p} \sum_{i=1}^p k_{\Delta p}(\varphi_i) \cdot \cos(k \cdot \varphi_i), \quad (10)$$

где $k_{\Delta p}(\varphi_i)$ – нормированная корреляционная функция случайной функции; φ – круговая координата точек кривой профиля; p – количество рассматриваемых сечений, случайной функции ($p = 36$);

Ограничимся шестью гармониками, не считая нулевой, т. е. $k = 6$. Величины коэффициентов ряда есть дисперсия случайной функции [15]. Числовые значения коэффициентов ряда Фурье для различных технологий изготовления оправок приведены на диаграмме (рис. 2).

Далее определяются среднеквадратические отклонения случайной функции отклонений радиус-векторов оправки по формуле [15]:

$$\sigma = \sqrt{D(\Delta p)}, \quad (11)$$

где $D(\Delta p)$ – значение дисперсии преобладающей гармоники; σ – среднеквадратические отклонения случайной функции отклонения радиус-вектора оправки от правильной геометрической формы; $\Delta p(\varphi)$ – случайная функция отклонения радиус-вектора кривой профиля с равноосным контуром в рассматриваемой точке.

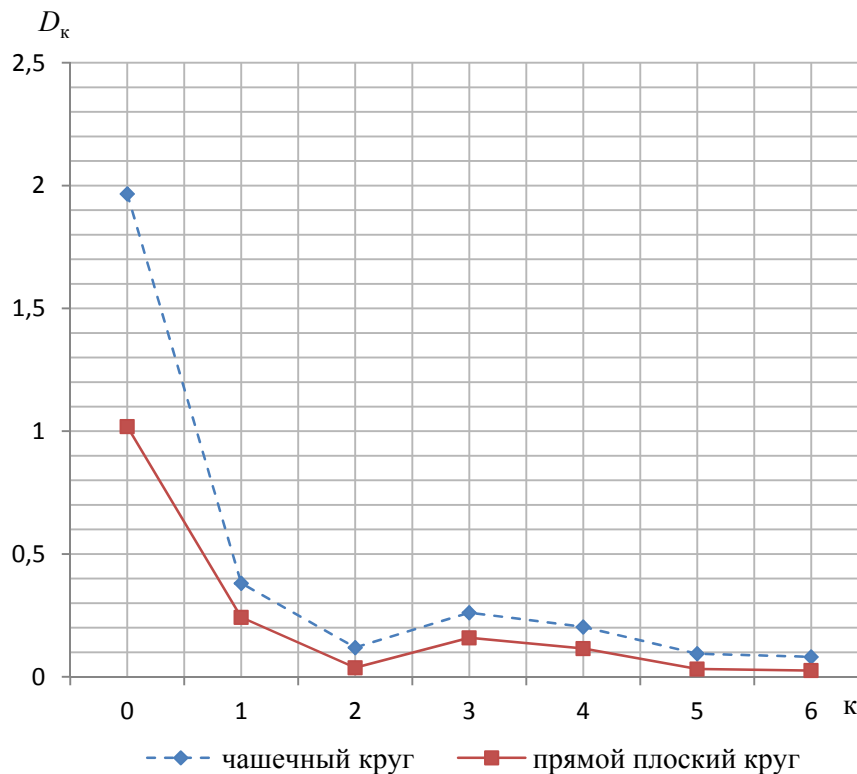


Рис. 2. Распределение дисперсий по гармоникам
Fig. 2. Distribution of variances by harmonics

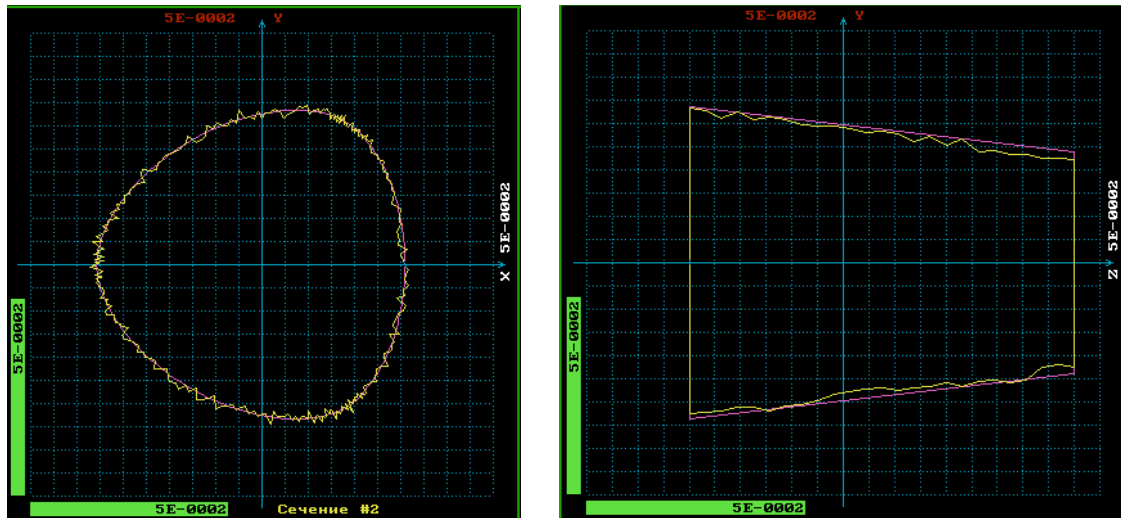


Рис. 3. Модель «реальной» геометрической формы конической оправки конусностью 7:24 при шлифовании прямым плоским кругом (для визуализации, погрешность геометрической формы оправки x100)

Fig. 3. Model of the «real» geometric shape of the conical mandrel taper 7: 24 when grinding straight flat circle (for visualization, the error of the geometric shape of the mandrel x 100)

Примем наиболее часто встречающийся на практике нормальный закон распределения случайных величин [15]. Для нормально распределенной случайной функции все рассеивание укладывается на участке $m \pm 3\sigma$.

Таким образом, зная аналитическое выражение теоретического математического ожидания $\bar{m}_{\Delta\rho}(\varphi)$ отклонений радиус-векторов точек «реальной» кривой профиля оправки и среднеквадратическое отклонение преобладающей гармоники σ для разных технологий изготовления можно определить ориентировочно интервал возможных значений, отклонений геометрической формы профиля оправки.

С целью получения реализаций геометрической формы кривой профиля оправки, воспользуемся зависимостью приведенной в работе [10] вида:

$$\bar{r}_{\varphi}(\varphi) = \bar{r}_n(\varphi) + a_0 + \sum_{k=1}^m [a_k \cdot \cos(k\varphi) + b_k \cdot \sin(k\varphi)] + \sqrt{D(\Delta\rho)} \cdot GENR, \quad (12)$$

где $GENR$ – функция, позволяющая учесть отклонение геометрической формы конической оправки от действия случайных факторов и определяющая закон распределения случайных чисел.

В результате обхода по контуру профиля оправки аппроксимированного через 1,2 градусов в поперечном сечении и через 3,5 мм в продольном сечении получим последовательность случайных величин фактических радиус-векторов точек «реальной» кривой профиля оправки или модель «реальной» геометрической формы оправки размером $M \cdot N = 300 \cdot 25 = 7500$ точек поверхности (рис. 3).

Полученные аналитические выражения, позволяют определять интервалы значений отклонений радиус-векторов точек кривой с равноосным контуром профиля оправки для разных технологий изготовления, что очень важно при прогнозировании их точности в соединениях прецизионных узлов многоцелевых станков, на стадии их проектирования.

Выводы

1. На основании статистического анализа определена математическая модель геометрической формы посадочных профильных поверхностей деталей соединения шпиндель-инструментальная оправка размером $M \cdot N = 300 \cdot 25 = 7500$ точек поверхности, которая позволяет адекватно описывать погрешность геометрической формы в пределах заданного ква-



литета точности. Например, для технологии изготовления оправок прямым плоским кругом для диаметральных размеров от 30 до 50 мм погрешность геометрической формы модели оправки находится в пределах допуска и соответствует 6 качеству точности, что позволяет на стадии проектирования прогнозировать технологическую точность деталей соединения шпиндельного узла многоцелевых станков.

2. Установлено, что способ шлифования профильных поверхностей оправок прямым

плоским кругом, при однокоординатном способе перемещения режущего инструмента, наиболее точный, так как «реальная» кривая профиля наиболее близка к номинальной. Погрешность геометрической формы находится в пределах от -2 до -22 мкм. При применении способа шлифования чашечным кругом погрешность геометрической формы находится в пределах от -10 до -41 мкм, а при чистовом точении безвершинным резцом в пределах от $+28$ до $+7$ мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Максименко Ю.А., Куц В.В. Методика расчета геометрических параметров остаточных слоев фрезой дисковой с переменным радиусом при обработке РК-профильных валов // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. 2013. № 3-2 (299). С. 55–60.
- [2] Тимченко А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений: обзор. М.: ВНИИТЭМР, 1988. 160 с.
- [3] Зенин Н.В., Камсюк М.С. Технологические методы формообразования поверхностей бесшпоночных соединений // *Сборка в машиностроении и приборостроении*. 2005. № 9. С. 35–40.
- [4] Frank A., Mayr R. Unrundschleifen – Bilanz einer erfolgreichen Forschungsarbeit. Von der Soll-Kontur zum Werkstück // *Technik-Report*. 1991. No. 5A. P. 46–48.
- [5] Frank A., Pflanzl M., Mayr R. Vom K-Profil und Polygonprofil zu fiinkti – onsoptimierten Unrundprofilen – eine österreichische Entwicklung. *Fertigung // Präzision im Spiegel*. 1992. No. 3. P. 42–48.
- [6] Frank A., Trantin H., Pflanzl M. Die «Polygon – Normen» DIN 32711 und DIN 32712 «Upgrading» oder Neunormung // *Welle – Nabe – Verbindungen: Gestaltung, Fertigung, Anwendungen*. Dusseldorf: VDI – Verlag, 2003, P. 77–89, (VDI – Berichte 1790).
- [7] Аверьянов О.И., Аверьянова И.О. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ: [моногр.]. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 164 с.
- [8] Линейцев, В.Ю., Ильиных В.А. Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2015. № 2 (46). С. 51–55.
- [9] Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. № 1 (53). С. 36–39.
- [10] Ильиных В.А., Косов М.Г. Статистическая оценка профилей некруглых валов с равноосным контуром на ЭВМ // *ВИНИТИ*. 1984. № 1. 31 с.
- [11] Ильиных В.А. Анализ результатов статистической оценки посадочных поверхностей вспомогательного инструмента многоцелевого станка ВЗ-20 // *Технология, экономика, педагогика : межвуз. сб. науч. тр.* Чита: ЗабГПУ, 1998. С. 43–46
- [12] Ильиных В.А., Пшеничникова Н.А. Статистическая оценка погрешности формы конических валов (на примере оправки NSK 30-27) // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона: матер. восьмой Междунар. науч.-практ. конф.*, 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск. В 2 т. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2017, С. 431–435.
- [13] Пшеничникова Н.А., Ильиных В.А., Линейцев В.Ю. Корреляционно – спектральный анализ погрешности формы деталей профильных соединений // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. Т. 58, № 2. С. 40–45. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45
- [14] Ильиных В.А. Влияние конических профильных соединений на точность и жесткость технологических комплектов многоцелевых станков // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24, № 4. С. 150–159. DOI: 10.18721 / YEST.24415.
- [15] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Государственное издательство физико-математической литературы. М., 1962.
- [16] Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1966. 664 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИЛЬИНЫХ Виктор Анатольевич – кандидат технических наук доцент Забайкальского института железнодорожного транспорта
E-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 23.02.2019

REFERENCES

- [1] **Y.A. Maksimenko, V.V. Kuts**, Method of calculation of geometrical parameters of the residual layers with a cutter disk with a variable radius during the processing RK-shaped shaft, *Fundamental problems of technics and technology*, 3-2 (299) (2013) 55–60.
- [2] **A.I. Timchenko**, *Technology of manufacture of parts specialized double flat drive connections: a Review*. Moscow: VNIITEMR, 1988.
- [3] **N.I. Zenin, M.S. Kamuk**, Technological methods of forming double flat drive surfaces of the joints, *Assembly in mechanical engineering and instrument making*, 9 (2005) 35–40.
- [4] **A. Frank, R. Mayr**, Unrundscheifen – Bilanz einer erfolgreichen Forschungsarbeit. Von der Soll-Kontur zum Werkstück, *Technik-Report*, 5A (1991) 46–48.
- [5] **A. Frank, M. Pflanzl, R. Mayr**, Vom K-Profil und Polygonprofil zu fiinkti – onsoptimierten Unrundprofilen – eine österreichische Entwicklung. *Fertigung, Präzision im Spiegel*, 3 (1992) 42–48.
- [6] **A. Frank, H. Trantin, M. Pflanzl**, Die «Polygon – Normen» DIN 32711 und DIN 32712 «Upgrading» oder Neunormung, *Welle – Nabe – Verbindungen: Gestaltung, Fertigung, Anwendungen*. Dusseldorf: VDI – Verlag, (2003) 77–89.
- [7] **O.I. Averyanov, I.O. Averyanova**, *Modular principle of construction of multi-purpose CNC machines: monograph*. Stary Oskol: TNT, 2018.
- [8] **V.Y. Lineitem, V.A. Ilinykh** Simulation of parts of the conical connection on the basis of PC-3 profile curves, *Modern technologies. System analysis. Modeling. The scientific journal*, 2 (46) (2015) 51–55.
- [9] **V.Y. Lineitem, V.A. Ilinykh, V.E. Arrow**, Research of the bevel RK-3 profile of compounds on the accuracy and rigidity, *The Modern technologies. System analysis. Modeling*, 1 (53) (2017) 36–39.
- [10] **V.A. Ilyinykh, M.G. Kosov**, Statistical evaluation of profiles of non-circular shafts with equiaxial contour on a computer, *VINITI*, 1 (1984).
- [11] **V.A. Ilyinykh**, Analysis of the results of statistical evaluation of the landing surfaces of the auxiliary tool of the multi-purpose machine BZ-20, *Interuniversity collection of scientific works «Technology, Economics, pedagogy»*. Chita: Zabgpu, (1998) 43–46.
- [12] **V.A. Ilyinykh, N.A. Pshenichnikova**, Statistical evaluation of the error shape tapered shaft (for example, the mandrel 30–27 NSK), *Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of eighth international scientific-practical conference*, 28 March – 01 April 2017. Irkutsk. In 2 vol. Vol. 1. Irkutsk: Irkutsk state University of communications, (2017) 431–435.
- [13] **N.A. Pshenichnikova, V.A. Ilyinykh, V.Y. Lineitem**, Correlation and spectral analysis of the error of the shape of the parts profile compounds, *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 58 (2) (2018) 40–45. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45
- [14] **V.A. Ilyinykh**, The influence of the conical profile of the compounds on the accuracy and stiffness breadboards multi-task machines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24 (4) (2018) 150–159. DOI: 10.18721 / YES.24415.
- [15] **E.S. Ventzel**, *Probability Theory*. State publishing house of physical and mathematical literature. Moscow, 1962.
- [16] **B.P. Demidovich, I.A. Maron**, *Foundations of computational mathematics*. Moscow: Publishing House «Science», 1966.

THE AUTHORS

ILYINYKH Viktor A. – *Zabaikalsky railway transport institute*
E-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Received: 23.02.2019