

УДК 621.91.01

DOI 10.18698/0536-1044-2016-8-11-18

Расчет следа обработки с учетом погрешностей станка с ЧПУ и инструмента*

В.М. Утенков¹, Е.Г. Полканов², А.В. Чиркин¹, П.А. Быков¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Холдинг АО «СТАНКОПРОМ», 129110, Москва, Российская Федерация, ул. Гиляровского, д. 65, стр. 1

The Calculation of Tool Marks Taking into Account Errors of CNC Machines and Tools

V.M. Utenkov¹, E.G. Polkanov², A.V. Chirkin¹, P.A. Bykov¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Holding company AO Stankoprom, 129110, Moscow, Russian Federation, Gilyarovskiy St., Bldg. 65, Block 1



e-mail: utencov@bmstu.ru, alexchick07@gmail.com, pavel-bykov@yandex.ru



Предложены алгоритмы аналитического расчета поверхностей, получаемых на станках различных типов. Разработанные методы моделирования следа обработки позволяют учитывать геометрические погрешности станка и инструмента. Рассмотрены особенности моделирования следа лезвийной и абразивной обработки. Представлены зависимости, которые могут стать основой статических и динамических расчетов системы станок–приспособление–инструмент–деталь. Приведены выражения для расчета радиусов-векторов режущих кромок различных видов инструмента, алгоритм для вычленения самопересечений при фрезерной обработке, алгоритмы нахождения поверхностей, являющихся следами лезвийной и абразивной обработки. Полученные выражения применимы для станков с последовательной кинематикой и неприменимы для станков с параллельной кинематикой. Их можно использовать для определения баланса точности станка, выявления факторов, влияющих на точность, введения коррекции в станке с ЧПУ, структурного анализа и синтеза металлорежущих станков. Для расчета использован математический аппарат, заимствованный из расчета кинематики многоосевых манипуляторов, в котором положения органов и их перемещения описываются в пространстве однородных координат.

Ключевые слова: след обработки, погрешность станка с ЧПУ, станок с ЧПУ, точность станка с ЧПУ, точность обработки, лезвийная обработка, абразивная обработка.



Algorithms for analytic calculations of the surfaces machined by various machine-tools are described in this article. Using the proposed tool mark modeling methods, it is possible to take into account geometrical accuracy of the machine and the tools. The authors consider specific features of modeling tool marks that occur in cutting and abrasive machining, and propose the equations that can constitute the basis for static and dynamic calculations of the machine-attachment-tool-workpiece system. The expressions for calculating radius vectors of cutting edges of various tools, an algorithm for isolating self-intersections when milling, and algorithms for identifying surfaces that show cutting and abrasive tool marks are presented in the article. The expressions obtained are applicable to machines with serial kinematics, and are not applicable to machine with parallel kinematics. They can be used to determine the balance of the machine accuracy,

* Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0128 (ID RFMEFI57714X0128).

identify the factors affecting the accuracy, introduce correction in CNC machines, and perform structural analysis and synthesis of metal-cutting machines. The calculation is based on mathematical tools borrowed from the calculation of kinematics of multi-axis manipulators, where the position and movement of bodies are described by homogeneous coordinates.

Keywords: tool mark, CNC-machine error, CNC-machine, CNC-machine accuracy, machining precision, cutting, abrasive machining.

В промышленности существует тенденция все большего увеличения точности изделий [1], значительно зависящей от точности станков для чистовой и финишной обработки. Вследствие этого математический расчет погрешностей станка приобретает актуальность [2]. Современные ультрапрецизионные металлорежущие станки имеют точность позиционирования до 0,02 мкм при рабочей зоне до 200 мм (UPM Fraunhofer) [3, 4]. Однако они очень сложны в изготовлении и требуют особых условий эксплуатации. Вследствие этого наблюдается тенденция повышения точности обычных станков — «рабочих лошадок» современных заводов. Для достижения этой цели можно использовать коррекцию погрешностей в системах ЧПУ. При этом для введения коррекции необходимо рассчитать ее значения. Существующие методы расчета погрешностей [5, 6] основаны на нахождении огибающей поверхности для всех положений инструмента. Такой расчет с достаточной точностью учитывает погрешности станка, однако не учитывает взаимное влияние погрешностей станка и следа инструмента как совокупности всех его положений в процессе работы. След инструмента, получаемый как множество положений всех его режущих точек, является фактической обработанной поверхностью, по характеристикам которой можно судить о погрешности станка [7].

Цель работы — описание (как части общего метода расчета) алгоритма нахождения уравнений поверхностей, получаемых точением, фрезерованием различными видами фрез и обработкой абразивным инструментом. В нем, в отличие от существующих методов расчета [5, 6, 8], задачу построения обработанной поверхности решают путем нахождения самопересечений траекторий точек инструмента, «отбрасывания» лишних участков введением новой функции времени для каждой точки инструмента и «склеивания» получившихся участков. Метод позволяет более точно рассчитывать характеристики обработанных на станке поверхностей.

Станок с последовательной кинематикой можно рассматривать как комплекс из m независимых модулей, соединенных друг с другом [9]. Для расчета следа обработки их удобно расположить в порядке следования от заготовки к инструменту. Геометрию каждого модуля можно определить в его системе координат. При этом каждый модуль определяет положение и ориентацию системы координат следующего модуля [5].

Для задания геометрии станка будем использовать радиусы-векторы в однородной системе координат, т. е. вида $(x, y, z, 1)$, что позволит записать все преобразования в матричной форме.

Каждому модулю можно поставить в соответствие матрицу M_{Ci} , где $i = 1, \dots, m$ — номер модуля, причем модулем 1 является приспособление, в котором закреплена заготовка, а модулем n — приспособление, в котором закреплен инструмент. Матрица имеет вид

$$M_{Ci} = \begin{pmatrix} \xi_{ix} & \eta_{ix} & \zeta_{ix} & O_{ix} \\ \xi_{iy} & \eta_{iy} & \zeta_{iy} & O_{iy} \\ \xi_{iz} & \eta_{iz} & \zeta_{iz} & O_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где ξ_i, η_i, ζ_i — единичные векторы, образующие систему координат следующего модуля; O_i — начало этой системы координат.

Далее будем различать «подвижные» модули, которые участвуют в процессе формообразования (приводы подачи и главного движения) и «неподвижные» модули, которые не участвуют в этом процессе (станина, стол станка).

Неподвижные модули во время работы станка могут деформироваться сложным образом [10], однако на след обработки будут влиять только шесть параметров, которые определяют положение и ориентацию следующего модуля. При этом в общем случае каждый из шести параметров будет зависеть от времени и отражать как геометрические погрешности модуля, так и процессы, происходящие в нем. К этим параметрам можно отнести перемещения

u, v, w вдоль соответствующих осей координат x, y, z модуля и углы α, β, γ поворота вокруг этих же осей. Поскольку углы α, β, γ , обусловленные погрешностями модуля и процессами, происходящими в нем, малы, матрицу неподвижного модуля можно представить в виде

$$\mathbf{M}_i(t) = \mathbf{M}_{Di}(t)\mathbf{M}_{Ci} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_i(t) & \beta_i(t) & u_i(t) \\ \gamma_i(t) & 1 & -\alpha_i(t) & v_i(t) \\ -\beta_i(t) & \alpha_i(t) & 1 & w_i(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{M}_{Ci},$$

где t — время обработки, мин; $\mathbf{M}_{Di}(t)$ — матрица, содержащая параметры погрешности.

Параметры $u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$ должны учитывать не только погрешности и процессы, происходящие в самом неподвижном модуле, но и деформации контактного слоя между ним и следующим модулем.

Подвижные модули во время работы станка могут перемещать систему координат следующих за ними модулей в соответствии с управляющей программой. Матрица такого модуля имеет вид

$$\mathbf{M}_i(t) = \mathbf{M}_{Di}(t)\mathbf{M}_{Vi}(t)\mathbf{M}_{Ci}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}_{Vi}(t)$ — матрица, зависящая от типа подвижного модуля.

Для линейных координат матрица $\mathbf{M}_{Vi}(t)$ соответствует матрице параллельного переноса на расстояние st вдоль соответствующей оси (s — минутная подача), для круговых координат — матрице поворота на угол $s_\varphi t$ вокруг соответствующей оси (s_φ — минутная круговая подача), а для шпиндельного узла — матрице поворота вокруг оси z на угол $2\pi nt$ (n — частота вращения шпинделя).

Погрешности и деформации инструмента непосредственно влияют на обработанную поверхность и в общем случае не могут быть аппроксимированы шестью параметрами. Способ моделирования инструмента зависит от его типа.

Лезвийный инструмент моделируется радиусами-векторами $\mathbf{r}_e(p)$, описывающими геометрию режущих кромок, где p — свободный параметр [6, 11]. Если режущий инструмент (например, фреза) имеет z_c одинаковых (одинаково изношенных) режущих кромок, то для сокращения вычислений целесообразно модели-

ровать одну кромку, увеличивая частоту вращения шпинделя до $z_c n$. В качестве примера рассмотрим выражения для определения радиусов-векторов:

- главной режущей кромки расточного резца

$$\mathbf{r}_e(p) = \begin{pmatrix} -\cos \lambda \sin \varphi \\ \sin \lambda \\ -\cos \lambda \cos \varphi \\ 1 \end{pmatrix}, \quad p = 0 \dots L_e;$$

- режущей кромки зуба цилиндрической фрезы (рис. 1, а)

$$\mathbf{r}_e(p) = \begin{pmatrix} \frac{d}{2} \cos \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \\ \frac{d}{2} \sin \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \\ p \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2) \quad p = 0 \dots L_c;$$

- режущей кромки зуба конической фрезы (рис. 1, б)

$$\mathbf{r}_e(p) = \begin{pmatrix} \left(\frac{D-d}{2L_c} p + \frac{d}{2} \right) \cos \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \\ \left(\frac{D-d}{2L_c} p + \frac{d}{2} \right) \sin \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \\ p \\ 1 \end{pmatrix}, \quad p = 0 \dots L_c;$$

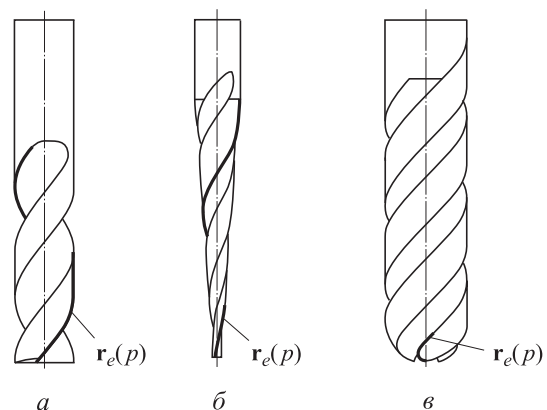


Рис. 1. Режущие кромки цилиндрической (а), конической (б) и сферической (в) фрез

• режущей кромки зуба сферической фрезы (рис. 1, в)

$$\mathbf{r}_e(p) = \begin{pmatrix} \sqrt{p(d-p)} \cos\left(2\pi \frac{p}{p_e}\right) \\ \sqrt{p(d-p)} \sin\left(2\pi \frac{p}{p_e}\right) \\ p \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$p = 0 \dots d/2,$$

где λ — угол подъема режущей кромки; φ — главный угол в плане; L_e — длина режущей кромки; d — диаметр цилиндрической, сферической фрез (диаметр конца конической фрезы); p_e — шаг винтовой линии; D — наибольший диаметр режущей части фрезы; L_c — длина режущей части. Выражение для определения радиуса-вектора вспомогательной режущей кромки расточного резца аналогично выражению для его главной режущей кромки.

Переводя радиус-вектор $\mathbf{r}_e(p)$ в систему координат заготовки, получим след режущей кромки инструмента в пространстве

$$\mathbf{r}_s(t, p) = \mathbf{M}_1(t)\mathbf{M}_2(t) \dots \mathbf{M}_m(t)\mathbf{r}_e(p) = \mathbf{M}(t)\mathbf{r}_e(p). \quad (3)$$

Обработанная поверхность состоит из участков этого следа. Для ее построения необходимо найти пересечение поверхности $\mathbf{r}_s(t, p)$ с самой собой и исключить из нее участки, где режущая кромка перемещается «в воздухе». В общем случае эта задача решается численно, однако для некоторых методов обработки ее можно решить аналитически [12, 13].

Рассмотрим процедуру удаления «лишних» участков следа при обработке плоскости боком однозубой цилиндрической фрезы. Предположим, что фреза диаметром d с шагом p_e вращается в шпинделе с частотой n и перемещается по координате y с подачей s_y . Поскольку подача перпендикулярна оси фрезы в каждой плоскости, перпендикулярной оси фрезы (оси z), удаление материала происходит одной и той же точкой режущей кромки.

Рассмотрим перемещение такой точки в плоскости $z = 0$. Точка на конце режущей кромки описывает траекторию, называемую трохойдой. Ее уравнение имеет вид

$$x(t) = r_s(t, 0)_x = \frac{d}{2} \cos(2\pi n t);$$

$$y(t) = r_s(t, 0)_y = \frac{d}{2} \sin(2\pi n t) + s_y t.$$

Нахождение самопересечений трохойды затруднительно [14], однако с учетом того что при фрезерной обработке подача на зуб $s_z = s/n$ на порядок меньше диаметра фрезы, траекторию перемещения точки режущей кромки можно аппроксимировать рядом окружностей, отстоящих друг от друга на расстояние s_z . Ордината точки пересечения составит $s_z/2$. Обозначим: θ — угол, который зуб фрезы проходит, срезая материал с заготовки. Тогда

$$\theta \approx 2 \sin \frac{\theta}{2} = 2 \frac{s_z}{d}.$$

Время работы зуба в заготовке

$$t_m = \frac{\theta}{2\pi n} = \frac{s_z}{\pi n}.$$

Для удаления лишних участков следа обработки перейдем к шкале времени $\tau(t)$, пропускающей ненужные участки:

$$\tau(t, t_0) = t + \frac{t - 0,5t_m + t_0}{t_m} \left(\frac{1}{n} - t_m \right), \quad (4)$$

где $t_0 = p/(p_e n)$ — поправка, учитывающая поворот точки на режущей кромке фрезы при перемещении вдоль ее оси. Поверхность после обработки можно определить по формуле

$$\mathbf{r}(t, p) = \mathbf{r}_s \left(\tau \left(t, \frac{p}{p_e n} \right), p \right).$$

Таким образом, алгоритм построения следа обработки на станках с последовательной кинематикой лезвийным инструментом включает в себя следующие шаги:

- разделение станка на отдельные модули с определением геометрии каждого в его системе координат;
- составление для каждого модуля матрицы, характеризующей его работу, погрешности и деформации во время работы станка по формуле (1);
- задание геометрии режущей кромки инструмента радиусами-векторами $\mathbf{r}_e(p)$;
- построение следа режущей кромки инструмента относительно детали по формуле (3);
- исключение из следа режущей кромки лишних участков введением дополнительной шкалы времени подобно выражению (4) или численно.

Абразивный инструмент моделируется поверхностью, заданной радиусом-вектором $\mathbf{r}_i(p, q)$, где p, q — свободные параметры. В ка-

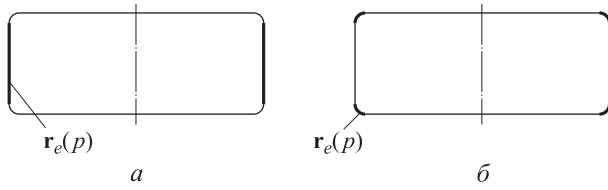


Рис. 2. Режущие поверхности шлифовального круга: а — цилиндрическая; б — скругление на кромке

честве примера рассмотрим выражения для определения радиусов-векторов [14]:

- цилиндрической поверхности шлифовального круга (рис. 2, а)

$$\mathbf{r}_t(p, q) = \begin{pmatrix} \frac{D}{2} \cos p \\ \frac{D}{2} \sin p \\ q \\ 1 \end{pmatrix}, \quad p = 0 \dots 2\pi, q = 0 \dots B;$$

- скругления на кромке шлифовального круга (рис. 2, б)

$$\mathbf{r}_t(p, q) = \begin{pmatrix} \left(\frac{D}{2} - r\right) \cos p \cos q \\ \left(\frac{D}{2} - r\right) \sin p \cos q \\ r \sin q \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$p = 0 \dots 2\pi, q = 0 \dots \pi/2,$$

где D и B — диаметр и ширина шлифовального круга; r — радиус скругления.

Поверхность детали после обработки может быть получена как огибающая семейства поверхностей $r(p, q)$ с параметром t [5]:

$$\mathbf{r}_s(t, p, q) = \mathbf{M}_1(t) \mathbf{M}_2(t) \dots \mathbf{M}_m(t) \mathbf{r}_e(p) = \mathbf{M}(t) \mathbf{r}_t(p, q). \quad (5)$$

Условие огибания, сокращающее количество свободных параметров поверхности до двух, можно представить в виде

$$\left[\frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial p} \times \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial q} \right] \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, алгоритм построения следа обработки на станках с последовательной кинематикой абразивным инструментом включает в себя следующие шаги:

- разделение станка на отдельные модули с определением геометрии каждого в его системе координат;

- составление матрицы для каждого модуля, характеризующей его работу, погрешности и деформации во время работы станка по формуле (1);

- задание геометрии абразивной поверхности инструмента радиусом-вектором $\mathbf{r}_t(p, q)$;

- построение обработанной поверхности по формуле (5) с исключением из нее одного параметра согласно уравнению огибания (6).

Пример расчета. Рассмотрим обработку концевой фрезой торца детали на фрезерном трехкоординатном станке [15]. В таком станке будет четыре матрицы преобразований координат (по одной на каждую ось + вращение шпинделя). Если в станке отсутствуют погрешности и ось вращения шпинделя направлена вдоль оси z , то итоговая матрица преобразования примет вид

$$\mathbf{M}(t) = \begin{pmatrix} \cos ft & \sin ft & 0 & x(t) \\ -\sin ft & \cos ft & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где x, y, z — движения по соответствующим координатам; f — угловая частота вращения, мин^{-1} .

Приняв, что торец находится в плоскости XOZ , запишем $z = y = 0$, при этом x будет зависеть от времени t .

Радиус-вектор режущей кромки определяется выражением (2). Приняв фрезу однозубой, получим радиус-вектор инструмента в системе координат станка:

$$\mathbf{r}(t, p) =$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{d}{2} \cos \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \cos ft + \frac{d}{2} \sin \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \sin ft + x(t) \\ -\frac{d}{2} \sin \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \sin ft + \frac{d}{2} \cos \left(2\pi \frac{p}{p_e} \right) \cos ft \\ p \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Для расчета выбраны следующие параметры: диаметр фрезы — 5 мм; шаг канавки — 1 мм; частота вращения шпинделя — 50 000 мин^{-1} ; подача — 50 мм/мин.

При отсутствии биения шпинделя след фрезы будет представлять собой поверхность, полученную вытяжкой трохоиды (рис. 3, а). Для удобства масштаб поверхностей вдоль «гребешков» увеличен в 1 000 раз по сравнению с масштабом остальных осей координат.

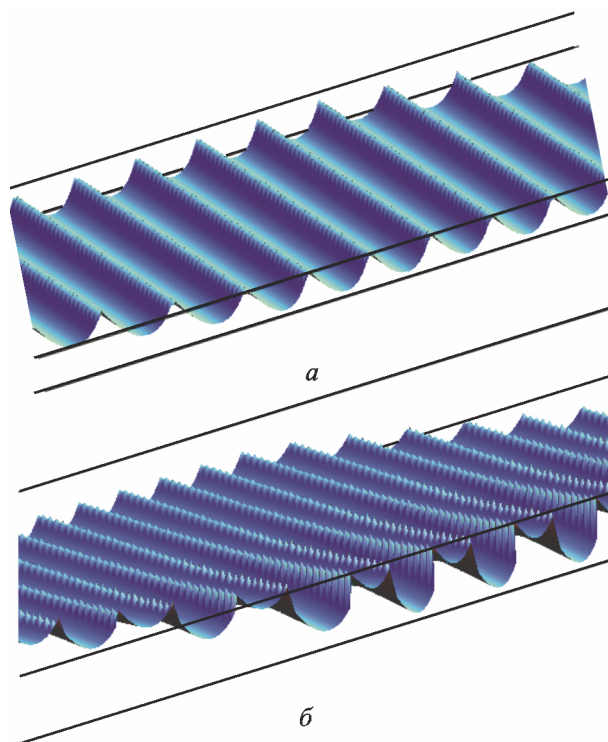


Рис. 3. Моделирование следа фрезы при отсутствии (а) и наличии (б) биения шпинделя

При наличии биения шпинделя матрица, характеризующая положение инструмента, умножается справа на дополнительную матрицу M_f , определяемую следующим образом:

$$M_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 & A \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -A \sin \omega t & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где A — амплитуда биения (угловая амплитуда), рад; $\omega = 2\pi n/z$ — частота возмущающего воздействия (z — число зубьев фрезы).

Результаты моделирования следа обработки при наличии биения шпинделя приведены на рис. 3, б.

Выводы

1. Предложена методика моделирования следа обработки, позволяющая осуществлять расчет погрешностей детали, учитывая погрешности станка и инструмента.

2. Используя данную методику расчета, можно вводить коррекцию в систему ЧПУ станка для уменьшения погрешности обрабатываемых деталей.

Литература

- [1] Пашкевич М.Ф., Жолобов А.А., Пашкевич В.М., Будкевич А.М. О связи кинематической погрешности привода главного движения станка с точностью обработки. *Материалы, технологии, инструменты*, 2004, № 3, с. 11–15.
- [2] Тимирязев В.А., Хазанова О.В., Гайлит Ю.Т. Программные методы управления точностью обработки на многоцелевых станках. *Вестник машиностроения*, 2005, № 9, с. 14–17.
- [3] Weck M., Hilbing R., Peschke C. *Precision Machine Tools. Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*, US, Springer, 2002, pp. 519–523.
- [4] Vázquez E., Gomar J., Ciurana J., Rodríguez C.A. Evaluation of machine-tool motion accuracy using a CNC machining center in micro-milling processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 76, no. 1–4, pp. 219–228.
- [5] Решетов Д.Н., Портман В.Т. *Точность металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1986. 336 с.
- [6] Лещенко А.И. Достижение требуемой точности сложнопрофильных поверхностей путем параметризации программной коррекции погрешностей обработки на станках с ЧПУ. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, 2011, № 23, с. 197–203.
- [7] Ягопольский А.Г., Кропотин Н.Ю. Мехатронный комплекс диагностических испытаний и прогнозирования надежности токарных станков. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 3, с. 49–55.
- [8] Cheng Q., Zhang Z., Zhang G., Gu P., Cai L. Geometric accuracy allocation for multi-axis CNC machine tools based on sensitivity analysis and reliability theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, vol. 229, no. 6, pp. 1134–1149.

- [9] Максимов Ю.В., Бекаев А.А., Надольский М.А., Прохоров А.В. К вопросу об обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2012, № 2, с. 129–130.
- [10] Неизвестных А.Г., Крылов Е.Г. Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ. *Известия ВолгГТУ*, 2008, т. 4, № 9, с. 89–91.
- [11] Джумаев З.Ф., Ашуров З.Л., Саидов Д.С. Подналадка станков и точность обработки. *Молодой ученый*, 2014, № 21, с. 147–149.
- [12] Белов С.А., Чухонцева О.В., Хусаинов Р.М. Методика испытания на точность круговой интерполяции на станках с ЧПУ. *Современные наукоемкие технологии*, 2013, № 8-2, с. 178–180. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=32064> (дата обращения 06 апреля 2016).
- [13] Комбаров В.В., Сорокин В.Ф., Криживец Е.А. Исследование влияния стабильности цикла управления системы ЧПУ на точность формообразующих движений. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2015, № 10, с. 58–64.
- [14] Авдеев В.Б. Оценка безотказности токарных станков с ЧПУ по параметрам точности обработки. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2012, № 2, с. 158–164.
- [15] Ягопольский А.Г., Крикунов Д.Э. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5, с. 98–105.

References

- [1] Pashkevich M.F., Zholobov A.A., Pashkevich V.M., Budkevich A.M. O sviazi kinematicheskoi pogreshnosti privoda glavnogo dvizheniia stanka s tochnost'iu obrabotki [About the connection of the kinematic error of the drive of the main movement of the machine with accuracy]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials, technologies, tools]. 2004, no. 3, pp. 11–15.
- [2] Timiriazev V.A., Khazanova O.V., Gailit Iu.T. Programmnye metody upravleniia tochnost'iu obrabotki na mnogotselevykh stankakh [Program methods of the machining accuracy control on machining centers]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2005, no. 5, pp. 14–17.
- [3] Weck M., Hilbing R., Peschke C. Precision Machine Tools. *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*, US, Springer, 2002, pp. 519–523.
- [4] Vázquez E., Gomar J., Ciurana J., Rodríguez C.A. Evaluation of machine-tool motion accuracy using a CNC machining center in micro-milling processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 76, no. 1–4, pp. 219–228.
- [5] Reshetov D.N., Portman V.T. *Tochnost' metallovezhushchikh stankov* [Precision machine tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 336 p.
- [6] Leshchenko A.I. Dostizhenie trebuemoi tochnosti slozhnoprofil'nykh poverkhnostei putem parametrizatsii programmnoi korrektsii pogreshnostei obrabotki na stankakh s ChPU [Achievement of the required exactness of difficultly-type surfaces by parametrization of programmatic correction of errors of treatment on machine-tools with CNC]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Azov State Technical University. Series: Engineering]. 2011, no. 23, pp. 197–203.
- [7] Iagopol'skii A.G., Kropotin N.Iu. Mekhatronnyi kompleks diagnosticheskikh ispytaniy i prognozirovaniia nadezhnosti tokarnykh stankov [Mechatronic Complex of Diagnostic Tests and Reliability Forecasting of Lathes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2016, no. 3, pp. 49–55.
- [8] Cheng Q., Zhang Z., Zhang G., Gu P., Cai L. Geometric accuracy allocation for multi-axis CNC machine tools based on sensitivity analysis and reliability theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, vol. 229, no. 6, pp. 1134–1149.
- [9] Maksimov Iu.V., Bekaev A.A., Nadol'skii M.A., Prokhorov A.V. K voprosu ob obespechenii tochnosti obrabotki na stankakh s ChPU [Precision of machining on CNC machines]. *Izvestiia MGTU «МАМИ»* [Izvestiya MGTU «МАМИ»]. 2012, no. 2, pp. 129–130.

- [10] Neizvestnykh A.G., Krylov E.G. Analiz tochnosti obrabotki detalei na stankakh s ChPU [Analysis of the precision machining of parts on CNC machines]. *Izvestiia VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University]. 2008, vol. 4, no. 9, pp. 89–91.
- [11] Dzhumaev Z.F., Ashurov Z.L., Saidov D.S. Podnaladka stankov i tochnost' obrabotki [The tuning machines and precision machining]. *Molodoi uchenyi* [A young scientist]. 2014, no. 21, pp. 147–149.
- [12] Belov S.A., Chukhontseva O.V., Khusainov R.M. Metodika ispytaniia na tochnost' krugovoi interpoliatsii na stankakh s ChPU [Methods of testing the accuracy of circular interpolation with CNC machines]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2013, no. 8-2, pp. 178–180. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=32064> (accessed 06 April 2016).
- [13] Kombarov V.V., Sorokin V.F., Krizhivets E.A. Issledovanie vliianiia stabil'nosti tsikla upravleniia sistemy ChPU na tochnost' formoobrazuiushchikh dvizhenii [Study of CNC system control cycle stability influence on shape-generating accuracy]. *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiiia* [Aerospace technic and technology]. 2015, no. 10, pp. 58–64.
- [14] Avdeev V.B. Otsenka bezotkaznosti tokarnykh stankov s ChPU po parametram tochnosti obrabotki [Reliability estimation of lathes with CNC by the accuracy of processing]. *Izvestiia MGTU «MAMI»* [Izvestiya MGTU «MAMI»]. 2012, no. 2, pp. 158–164.
- [15] Iagopol'skii A.G., Krikunov D.E. Analiz korrektsii teplovykh deformatsii v stankakh [Analysis of Correction of Thermal Deformation in Machine Tools]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2014, no. 5, pp. 98–105.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Информация об авторах

УТЕНКОВ Владимир Михайлович (Москва) — доктор технических наук, зав. кафедрой «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

ПОЛКАНОВ Евгений Георгиевич (Москва) — кандидат технических наук, советник генерального директора. Холдинг АО «СТАНКОПРОМ» (129110, Москва, Российская Федерация, ул. Гиляровского, д. 65, стр. 1).

ЧИРКИН Александр Вадимович (Москва) — аспирант кафедры «Детали машин», ассистент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexchick07@gmail.com).

БЫКОВ Павел Анатольевич (Москва) — ассистент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pavel-bykov@yandex.ru).

Information about the authors

UTENKOV Vladimir Mikhailovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Head of Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

POLKANOV Evgeniy Georgievich (Moscow) — Candidate of Science, Advisor to the General Director. Holding company AO Stankoprom (129110, Moscow, Russian Federation, Gilyarovskiy St., Bldg. 65, Block 1).

CHIRKIN Aleksandr Vadimovich (Moscow) — Postgraduate, Machine Parts Department; Teaching Assistant, Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexchick07@gmail.com).

BYKOV Pavel Anatolyevich (Moscow) — Teaching Assistant, Metal-Cutting Machine Tools Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pavel-bykov@yandex.ru.).