

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.02

УДК 621.19

**А.К. Остапчук<sup>1</sup>, Е.М. Кузнецова<sup>2</sup>, А.Г. Михалищев<sup>2</sup>, А.И. Шашков<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Курганский институт железнодорожного транспорта, Курган, Россия<sup>2</sup> Уральский государственный университет путей сообщения,  
Екатеринбург, Россия

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены особенности управления точностью технологической обрабатывающей системы. Разработана структура комбинированного управления точностью прецизионной обработки. Проводится оценка точности технологической обрабатывающей системы с помощью методов нелинейной динамики. Определение достоверного краткосрочного горизонта прогноза временных рядов позволяет сделать вывод о возможности предсказания поведения обрабатывающей системы, не имеющей строго периодической динамики.

В работе установлено, что при прецизионной обработке деталей транспортных машин из труднообрабатываемых материалов сигнал, генерируемый технологической обрабатывающей системой, носит случайный характер. В качестве информационного сигнала для диагностики технологической обрабатывающей системы наиболее перспективным будет использование акустического сигнала, непосредственно сопутствующего процессу механической обработки деталей. Для характеристики хаотических процессов, определения степени их неустойчивости наиболее оптимальным предполагается использование спектра показателей Ляпунова. По этим значениям можно судить о степени устойчивости процессов, происходящих при функционировании технологической системы.

В работе выполнен прогноз точности обработки для определения периодичности измерений в условиях управления по отклонению. Показано, что в условиях динамического равновесия периодичность измерений составляет 3–5 деталей. При работе системы в области неустойчивости прогноз невозможен. Сделан вывод, что периодичность измерений необходимо уменьшить до одной детали. Следующим шагом при управлении точностью прецизионной обработки должна стать коррекция режимов обработки, позволяющая привести систему в устойчивое состояние.

Практическая реализация разработанных средств комбинированного управления точностью обработки позволит сократить брак до уровня случайных выбросов и повысить производительность оборудования на 10–30 %.

**Ключевые слова:** прецизионная обработка, математическая модель, технологическая система, автокорреляционная функция, управление по возмущению, управление по отклонению, устойчивость по Ляпунову, вейвлет-спектр, колебания, вибросигнал.

**A.K. Ostapchuk<sup>1</sup>, E.M. Kuznetsova<sup>2</sup>, A.G. Michalischew<sup>2</sup>, A.I. Shashkov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Kurgan Institute of Railway Transport, Kurgan, Russian Federation<sup>2</sup> Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

## FEATURES OF CONTROL PRECISION MACHINING MACHINE PARTS

In the article the peculiarities of technological precision control of the manufacturing system. The structure of the combined management accuracy precision machining. Assessment of the accuracy

of the technological manufacturing systems using nonlinear dynamics techniques. The definition of reliable short-term forecast horizon time series allows to make a conclusion about the possibility of predicting the behavior of the manufacturing systems that do not have strictly periodic dynamics.

The work found that when precision machining transport vehicles from difficult to machine materials the signal generated by the manufacturing technological system is random. As the information signal for diagnostics of the technological processing system, the most promising is the use of an acoustic signal, directly accompanying the process of machining parts. To characterize chaotic processes, determine the degree of instability it is assumed the most optimal use of the spectrum of Lyapunov exponents. According to these values it is possible to judge the degree of sustainability of the processes occurring during the functioning of the technological system.

We forecast the accuracy of processing for determining the frequency of measurements in terms of the control deviation. It is shown that in conditions of dynamical equilibrium the periodicity of measurements is 3-5 parts. When the system is in the unstable area of the forecast is impossible. It is concluded that the frequency of measurements should be reduced to a single part. The next step in the management of the precision of fine processing must be a correction of the processing modes to allow the system to steady state. The practical implementation of the developed tools combined control precision machining would reduce marriage to the level of accidental emissions and increase equipment productivity by 10-30%.

**Keywords:** precision processing, mathematical model, technological system, autocorrelation function, control in the perturbation, control deviation, Lyapunov stability, wavelet spectrum, oscillation, vibrate.

Управление точностью прецизионной обработки имеет свои особенности, связанные со спецификой условий, в которых она осуществляется:

- небольшие снимаемые припуски (5–20 мкм) и, как следствие, снижение интенсивности износа режущего инструмента;
- малые (единицы микрометров) допуски на размер, повышающие степень ответственности контрольно-измерительных операций, что практически приводит к увеличению их продолжительности и делает соразмерными с временем обработки;
- рост влияния тепловых возмущений ввиду того, что величина вызываемых ими деформаций элементов конструкции станка соизмерима с допуском на размер.

Специфика же управления в данном случае состоит в том, что важным является определение не величины подналадочного импульса, а момента, когда его необходимо вводить. Поскольку для уменьшения вероятности случайных выбросов процесс обработки целесообразно центрировать к середине поля допуска.

Таким образом, особую актуальность приобретает прогнозирование поведения процесса обработки в ближайшем будущем, что позволит упорядочить процедуру контрольно-измерительных операций в направлении оптимизации их периодичности. Анализ существующих

методов прогнозирования временных рядов, образованных отклонениями размеров от заданных, показал, что наиболее предпочтительным является использование методов, основанных на построении моделей, отслеживающих нестационарность исследуемого процесса на фоне помехи [1]. К числу этих моделей относятся, например, полиномиальные – на основе метода наименьших квадратов и расширенного метода наименьших квадратов, и дискретные – на основе уравнения смешанного процесса авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) [2].

В случае, если помеха носит характер белого шума или тепловой переходный процесс закончился, режим обработки стабилизируется и выполнение контрольно-измерительных операций становится практически нецелесообразным, поскольку зафиксированные в их ходе отдельные случайные выбросы не могут служить основанием для введения коррекции и последующего контроля реакции системы на нее. В этом случае, с учетом специфики условий обработки, более рациональной будет реализация автоматического контроля состояния технологической обрабатывающей системы с помощью соответствующей аппаратуры, т.е. организация канала управления по возмущению. Исходя из этого для более эффективного использования станков необходимо решить проблему создания надежного аппарата технологического диагностирования процесса обработки, а также необходим подход к управлению технологическим процессом, основанный на адаптации [3].

Постоянство градиента или колебания в заданных пределах отражают устойчивость процесса обработки и исключают необходимость проведения измерений изготовленных деталей, существенно увеличивая, тем самым, производительность оборудования. Рост размаха колебаний или появление значимого дрейфа температуры в опорной точке явится сигналом нарушения условия стационарности и определит момент проведения измерения [4, 5].

Таким образом, в условиях прецизионной обработки целесообразной является реализация комбинированного управления точностью технологической системы (рис. 1), канал управления по отклонению которого будет задействован преимущественно в переходном тепловом режиме, а канал управления по возмущению – в основном в условиях его стационарности.

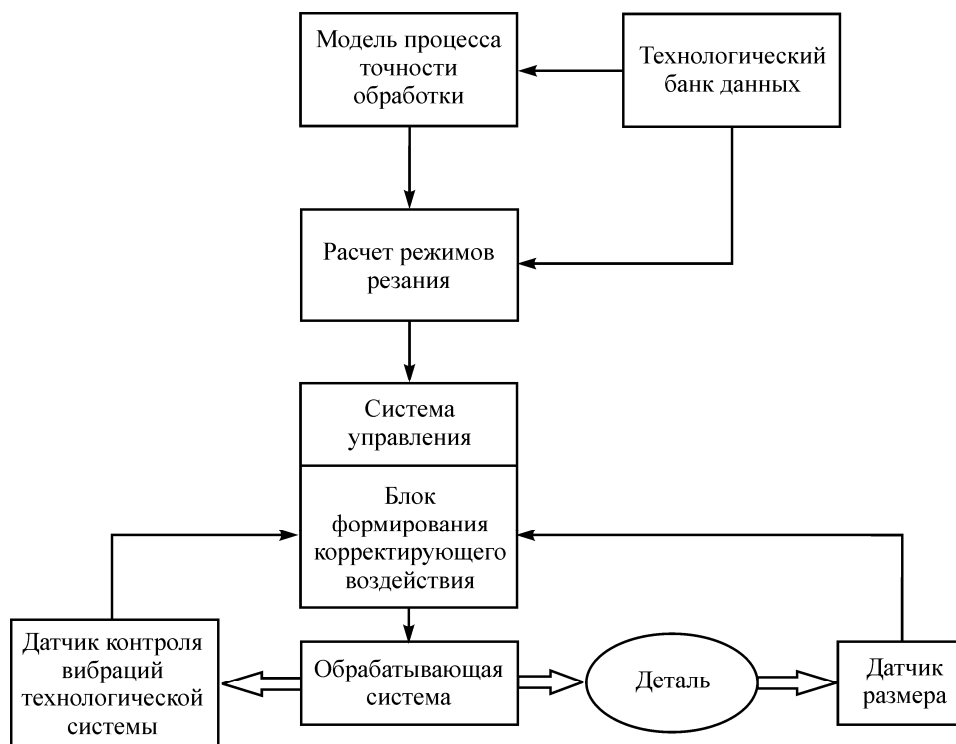


Рис. 1. Структурная схема комбинированного управления точностью прецизионной обработки

Технологическая система может быть представлена в виде нелинейной динамической системы, которая задана специфическим набором величин, характеризующих состояние этой системы.

Любая динамическая система, детерминированная правилами, может проявлять случайное поведение, причем случайность носит неустранимый характер. Причиной потери предсказуемости является чувствительная зависимость режима функционирования динамических систем от сколь угодно малых изменений начальных условий.

Эффективность диагностики определяется информативностью используемых параметров, их зависимостью от условий обработки. Традиционное применение для этой цели силы и температуры резания в ряде случаев оказывается неприемлемым, недостаточно информативным или неадекватным. Использование акустического излучения, которое всегда сопутствует процессу обработки, в виде информационного сигнала является наиболее перспективным.

В ходе проведенных экспериментов установлено, что при прецизионной обработке труднообрабатываемых материалов сигнал, генерируемый технологической обрабатывающей системой, носит случайный характер.

Для характеристики хаотических процессов, определения степени их неустойчивости в нелинейной динамике используется спектр показателей Ляпунова

Сумма показателей Ляпунова траектории  $x_0(t)$  характеризует скорость изменения фазового объема в ее окрестности. Режим странного аттрактора реализуется только в диссипативных системах и характеризуется наличием в спектре положительных показателей. Сумма показателей Ляпунова для диссипативных систем отрицательна. Если сумма показателей Ляпунова равна нулю, то фазовый объем системы во времени не изменяется – система консервативна и аттракторов не содержит. В случае положительной суммы показателей Ляпунова фазовый объем во времени нарастает. С физической точки зрения такой режим не может быть реализован как стационарный.

Если динамика системы является периодической или квазипериодической, то значение показателя Ляпунова равно 0; если движению системы отвечает устойчивая стационарная точка, то значение показателя Ляпунова отрицательно; наличие положительного показателя Ляпунова свидетельствует о неустойчивости фазовой траектории и хаотичности динамической системы.

Согласно рекомендациям в данной работе определяется лишь *старший показатель Ляпунова* по одномерной реализации [6–8], которая и является собственно вибросигналом. Суть данной методики заключается в следующем:

1. При помощи теоремы Такенса [6–8] производится реконструкция фазовой траектории.

2. Выбирается стартовая точка на фазовой траектории и находится ближайшая к ней точка фазовой траектории, после чего вычисляется расстояние между ними  $L(t_0)$ .

3. В момент времени  $t_1$  расстояние между точками станет равным  $L(t_1)$ , затем находим точку, которая удовлетворяет двум условиям: расстояние  $L'(t_1)$  между ней и стартовой точкой минимально и минимально угловое отклонение (так как принципиально может быть несколько точек, расстояние до которых равно  $L'(t_1)$ ).

4. Производится перемещение по аттрактору до того момента, пока временной ряд не закончится. Максимальный показатель Ляпунова вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \log_2 \left( \frac{L'(t_i)}{L(t_{i-1})} \right),$$

где  $N$  – количество точек в исходном временном ряде.

На рис. 2 и 3 приведен интерфейс программы по расчету максимального показателя Ляпунова. Показатели Ляпунова рассчитывались как для чистового точения, так и для окончательного шлифования. Как в первом, так и во втором случае наличие положительного показателя Ляпунова свидетельствует о хаотичности динамической системы.

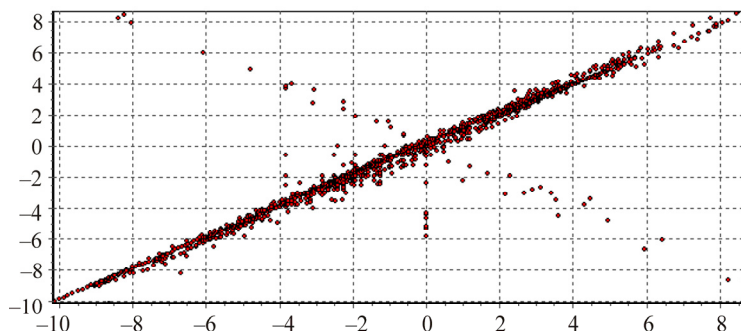


Рис. 2. Интерфейс программы расчета показателя Ляпунова при точении (показатель Ляпунова равен 1,06237)

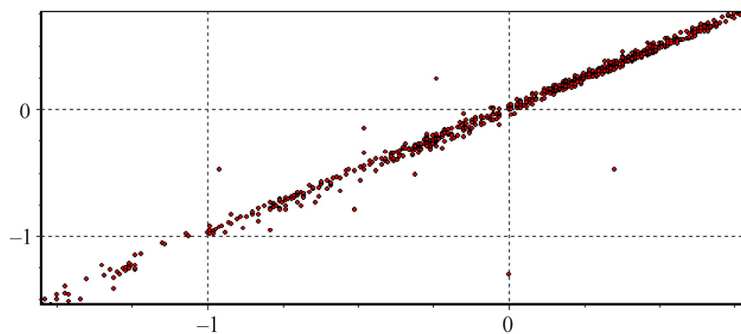


Рис. 3. Интерфейс программы расчета показателя Ляпунова при окончательном шлифования (показатель Ляпунова равен 0,241107)

Основной характеристикой случайного сигнала является автокорреляционная функция, которая может быть применена в качестве основной модели управления процессом [9, 10]. С позиций технологии машиностроения данная модель имеет две границы течения процесса (рис. 4).

Верхняя граница – ограничение по качеству поверхности детали, нижняя – ограничение по производительности. Любое значение мощности виброакустического сигнала, корреляционная функция которого попадает в заданные ограничения, будет удовлетворять требованиям чертежа, а следовательно, и служебному назначению [11–13].

Предметом исследования служит изменение поведения временного ряда под действием явления детерминированного хаоса. В качестве временного ряда были выбраны значения диаметрального размера детали, которые измерялись после обработки с точностью 0,01 мм (рис. 5, 6).

Измерение размеров осуществляется встроенным в модуль датчиком положения поверхности с погрешностью не более 0,6 мкм.

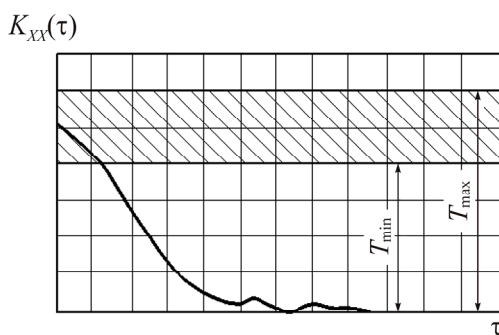


Рис. 4. Экономические границы модели по точностным параметрам детали ( $T$ ) при  $\gamma = 1$

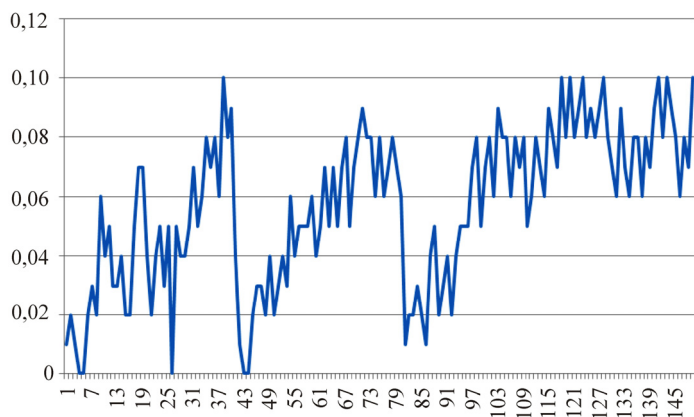


Рис. 5. Отклонение диаметральных размеров при токарной обработке стального вала

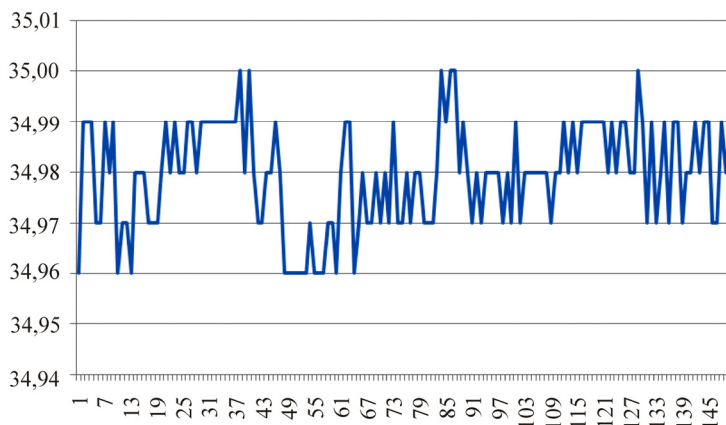


Рис. 6. Диаметральный размер стального вала после окончательного шлифования

Для определения периодичности измерений в условиях управления по отклонению с помощью имитационного моделирования прогнозировалась точность обработки с применением следующих моделей [2, 14, 15]:

1) авторегрессионная модель (AR)

$$A(z)y(t) = e(t),$$

где  $A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}$ ;

2) модель ARX

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t),$$

где  $B(z) = b_1 + b_2z^{-1} + b_3z^{-2} + \dots + b_nz^{-n+1}$ ;

3) ARXMAX-модель (модель авторегрессионной функции с использованием скользящего среднего)

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)e(t),$$

где  $C(z) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_nz^{-n}$ ,  $nk$  – величина задержки;

4) модель вход-выход

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + e(t),$$

где  $F(z) = 1 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + \dots + f_nz^{-nf}$ ;



5) модель Бокса–Дженкинса

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t);$$

6) модель для переменных состояния

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= Ax(t) + Bu(t), \\y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t),\end{aligned}$$

где  $A, B, C, D$  – матрицы соответствующих размеров.

Анализ моделей показал, что периодичность измерений составляет 3–5 деталей при работе технологической системы в условиях динамического равновесия. Момент измерения при управлении по возмущению определялся исходя из условия увеличения размаха колебаний, генерируемых технологической обрабатывающей системой.

Горизонт прогноза управления точностью по возмущению также определялся на основе старшего показателя Ляпунова ( $\lambda_{\max}$ ) (для точения  $\lambda_{\max} = 0,3 \dots 0,6$ , для окончательного шлифования  $\lambda_{\max} = 0,15 \dots 0,25$ ):

$$T = \frac{1}{\lambda_{\max}}.$$

Полученные данные подтверждают найденную периодичность измерений.

В случае невозможности прогнозирования из-за работы технологической обрабатывающей системы в области неустойчивости периодичность измерений уменьшается до одной детали. Следующим шагом при управлении точностью прецизионной обработки будет коррекция режимов обработки, позволяющая привести систему в устойчивое состояние.

Практическая реализация разработанных средств комбинированного управления точностью обработки позволит сократить брак до уровня случайных выбросов и повысить производительность оборудования на 10–30 %.

### Список литературы

1. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 36–41.

2. Льюинг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

3. Симонов А.М., Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга: монография / под ред. Н.Л. Поповой. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – 118 с.

4. Суслов А.Г., Таратынов О.В., Болотина Е.М. Комплексное изучение качества поверхностного слоя деталей машин // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – № 9. – С. 8–12.

5. Суслов А.Г. Методология разработки новых наукоемких технологических методов обработки рабочих поверхностей деталей машин // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 7. – С. 4–8.

6. Кузнецов С.П. Динамический хаос. – М.: Физматлит, 2001. – 296 с.

7. Павлов А.Н. Методы анализа сложных сигналов: учеб. пособие. – Саратов: Науч. кн., 2008. – 120 с.

8. Шустер Г. Детерминированный хаос: введение в теорию и приложения. – М.: Наука, 1998. – 253 с.

9. Остапчук А.К., Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е. Применение теории случайных процессов для моделирования параметров качества поверхности // Транспорт Урала. – 2011. – № 2. – С. 41–45.

10. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Применение функции спектра мощности для определения фрактальной размерности временного ряда // Вестник Курган. гос. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2010. – № 17. – С. 124–125.

11. Безъязычный В.Ф., Сутягин А.Н. К вопросу расчетного определения интенсивности изнашивания контактируемых поверхностей с учетом упрочнения поверхностного слоя деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 1(109). – С. 3–6.

12. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Инженерный журнал. Справочник. – 2000. – № 4. – С. 9–16.

13. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2009. – 320 с.

14. Нагоркин М.Н., Федоров В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при

обработке на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 8. – С. 40–46.

15. Jablonski J., Pawlowski S., Liubimov V. 3D-numerical model of surface after laser machining // Measurement Science Review. – 2003. – Vol. 3, Section 3. – С. 87–90.

### References

1. Ostapchuk A.K., Ovsiannikov V.E. Sinergeticheskii podkhod k opredeleniiu otklika tekhnologicheskoi sistemy na vneshnee vozdeistvie [Synergetic approach to definition of a response of technological system to external influence]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2011, no. 3, pp. 36-41.

2. L'iuin L. Identifikatsiia sistem. Teoriia dlia pol'zovatel'ia [Identification of systems. The theory for the user]. Moscow: Nauka, 1991. 432 p.

3. Simonov A.M., Ostapchuk A.K., Ovsiannikov V.E. Osnovy obespecheniia kachestva poverkhnosti detalei mashin s ispol'zovaniem dinamicheskogo monitoringa [Bases of quality assurance of a surface of details of machines with use of dynamic monitoring]. Ed. by N.L. Popova. Kurganskii gosudarstvennyi universitet, 2010. 118 p.

4. Suslov A.G., Taratynov O.V., Bolotina E.M. Kompleksnoe izucheniie kachestva poverkhnostnogo sloia detalei mashin [Complex studying of quality of a blanket of details of cars]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2013, no. 9, pp. 8-12.

5. Suslov A.G. Metodologiya razrabotki novykh naukoemkikh tekhnologicheskikh metodov obrabotki rabochikh poverkhnostei detalei mashin [Methodology of development of new knowledge-intensive technological methods of processing of working surfaces of details of cars]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 7, pp. 4-8.

6. Kuznetsov S.P. Dinamicheskii khaos [Dynamic chaos]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 296 p.

7. Pavlov A.N. Metody analiza slozhnykh signalov [Methods of the analysis of difficult signals]. Saratov: Nauchnaia kniga, 2008. 120 p.

8. Shuster G. Determinirovannyi khaos: vvedeniie v teoriuu i prilozheniia [The determined chaos: introduction to the theory and applications]. Moscow: Nauka, 1998. 253 p.

9. Ostapchuk A.K., Rogov E.Iu., Ovsiannikov V.E. Primeneniie teorii sluchainykh protsessov dlia modelirovaniia parametrov kachestva

poverkhnosti [Application of the theory of casual processes for modeling of parameters of quality of a surface]. *Transport Urala*, 2011, no. 2, pp. 41-45.

10. Ostapchuk A.K., Ovsianikov V.E., Rogov E.Iu. Primenenie funktsii spektra moshchnosti dlia opredeleniia fraktal'noi razmernosti vremennogo riada [Application of function of a range of power for definition of fractal dimension of a temporary row]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 17, pp. 124-125.

11. Bez"iazychnyi V.F., Sutiagin A.N. K voprosu raschetnogo opredeleniia intensivnosti iznashivaniia kontaktiruemykh poverkhnostei s uchetom uprochneniia poverkhnostnogo sloia detalei [To a question of settlement definition of intensity of wear of the contacted surfaces taking into account hardening of a blanket of details]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2014, no. 1(109), pp. 3-6.

12. Bez"iazychnyi V.F. Vliianie kachestva poverkhnostnogo sloia posle mekhanicheskoi obrabotki na ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin [Influence of quality of a blanket after machining on operational properties of details of cars]. *Inzhenernyi zhurnal. Spravochnik*, 2000, no. 4, pp. 9-16.

13. Suslov A.G. [et al.]. Inzheneriia poverkhnosti detalei [Engineering of a surface of details]. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 320 p.

14. Nagorkin M.N., Fedorov V.P. Tekhnologicheskoe obespechenie zakonomernogo izmeneniia kachestva poverkhnostnogo sloia detalei pri obrabotke na stankakh s ChPU [Technological support of natural change of quality of a blanket of details when processing on machines with Numerical Program Control]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 8, pp. 40-46.

15. Jablonski J., Pawlowski S., Liubimov V. 3D-numerical model of surface after laser machining . *Veasurement Science Review*, 2003, vol. 3, section 3, pp. 87-90.

Получено 16.05.2016

### Об авторах

**Остапчук Александр Константинович** (Курган, Россия) – кандидат технических наук, доцент структурного подразделения высшего образования Курганского института железнодорожного транспорта; e-mail: ostapchuk\_ss@mail.ru.

**Кузнецова Елена Михайловна** (Курган, Россия) – аспирант кафедры мехатроники Уральского государственного университета путей сообщения; e-mail: lenkuz@bk.ru.

**Михалищев Александр Геннадьевич** (Курган, Россия) – аспирант кафедры мехатроники Уральского государственного университета путей сообщения; e-mail: markos123@mail.ru.

**Шашков Алексей Игоревич** (Курган, Россия) – аспирант кафедры мехатроники Уральского государственного университета путей сообщения; e-mail: svoboda666free@gmail.com.

### **About the authors**

**Alexander K. Ostapchuk** (Kurgan, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Structural Units of Higher Education, Kurgan Institute of Railway Transport; e-mail: ostapchuk\_ss@mail.ru.

**Elena M. Kuznetsova** (Kurgan, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechatronics, Ural State University of Railway Transport; e-mail: nirio-kigt@mail.ru.

**Alexander G. Michalischev** (Kurgan, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechatronics, Ural State University of Railway Transport; e-mail: markos45@mail.ru.

**Alexey I. Shashkov** (Kurgan, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechatronics, Ural State University of Railway Transport; e-mail: svoboda666free@gmail.com.