

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.10

УДК 621.19

**В.Е. Овсянников<sup>1</sup>, Р.Ю. Некрасов<sup>1</sup>,  
Ю.А. Темпель<sup>1</sup>, В.И. Васильев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Курганский государственный университет, Курган, Россия

## **МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Многочисленными исследованиями установлено, что одним из факторов, оказывающим влияние на эксплуатационные свойства сопряженных деталей, является погрешность формы в поперечном сечении. Современное машиностроение характеризуется все более широким распространением станков с числовым программным управлением и обрабатывающих центров. Существенным недостатком большинства станков с ЧПУ является то, что при их использовании не гарантируется получение заданных требований по точности обработки. **Цель исследования** состоит в разработке системы автоматического обеспечения параметров некруглости при обработке на стенде, включающем токарный станок с числовым программным управлением. **Методы исследования:** для исследования профиля в поперечном сечении использовался корреляционный анализ. Использовались резцы из твердых сплавов. Обрабатывались конструкционные стали. Вибросигнал записывался при помощи датчика-акселерометра. **Результаты:** показано, что использование вибросигнала дает возможность оценивать точность формы, а применение моделей на основе нечеткой логики и нейронных сетей позволяет получить взаимосвязь между параметрами вибросигнала и точностью формы в поперечном сечении. В качестве устройства для активного контроля (автоматического обеспечения) параметров точности формы использована нейронечеткая система, имеющая нейросетевую базу данных и адаптивный блок принятия решений, основанный на нечеткой логике. В ходе исследований установлено, что использование таких параметров вибросигнала, как мощность и корреляционная энтропия, дает возможность не только оценивать износ инструмента, но и реализовывать активный контроль выходных параметров процесса обработки. Получены зависимости параметров погрешности формы, оцениваемые коэффициентом корреляционной энтропии и мощности виброакустического сигнала при различных значениях износа режущего инструмента. Построены нейронечеткие модели для оценки состояния технологической системы. **Практическая значимость:** применение нейронечетких моделей дает возможность определения отклонений формы с погрешностью, не превышающей 15 %, а применение аппарата нечеткой логики позволяет более эффективно принимать решения о дальнейшем использовании инструмента. Полученные результаты использованы в качестве исходных данных для разработки модели системы автоматического обеспечения параметров точности формы.

**Ключевые слова:** точность формы, станки, управление, погрешность.

V.E. Ovsyannikov<sup>1</sup>, R.Yu. Nekrasov<sup>1</sup>,  
Yu.A. Tempel<sup>1</sup>, V.I. Vasiliev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tyumen industrial University, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup>Kurgan state university, Kurgan, Russian Federation

## METHOD OF AUTOMATED PROVISION OF PARAMETERS OF ACCURACY OF PARAMETERS DURING MACHINING ON CNC MACHINES

Numerous researches have established that one of the factors affecting the operational properties of mating parts is the shape error in the cross section. Modern mechanical engineering is characterized by an increasingly widespread use of numerically controlled machine tools and machining centers. A significant disadvantage of most CNC machines is that when using them, it is not guaranteed that the specified requirements for processing accuracy are obtained. **The purpose** of the research is to develop a system for automatic provision of non-circularity parameters during processing on a bench, including a lathe with numerical control. **Research methods:** Correlation analysis was used to investigate the cross-sectional profile. Carbide cutters were used. Structural steels and hard-alloy cutters were processed. The vibration signal was recorded using an accelerometer sensor. **Results:** It is shown that the use of a vibration signal makes it possible to evaluate the accuracy of the shape, and the use of models based on fuzzy logic and neural networks makes it possible to obtain the relationship between the parameters of the vibration signal and the accuracy of the shape in the cross section. A neuro-fuzzy system with a neural network database and an adaptive decision-making unit based on fuzzy logic is used as a device for active control (automatic provision) of shape accuracy parameters. In the course of the research, it was found that the use of such vibration signal parameters as power and correlation entropy makes it possible not only to assess tool wear, but also to implement active control of the output parameters of the processing process. The dependences of the parameters of the shape error, estimated by the coefficient of the correlation entropy and the power of the vibroacoustic signal, were obtained for different values of the wear of the cutting tool. Neuro-fuzzy models have been built to assess the state of a technological system. **Practical significance:** the use of neuro-fuzzy models makes it possible to determine the deviations of the shape with an error not exceeding 15%, and the use of the apparatus of fuzzy logic makes it possible to more effectively make decisions about the further use of the instrument. The results obtained were used as initial data for the development of a model of a system for automatic provision of shape accuracy parameters.

**Keywords:** shape accuracy, machine tools, control, error.

### Введение

Отклонения формы деталей в поперечном сечении оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей и узлов. Одним из следствий влияния погрешности формы на эксплуатационные свойства является то, что в действительности тела контактируют между собой не по поверхности, а лишь отдельными участками, что приводит к интенсивному изнашиванию. Учитывая тенденцию развития промышленности, которая заключается во все более широком использовании оборудования с числовым программным управлением, остро стоит вопрос об обеспече-

нии требуемых выходных параметров процесса обработки (шероховатости, точности формы и размеров). Традиционно для решения указанной выше задачи производится определение (установление) режимов резания, которые обеспечивали бы заданные выходные параметры [1–13]. Однако при этом не учитываются изменения состояния технологической системы (износ инструмента, наростообразование и др). Поэтому для решения данной проблемы необходимо, прежде всего, разработать решения, которые дают возможность в автоматическом режиме производить контроль выходных параметров процесса обработки и с учетом состояния технологической системы вырабатывать управляющее воздействие. При этом для оценки параметров состояния технологической системы достаточно часто используются виброакустические методы. Однако в большей степени данные методы используются для оценки ресурса режущего инструмента, а не выходных параметров процесса обработки.

**Цель исследования** состоит в разработке системы автоматического обеспечения параметров некруглости при обработке на стенде, включающем токарный станок с числовым программным управлением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

- изучить текстуру профиля поверхности (в поперечном сечении), получаемой при токарной обработке на станке с ЧПУ;
- выбрать параметры, которые будут использоваться для оценки погрешности формы при обработке на станке с ЧПУ;
- выбрать методологический аппарат и разработать модель системы автоматического обеспечения параметров точности формы при обработке на станке с ЧПУ.

## **1. Материалы и методы исследования**

Многочисленными исследованиями [14–16] установлено, что на обеспечение выходных параметров процесса обработки влияет состояние технологической системы. Для того чтобы эффективно установить взаимосвязь между входными и выходными параметрами, прежде всего необходимо выбрать показатели для оценивания погрешности формы. На основе исследований, проведенных в работе [17], было установлено, что для этих целей подходит корреляционный анализ. При этом профиль представляется в виде реализации корреляционной функции вида [17, 18]:

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y(t + \tau)y(t)dt. \quad (1)$$

Учитывая, что профиль измерялся дискретно, в выражении (1) интеграл надо заменить на знак суммы:

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_{i=0}^{l-\tau} y(i)y(i+\tau), \quad (2)$$

где  $y(t)$  – ординаты профиля;  $\tau$  – временной сдвиг.

Использование корреляционных функций для оценки погрешности формы дает возможность не только количественно оценивать величину погрешности формы, но и производить анализ текстуры профиля. Иными словами, на основе вычисления корреляционной функции можно оценить соотношение случайной и систематической составляющих в текстуре профиля. Установленное соотношение составляющих позволяет оценить вклад случайных процессов в формирование конечного профиля обработанной поверхности.

Расчеты производились в разработанном программном обеспечении. Интерфейс программы для анализа профилей обработанных поверхностей представлен на рис. 1.

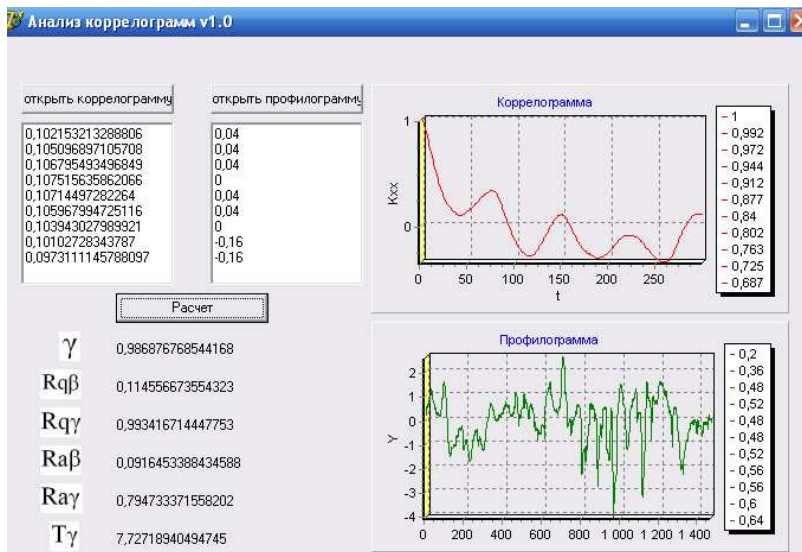


Рис. 1. Интерфейс программы для анализа профилей

Для оценки вибросигнала  $S_w$  использовались мощность и корреляционная энтропия  $K$  [17, 18]:

$$S_w = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_t(w)|^2}{T}, \quad (3)$$

где  $T$  – длительность сигнала;  $F_i(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-0.5T}^{0.5T} x(t)e^{-iwt} dt$  – преобразование Фурье сигнала  $x(t)$ .

$$K(r, n) = \ln \frac{C(r, n)}{C(r, n+1)}, \quad (4)$$

где  $C(r) = \frac{1}{m(m-1)/2} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \theta(r - p(x_i, x_j))$  – корреляционный интеграл;

$\theta(\alpha) = \begin{cases} 1, \alpha \geq 0 \\ 0, \alpha < 0 \end{cases}$  – выражение, которое описывает функцию Хевисайда;  $p$  – расстояние между точками фазовой траектории (аттрактора),  $m$  – количество координат на фазовой траектории, которое принимается в расчет.

В качестве режущего инструмента были использованы стандартные токарные резцы из твердых сплавов. Обрабатывались конструкционные стали. Вибросигнал записывался при помощи датчика-акселерометра, который устанавливался в непосредственной близости от зоны обработки (рис. 2).

На основе предварительных исследований [18] было установлено, что для оценивания параметров некруглости целесообразно использовать виброакустический сигнал в частотном диапазоне от 6 до 12 кГц. Обработка производилась при различных значениях скорости резания и подачи, а также при фаске износа инструмента по задней поверхности от 0 до 2,4 мм.



Рис. 2. Экспериментальный стенд

Пример серии экспериментов:

– станок 1ИБ11ПМФ3;

– материал деталей сталь 45, 40Х; материал резца ВОК60.

Термообработка (ТВЧ), твердость до 54 НРС.

Диаметр заготовок 50 мм, глубина резания  $t = 0,2$  мм. Число оборотов 630 об/мин.  $S = 20; 40; 60; 80; 100; 120$  мм/мин.

Запись производилась с одного датчика по оси Z, на задней части резца. Измерение формы детали проводили на станке. Цена деления индикатора 0,001 мм. Данные записывались в файл, угол поворота детали  $3^\circ$  (120 измерений на диаметре).

При составлении экспериментальных исследований были применены такие источники, как в работах [19, 20].

На основе предварительных исследований [17, 18] было установлено, что для оценки состояния технологической системы целесообразно использовать мощность вибросигнала  $Sw$  и корреляционную энтропию  $K$ .

Для нахождения взаимосвязи между входными и выходными параметрами целесообразно использовать нейронечеткую модель [21–25]. При этом модель содержит нейросетевую базу знаний и логический блок, который основан на нечеткой логике. В рамках данной работы модель была реализована в программном комплексе MatLab. Структура модели приведена на рис. 3.

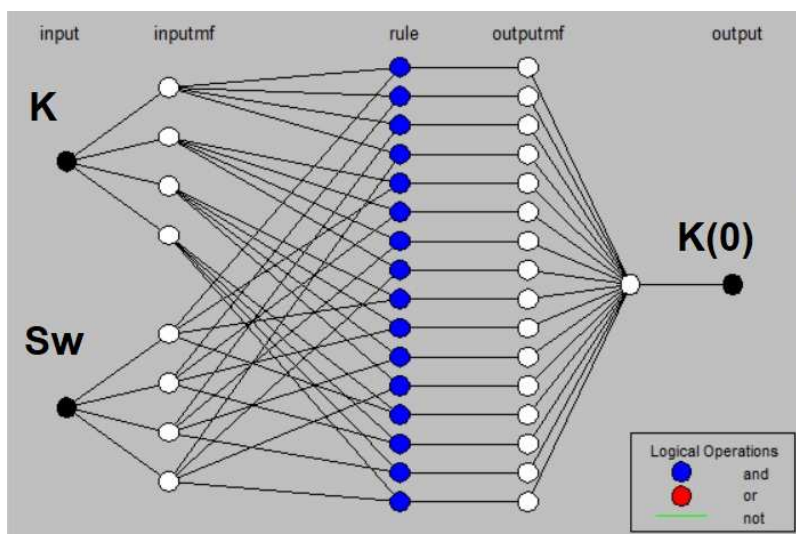


Рис. 3. Структура нейро-нечеткой модели

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

Примеры результатов проведенных экспериментов приведены на рис. 4–7.

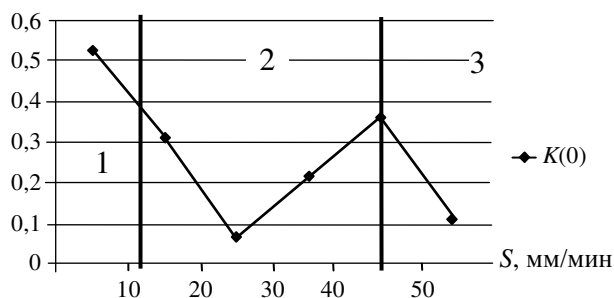


Рис. 4. Зависимость  $K_0 = f(S)$

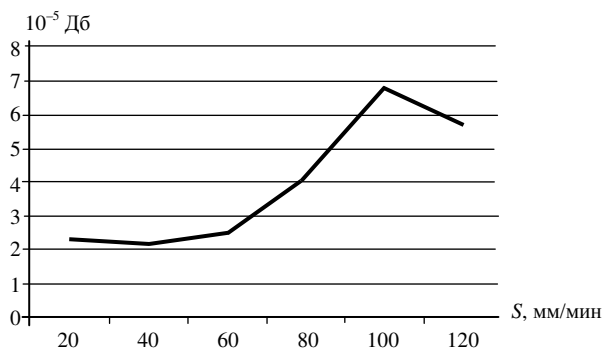


Рис. 5. Дисперсия вибросигнала ( $\cdot 10^{-5}$ ) от подачи

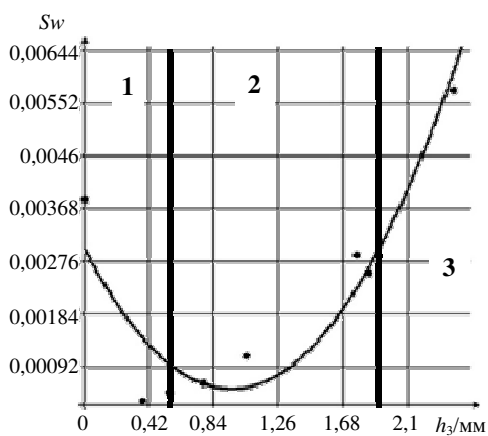


Рис. 6. Зависимость между мощностью вибросигнала и износом резца

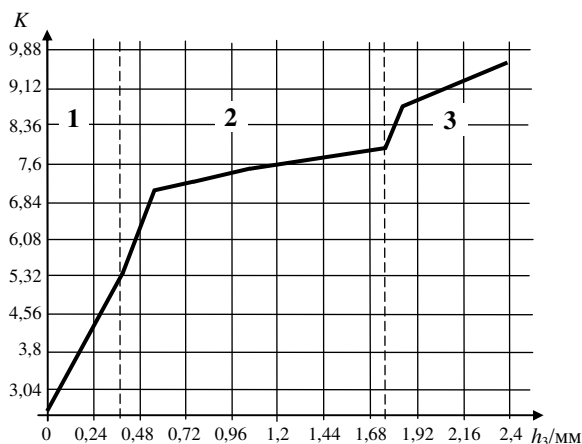


Рис. 7. Зависимость между корреляционной энтропией и износом резца

Важно отметить то, что характер зависимостей корреляционной энтропии и мощности вибросигнала от износа резца аналогичен форме классической кривой износа, что позволяет использовать данные параметры для оценки износа режущего инструмента.

Зависимости, приведенные на рис. 5–7, использованы в качестве исходных данных для построения нейронечеткой модели, структура которой приведена на рис. 3. Соотношения между переменными задавались системой правил вида (общее количество правил в базе – 15): ЕСЛИ  $K = K_1$  И  $S_w = v_1$  ТО  $K(0) = mf_1$ .

В качестве функций принадлежности были выбраны термы треугольного вида, значения переменных  $K$ ,  $S_w$ ,  $K(0)$  принимались равными экстремальным точкам, которые соответствуют началу и концу промежутков, обозначенных цифрами 1–3 на рис. 4, 6 и 7.

Приведенная выше система правил позволяет выполнять оценку корреляционной функции профиля  $K(0)$ , которая используется в качестве характеристики погрешности формы деталей в поперечном сечении. На рис. 8 приведены результаты тестирования модели на точность.

В результате тестирования на обучающей и тестовой выборках было установлено, что погрешность модели не превышает 10 %.

Анализируя зависимости, которые представлены на рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что они даже внешне соответствуют классической форме кривой износа. Полученные результаты были использованы в качестве исходных данных для разработки модели системы авто-



матического обеспечения параметров точности формы. Разработанная модель была реализована в виде программного комплекса. При испытании разработанной модели в качестве образцов были взяты штоки задвижек ЗКЛ 13004-050, ЗКЛ 13004-080М, ЗКС 13014-150. Для сравнения использовались данные обработки с использованием модели и без неё, результаты представлены на рис. 9.

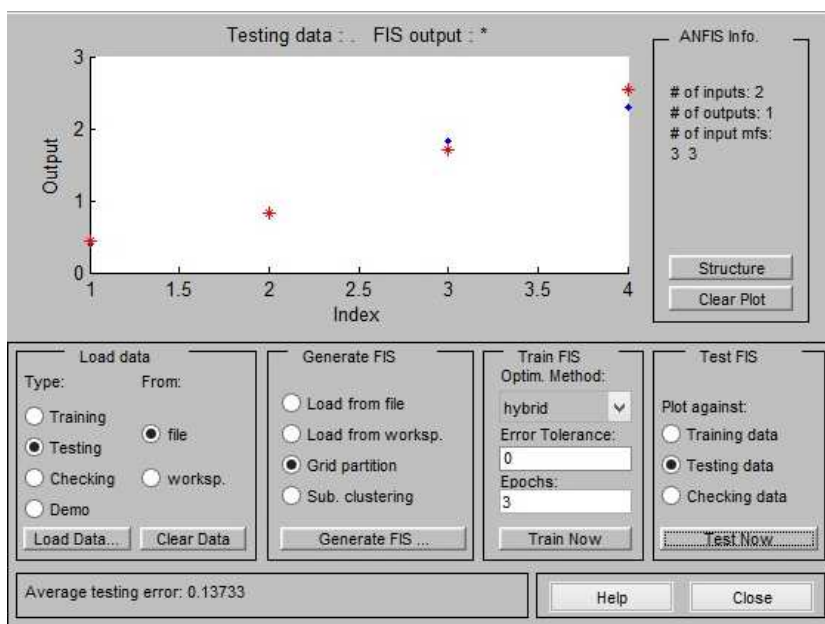


Рис. 8. Тестирование точности модели

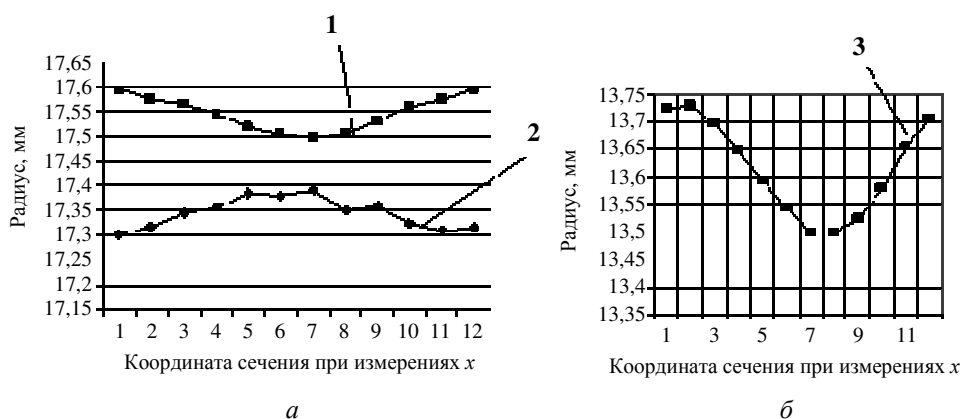


Рис. 9. Результаты обработки модели: а – результаты обработки без использования модели (шток 1, шток 2); б – результаты обработки с использованием модели (шток 3)

## **Заключение**

Полученные результаты дают возможность сделать ряд выводов:

– в ходе исследований было установлено, что использование параметров вибросигнала (мощности и корреляционной энтропии) дает возможность не только оценивать износ инструмента, как это делается в большинстве аналогичных работ, но и реализовывать активный контроль выходных параметров процесса обработки (в данном случае погрешность формы в поперечном сечении);

– использование нейронечетких моделей позволяет получить взаимосвязь между диагностическим признаком (параметрами вибросигнала) и выходными параметрами процесса обработки (точностью формы в поперечном сечении) с погрешностью не более 15 %;

– результаты испытаний показали, что использование предлагаемых решений дает возможность повысить точность изготовления деталей запорной арматуры на 20–30 %.

Научная новизна результатов обусловлена тем, что полученная модель системы позволяет производить оценку параметров точности формы с учетом состояния технологической системы. Также важным аспектом научной новизны является то, что подход является универсальным и за счет применения самообучающихся моделей (нейронечетких) может быть использован на любом станке.

К недостаткам предлагаемых решений можно отнести то, что не в полной мере можно учитывать влияние жесткости обрабатываемой детали на точность. Поэтому полученные результаты требуют корреляции с методикой автоматизации технической подготовки производства за счет автоматизированной коррекции управляющей программы по трансформируемой САД-модели заготовки.

## **Библиографический список**

1. Неизвестных А.Г., Крылов Е.Г. Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т.4, № 9(47). – С. 89–91.

2. Лысенко А.Ф. К оценке погрешности обработки деталей при интеллектуальном управлении станком // Вестник Донск. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 14, № 3(78). – С. 96–102.

3. Кузнецов А.С. Технологическое обеспечение точности при обработке на станках с ЧПУ // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2. – С. 165–170.

4. Козинский В.С. Применение метода конечных элементов и тонкостенных трехслойных деталей из ПКМ в машиностроении // *Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф.* – 2016. – № 1(7). – С. 200–202.

5. Тугенгольд А.К., Лукьянов Е.А., Герасимов В.А. Система управления станком, обеспечивающая повышенную точность обработки // *СТИН*. – 1999. – № 8. – С. 21–26.

6. Технологическое обеспечение точности и математическое моделирование процессов механообработки в машиностроении: учеб. пособие / В.А. Иванов, В.В. Новоселов, Ю.И. Некрасов, Ю.И. Шаходанов. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2001. – С. 194.

7. Белозеров Б.П., Дурновцев В.Я. Определение точности механической обработки деталей статистическим методом: практическое руководство. – 2-е изд., перераб. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 25.

8. Hu S. (Hu, Sai); Kan YC (Kan Yin-Chiu); Hsu LT (Hsu Li-Ta). Localization Uncertainty Constrained Lateral PID Control with Aids of Fuzzy Logic Considering LiDAR NDT Matching Error // *AIMS Mathematics*. – 13 October 2021. – Vol. 53. – № 1. – P. 27–42.

9. Chen Y. Email Author, Wu J., Lan J. Study on weighted-based noniterative algorithms for centroid type-reduction of interval type-2 fuzzy logic systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/7325053>

10. Субботин С.А. Метод синтеза нейро-нечетких моделей количественных зависимостей для решения задач диагностики и прогнозирования // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. – 2010. – 1(22). – С. 121–127.

11. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов // *Научные труды Sworld*. – 2015. – 4(41). – С. 41–47.

12. К вопросу об обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ / Ю.В. Максимов, А.А. Бекаев, М.А. Надольский, А.В. Прохо-

ров // Известия Моск. гос. техн. ун-та «МАМИ». – 2012. – № 2(14). – С. 129–130.

13. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 131.

14. Васильев А.С., Дальский А.М. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. д-ра техн. наук А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2013. – С. 352.

15. Качество машин: справочник: в 2 т. Т. 1 / сост. А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]. – М.: Машиностроение, 2011. – С. 256.

16. Качество машин: справочник: в 2 т. Т. 2 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]. – М.: Машиностроение, 2011. – С. 325.

17. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов: монография. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2012. – С. 188.

18. Симонов А.М., Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга: монография. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – С. 118.

19. Губин В.И., Остапков В.Н. Статистические методы обработки экспериментальных данных: учеб. пособие для студ. техн. вузов. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2007. – С. 202.

20. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Минск: Изд-во БГУ, 1982. – С. 156.

21. Bergmann M. An Introduction to Many-Valued and Fuzzy-Logic Semantics, Algebras and Derivation Systems. – Cambridge University Press, 2008.

22. Kohonen T. Self-organizing maps. – 3 ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer, 2001.

23. Zadeh L.A. Fuzzy set // Information and control. – 1965. – № 8. – P. 338.

24. Mamdani E.A. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Trans. Computers. – 1977. – Vol. C26, № 12. – P. 1182–1191.

25. Kosmann-Schwartzbach Y., Grammaticos B., Tamizhmani K.M. Integrability on nonlinear systems. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer, 1997.

## References

1. Neizvestnykh A.G., Krylov E.G. Analiz tochnosti obrabotki detalei na stankakh s ChPU [Analysis of the accuracy of machining parts on CNC machines]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, vol. 4, no. 9(47), pp. 89-91.

2. Lysenko A.F. K otsenke pogreshnosti obrabotki detalei pri intellektual'nom upravlenii stankom [To the estimation of the error of machining parts with intelligent machine control]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 14, no. 3(78), pp. 96-102.

3. Kuznetsov A.S. Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti pri obrabotke na stankakh s ChPU [Technological assurance of accuracy when machining on CNC machines]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 2, pp. 165-170.

4. Kozinskii V.S. Primenenie metoda konechnykh elementov i tonkostennykh trekhslonnykh detalei iz PKM v mashinostroenii [Application of the finite element method and thin-walled three-layer PCM parts in mechanical engineering]. *Aktual'nye napravleniia nauchnykh issledovani: ot teorii k praktike. Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2016, no. 1(7), pp. 200-202.

5. Tugengol'd A.K., Luk'ianov E.A., Gerasimov V.A. Sistema upravleniia stankom, obespechivaiushchaia povyshennuiu tochnost' obrabotki [Machine control system for increased machining accuracy]. *STIN*, 1999, no. 8, pp. 21-26.

6. Ivanov V.A., Novoselov V.V., Nekrasov Iu.I., Shakhodanov Iu.I. Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti i matematicheskoe modelirovanie protsessov mekhanoobrabotki v mashinostroenii [Technological support for accuracy and mathematical modeling of machining processes in mechanical engineering]. Tiumen': Tiumenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet, 2001, 194 p.

7. Belozerov B.P., Durnovtsev V.Ia. Opredelenie tochnosti mekhanicheskoi obrabotki detalei statisticheskim metodom: prakticheskoe rukovodstvo [Determining the accuracy of machining parts by a statistical

method: a practical guide]. 2nd ed. Seversk: Severskii tekhnologicheskii institut - filial Natsional'nogo issledovatel'skogo iadernogo universiteta "MIFI", 2010, 25 p.

8. Hu S. (Hu, Sai); Kan YC (Kan Yin-Chiu); Hsu LT (Hsu Li-Ta). Localization Uncertainty Constrained Lateral PID Control with Aids of Fuzzy Logic Considering LiDAR NDT Matching Error. *AIMS Mathematics*, 13 October 2021, vol. 53, no. 1, pp. 27-42.

9. Chen Y. Email Author, Wu J., Lan J. Study on weighted-based noniterative algorithms for centroid type-reduction of interval type-2 fuzzy logic systems, available at: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/7325053>

10. Subbotin S.A. Metod sinteza neuro-nechetkikh modelei kolichestvennykh zavisimosti dlia resheniia zadach diagnostiki i prognozirovaniia [Method of synthesis of neuro-fuzzy models of quantitative dependencies for solving problems of diagnostics and forecasting]. *Radioelektronika, informatika, upravlenie*, 2010, 1(22), pp. 121-127.

11. Zhdanov A.A., Plotnikov A.L., Chigirinskii Iu.L., Firsov I.V. Matematicheskaia model' utocneniia rezhimov rezaniia dlia obespecheniia tochnosti tokarnoi obrabotki nezhestkikh valov na stankakh s ChPU [Mathematical model for refining cutting conditions to ensure the accuracy of turning non-rigid shafts on CNC machines]. *Nauchnye trudy Sworld*, 2015, 4(41), pp. 41-47.

12. Maksimov Iu.V., Bekaev A.A., Nadol'skii M.A., Prokhorov A.V. K voprosu ob obespechenii tochnosti obrabotki na stankakh s ChPU [On the issue of ensuring the accuracy of processing on CNC machines]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta "MAMI"*, 2012, no. 2(14), pp. 129-130.

13. Fokin V.G. Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [Finite Element Method in Solid Mechanics]. Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, 131 p.

14. Vasil'ev A.S., Dal'skii A.M. Napravlennoe formirovanie svoistv izdelii mashinostroeniia [Directed formation of properties of mechanical engineering products]. Ed. Doctor of Technical Sciences A.I. Kondakov. Moscow: Mashinostroenie, 2013, 352 p.

15. Suslov A.G., Braun E.D., Vitkevich N.A. et al. Kachestvo mashin: spravochnik. Tom 1 [Machine quality: a guide. Vol. 1]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 256 p.

16. Suslov A.G., Braun E.D., Vitkevich N.A. et al. Kachestvo mashin: spravochnik. Tom 2 [Machine quality: a guide. Vol. 2]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 325 p.

17. Ostapchuk A.K., Ovsiannikov V.E. Nauchnye osnovy obespecheniia sherokhovatosti poverkhnosti na baze analiza sluchainykh protsessov [Scientific basis for ensuring surface roughness based on the analysis of random processes]. Kurgan: Kurganskii gosudarstvennyi universitet, 2012, 188 p.

18. Simonov A.M., Ostapchuk A.K., Ovsiannikov V.E. Osnovy obespecheniia kachestva poverkhnosti detalei mashin s ispol'zovaniem dinamicheskogo monitoringa [Fundamentals of surface quality assurance of machine parts using dynamic monitoring]. Kurgan: Kurganskii gosudarstvennyi universitet, 2010, 118 p.

19. Gubin V.I., Ostashkov V.N. Statisticheskie metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Statistical methods for processing experimental data]. Tiumen': Tiumenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet, 2007, 202 p.

20. Krasovskii G.I., Filaretov G.F. Planirovanie eksperimenta [Experiment planning]. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 1982, 156 p.

21. Bergmann M. An Introduction to Many-Valued and Fuzzy-Logic. Semantics, Algebras and Derivation Systems. Cambridge University Press, 2008.

22. Kohonen T. Self-organizing maps. 3 ed. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo, Springer, 2001.

23. Zadeh L.A. Fuzzy set. *Information and control*, 1965, no. 8, 338 p.

24. Mamdani E.A. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Trans. Computers*, 1977, vol. C26, no. 12, pp. 1182-1191.

25. Kosmann-Schwartzbach Y., Grammaticos B., Tamizhmani K.M. Integrability on nonlinear systems. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo, Springer, 1997.

### **Сведения об авторах**

**Овсянников Виктор Евгеньевич** (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: vik9800@mail.ru).

**Некрасов Роман Юрьевич** (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru).

**Темпель Юлия Александровна** (Тюмень, Россия) – старший преподаватель Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: tempeljulia@mail.ru).

**Васильев Валерий Иванович** (Курган, Россия) – доктор технических наук, профессор Курганского государственного университета (640020, Курган, ул. Советская, 63 стр.4, e-mail: vviprof@rtural).

### **About the authors**

**Viktor E. Ovsyannikov** (Tyumen, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Tyumen Industrial University (625000, 38, Volodarskogo str., Tyumen, e-mail: vik9800@mail.ru).

**Roman Yu. Nekrasov** (Tyumen, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department "Technology of mechanical engineering" Tyumen Industrial University (625000, 38, Volodarskogo str., Tyumen, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru).

**Yulia A. Tempel** (Tyumen, Russian Federation) – Senior Teacher Tyumen Industrial University (625000, 38, Volodarskogo str., Tyumen, e-mail: tempeljulia@mail.ru).

**Valery I. Vasiliev** (Kurgan, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor Kurgan State University (640020, Kurgan, 63, str. 4 Soveskaja str., e-mail: vviprof@rtural).

Получено 24.02.2021