



Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с числовым программным управлением

Е.М. Кузнецова^{1✉}, В.Е. Овсянников², Р.Ю. Некрасов³, У.С. Путилова⁴

¹Курганский государственный университет, Курган, Россия

^{2,4}Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Резюме. Цель – повышение качества поверхности деталей тел вращения, которые изготовлены из закаленных сталей, в ходе обработки на токарных станках с числовым программным управлением. Объектом исследования является шероховатость поверхности деталей. В процессе исследования были использованы методы системного анализа и синтеза систем, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, организации эксперимента, обработки результатов эксперимента. Разработана декомпозиционная схема структуры экспертной системы, позволяющая сформулировать требования к будущей экспертной системе мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости. В результате исследований установлено, что используемые в практике модели описания взаимосвязи между параметрами качества поверхности деталей и технологическими режимами, которые применяются при технологическом обеспечении шероховатости, дают высокую погрешность (более 20%). Обоснована возможность применения моделей, которые основаны на искусственном интеллекте и содержат в своем составе нейросетевые блоки и устройства принятия решений, построенные на базе нечеткой логики. Показано, что такое сочетание дает возможность индивидуальной настройки системы на обработку деталей определенной номенклатуры, а также более корректной оценки наступления катастрофического износа режущего инструмента. Доказано, что нейронечеткая модель имеет погрешность не более 10%, что значительно ниже, чем при использовании спектральных или корреляционных моделей. В результате тестовых испытаний экспертной системы мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее. Таким образом, использование разработанной системы позволяет более корректно оценивать износ режущего инструмента и определять наступление предельного состояния.

Ключевые слова: шероховатость, закаленные стали, технологическое обеспечение, станок с ЧПУ, экспертная система

Для цитирования: Кузнецова Е.М., Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С. Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с числовым программным управлением // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 418–426. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-418-426>. EDN: WNRBPW.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines

Elena M. Kuznetsova^{1✉}, Viktor E. Ovsyannikov², Roman Yu. Nekrasov³, Ulyana S. Putilova⁴

¹Kurgan State University, Kurgan, Russia

^{2,4}Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. This work addresses the problem of improving the surface quality of parts of rotation bodies, which are made of hardened steels, in the course of their machining on lathes with numerical program control. The research object was the surface roughness of parts. The methodology involved system analysis and synthesis, artificial neural

networks, fuzzy logic, experiment, and processing of experimental results. A decomposition scheme for the expert system structure was developed, which can be used as the basis for formulating requirements to a future expert system for monitoring and prediction of roughness parameters. It was established that the models currently applied to describe the relationship between surface quality and the technological regimes used to ensure the technological level of roughness give a high error of over 20%. The possibility of using models that apply artificial intelligence and contain neural network blocks and decision-making devices based on fuzzy logic is substantiated. It is shown that such a combination makes it possible to customize the system for processing parts of a certain production range, as well as a more correct assessment of the onset of catastrophic wear of cutting tools. The neuro-fuzzy model was confirmed to have an error of less than 10%, which is significantly lower than when using spectral or correlation models. According to the testing results, the proposed expert system for monitoring and prediction of roughness parameters enables a 2.5-fold reduction in the scatter of roughness parameters under an increase in tool wear, compared to without its application. Thus, the proposed system makes it possible to assess the level of cutting tool wear more correctly and determine the onset of its limit state.

Keywords: roughness, hardened steels, process support, CNC machine, expert system

For citation: Kuznetsova E.M., Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Putilova U.S. Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):418-426. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-418-426>. EDN: WNRBPW.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях среднесерийного производства решение задачи по технологическому обеспечению требуемых выходных параметров процесса механической обработки базируется на использовании предварительной настройки технологического оборудования [1, 2]. Суть заключается в том, что на этапе настройки определяются значения режимов резания и других параметров процесса обработки [3, 4], которые позволяют получать заданные параметры точности размеров и качества поверхностного слоя в автоматическом формате.

Однако эффективность такого подхода ограничивается тем, что действующие на технологическую систему возмущающие воздействия приводят к возникновению погрешностей и, как следствие, могут вызывать появление брака. Одним из таких факторов является износ режущего инструмента. Вследствие износа режущего инструмента происходит увеличение усилий резания, деформаций элементов технологической обрабатывающей системы, рост температуры в зоне резания и увеличение вибраций [5, 6]. В конечном итоге наступает такое состояние, когда требуется замена инструмента. Применительно к случаю чистовой обработки проблема усугубляется тем, что переход из одного состояния в другое может произойти почти мгновенно. Качественно это можно оценить как потерю технологической системой устойчивости [7, 8]. Наступление данного факта можно отследить, например, на основе мониторинга вибраций (рис. 1).

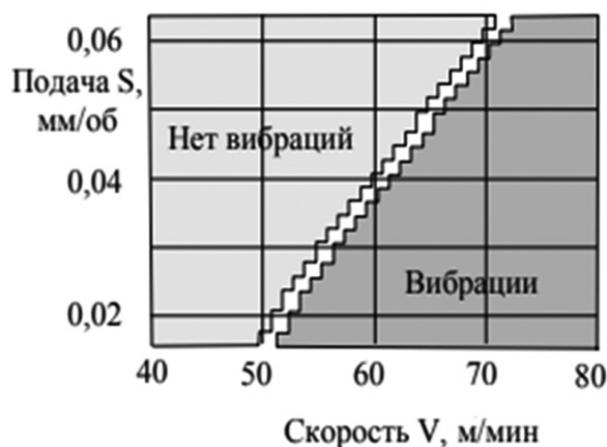


Рис. 1. Характеристика областей по устойчивости [9]

Fig. 1. Area robustness characteristics [9]

Так как в рамках данной статьи рассматривается обработка закаленных сталей, то помимо указанных выше факторов в расчет нужно принимать еще колебания свойств обрабатываемого материала и другие стохастические факторы. Все это приводит к тому, что граница перехода из одного состояния в другое является нечеткой [10, 11]. Изменение шероховатости поверхности (R_a) в зависимости от времени работы резца имеет нечеткий характер вследствие нечеткого изнашивания режущей части инструмента, что приводит к появлению области рассеяния значений получаемой шероховатости (R_{ah}) (рис. 2).

В современных условиях требуется сокращение трудоемкости технологической подготовки производства и одновременное увеличение эффективности эксплуатации оборудования и инструмента. В данном свете можно рассмотреть применение ме-

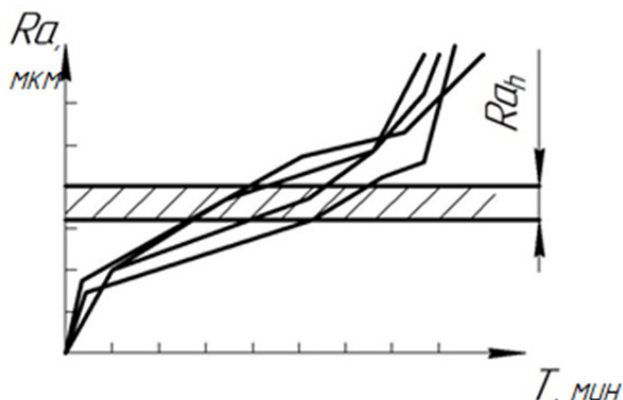


Рис. 2. Нечеткая граница изменения шероховатости обработанной поверхности в зависимости от времени работы резца [11]

Fig. 2. Fuzzy boundary of roughness variation of machined surface depending on cutter operation time [11]

тодологического подхода индустрии 4.0 [12, 13] – концепцию цифровых двойников. Уже сегодня применение цифровых двойников позволяет повысить эффективность эксплуатации оборудования и исключить аварийные ситуации на основе прогнозирования их наступления. Однако применяемые решения распространены в основном на медленно протекающие во времени процессы, кроме того, вопросы обработки информации в решении указанных выше задач все равно возложены на человека. Обработка же заготовок из закаленных сталей сопровождается именно интенсивным изнашиванием режущего инструмента. Во многом это является причиной того, что шероховатость обработанных деталей отличается высокой нестабильностью.

Для решения проблемы обеспечения качества поверхностного слоя при обработке на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) необходимо прежде всего иметь надежный источник информации, который позволяет оценивать выходные параметры процесса. С учетом требований физического подобия необходимо, чтобы оценочные показатели были безразмерными величинами и имели общую природу с выходными величинами (в нашем случае с шероховатостью) [14, 15]. Следующей проблемой, которую необходимо решить, является неопределенность данных (колебания свойств обрабатываемого материала, параметры обрабатывающей системы и т.д.). Таким образом, реализация указанных выше

подходов должна быть представлена в виде системы мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости, а также учитывать состояние режущего инструмента.

Цель данной работы – повышение качества поверхности деталей тел вращения, которые изготовлены из закаленных сталей, в ходе обработки на токарных станках с ЧПУ. Выполненные исследования заключаются в выборе методологического аппарата, который может быть использован для экспертной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы методы системного анализа, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, организации эксперимента, обработки результатов эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведена декомпозиционная схема структуры прилагаемой экспертной системы.

В ходе анализа рассматриваются альтернативные варианты X_{ε}^{β} . Количество целевых условий S принималось в диапазоне от 2 до 4. Оставшиеся блоки содержат G ограничений. Данные для анализа представляются в виде множеств [16, 17]:

$$X = \{X_s, X_G\}, x \in R_n. \quad (1)$$

При этом вводятся весовые коэффициенты λ , для которых выполняются следующие соотношения:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_S; \quad (2)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_S = 1. \quad (3)$$

Таким образом, используя выражения (2) и (3), имеется возможность ранжирования данных, которые представлены в табл. 1.

После ранжирования можно выбрать предпочтительные альтернативы:

$$\max \lambda_i G_1 \rightarrow X_{G_1}^{\beta}, \dots, \max \lambda_i G_1^{\beta} \rightarrow X_G^{\beta}. \quad (4)$$

На основании проведенного анализа можно сделать выводы, что экспертная система предусматривает:

Таблица 1. Декомпозиционная схема экспертной системы
Table 1. Expert system decomposition diagram

X_{ξ} Первый уровень декомпозиции		X_{ξ}^{β} Второй уровень декомпозиции	
X_1	Точность и скорость обработки измерений	X_1^1 X_1^2	Задается программой Не регулируется
X_2	Совместимость с системами верхнего уровня	X_2^1 X_2^2	Совместима Не совместима
X_3	Визуализация полученной информации	X_3^1 X_3^2 X_3^3	Цифровые индикаторы Панель управления SCADA система
X_4	Предварительная обработка сигналов	X_4^1 X_4^2	Не требуется Требуется
X_5	Опрос датчиков	X_5^1 X_5^2 X_5^3	Однократно по запросу В режиме реального времени По запросу и в режиме реального времени
X_6	Сохранение полученной информации	X_6^1 X_6^2	Отсутствует Электронный журнал измерений
X_7	Режим работы системы	X_7^1 X_7^2 X_7^3	Ручной Автоматический Ручной и автоматический
X_8	Управление системой измерений	X_8^1 X_8^2	Не автоматизированное Автоматизированное
X_9	Режим работы устройства для принятия решений	X_9^1 X_9^2	Расчет модели в реальном времени Расчет модели экспертной системой

Таблица 2. Результаты расчета весовых коэффициентов
Table 2. Calculation results of weight factors

X_{Gj}	X_{Gj}^{β}	$X_{S1} = X_2^1; \lambda_1 = 0,5$		$X_{S2} = X_8^2; \lambda_2 = 0,5$	
		λ_{1Gj}^{β}		λ_{2Gj}^{β}	
		Код	Значение	Код	Значение
$X_{G1} = X_1$	$[X_1^1]$	1	0,5	2	0,25
	X_1^2	3	0	2	0,25
$X_{G2} = X_3$	X_3^1	3	0	2	0,17
	X_3^2	3	0	2	0,17
	$[X_3^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G3} = X_4$	X_4^1	3	0	2	0,25
	$[X_4^2]$	1	0,5	2	0,25
$X_{G4} = X_5$	X_5^1	2	0,17	3	0
	X_5^2	2	0,17	3	0
	$[X_5^3]$	2	0,17	1	0,5
$X_{G5} = X_6$	X_6^1	2	0,25	3	0
	$[X_6^2]$	2	0,25	1	0,5
$X_{G6} = X_7$	X_7^1	3	0	2	0,17
	X_7^2	3	0	2	0,17
	$[X_7^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G7} = X_9$	X_9^1	2	0,25	3	0
	$[X_9^2]$	2	0,25	1	0,5

– совместимость с системами верхнего уровня (X_2^1);
– автоматизированное управление системой измерений (X_8^2);
обеспечивает:
– задаваемую программой точность и скорость обработки измерений (X_1^1);
– визуализацию полученной информации с помощью SCADA систем (X_3^3);

– предварительную обработку сигналов (X_4^2);
– опрос датчиков, запускаемый по запросу и в режиме реального времени (X_5^3);
– сохранение полученной информации в электронный журнал измерений (X_6^2);
– работу системы как в ручном (для наладки), так и в автоматическом режиме (X_7^3);
– расчет модели устройства принятия решений экспертной системой (X_9^2).



Рис. 3. Средняя погрешность моделей [18, 19]: 1 – модель «пространство состояний», 2 – модель «скользящее среднее»; 3 – спектральная модель; 4 – корреляционная модель; 5 – нейро-нечеткая модель

Fig. 3. Average error of models [18, 19]: 1 – state space model, 2 – moving average model; 3 – spectral model; 4 – correlation model; 5 – neuro-fuzzy model

На рис. 3 приведена средняя погрешность моделей, которые могут быть использованы для описания связей между блоками экспертной системы.

Как видно из рис. 3, применение нейро-нечетких моделей позволяет получить наименьшую погрешность (не более 10%).

В ходе работы экспертной системы осуществляется коррекция подачи по мере износа режущего инструмента.

На рис. 4 представлены результаты обработки тестовых деталей с применением коррекции подачи (зависимость шероховатости поверхности от времени обработки (T_0), а на рис. 5 – без нее.

В результате тестовых испытаний системы установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее.

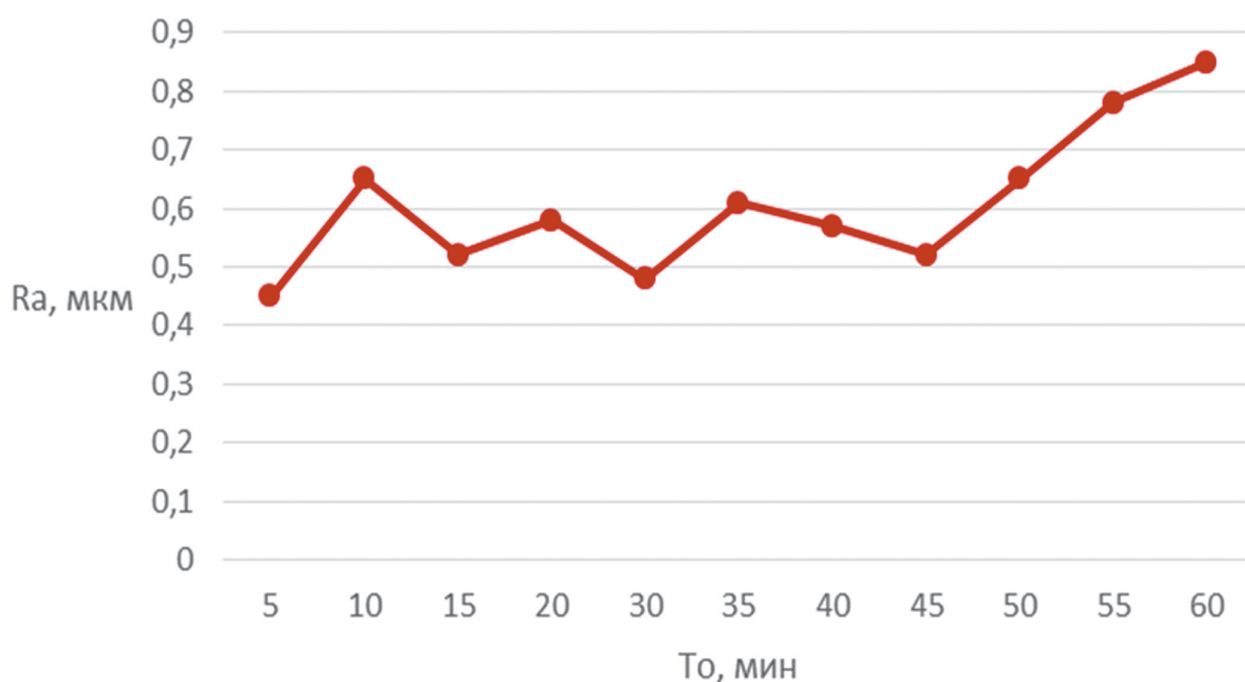


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки с коррекцией подачи

Fig. 4. Surface roughness vs processing time with feed correction

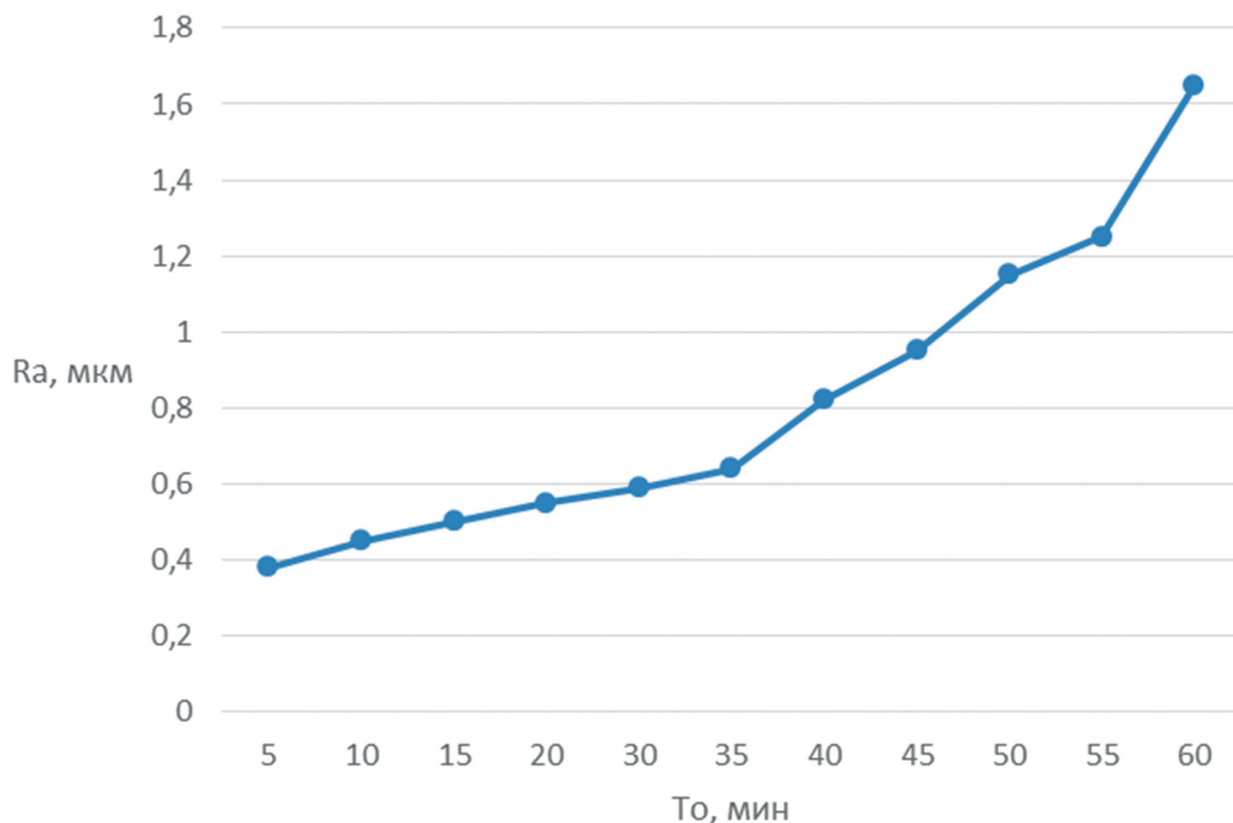


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки без коррекции подачи
Fig. 5. Surface roughness vs processing time without feed correction

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная экспертная система, основанная на использовании нечеткой логики и искусственных нейронных сетей [20], позволяет аппроксимировать зависимости между входными параметрами (технологическими режимами) и параметрами качества поверхностного слоя с погрешностью, не превышающей 10%, что дает более точный результат, чем при использовании классических моделей, применяющих спектральные и корреляционные функции.

Выполненный системный анализ позволил аргументированно сформулировать требования к создаваемой экспертной системе. В результате тестовых испытаний системы установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее. Также использование системы позволяет более корректно оценивать износ режущего инструмента и определять наступление предельного состояния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнова Е.Н., Крылов Е.Г. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов с учетом технологической наследственности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 13. С. 100–102. EDN: ONCNMF.
2. Карлина Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 17–23. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23) EDN: WQHCPV.
3. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.
4. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. Vol. 31. No. 3. P. 85–98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
5. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures // Materials Research Proceedings (Temryuk, 6–10 September 2021). Temryuk, 2022. P. 323–328. <https://doi.org/10.21741/97816444901755-57>. EDN: ZBJDOB.

6. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools // *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. P. 220–225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
7. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction in cutting // *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43. No. 4. P. 451–456. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X23050088>.
8. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
9. Кабалдин Ю.Г., Иванов С.В., Башков А.А. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2024. № 13. С. 150–156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFIAU.
10. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 112. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023)*. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Галеев Н.Р., Галеев Ф.Р. Проявление Индустрии 4.0 в различных сферах экономики России // *Лучшая научная работа 2022: сб. ст. V Междунар. науч.-иссл. конкурса, (г. Пенза, 20 мая 2022 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 57–62. EDN: QKZWCG.
13. Старостина В.А. Индустрия 4.0: понятие, ключевые технологии, тенденции, препятствия // *Актуальные вопросы экономики: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 20 декабря 2020 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 193–195. EDN: JUSQKO.
14. Безъязычный В.Ф., Паламарь И.Н. Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2021. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
15. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
16. Пухов А.С., Иванова И.А. Структурный синтез оптимальных систем управления // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2013. № 29. С. 107–110. EDN: RCJLJB.
17. Пухов А.С. Организационно-технические и экологические принципы создания автоматизированных систем // *Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (с. Лесниково, 25–26 мая 2017 г.)*. Лесниково: Курганская гос. сельскохозяй. акад. им. Т.С. Мальцева, 2017. С. 336–342. EDN: YQXKK.
18. Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А., Васильев В.И. Использование нейро-нечетких моделей при обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2021. № 3. С. 249–253. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-249-253>. EDN: OFEIS.
19. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturva E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022. No. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 3. P. 220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.

References

1. Smirnova E.N., Krylov E.G. Issues of technological process computer-aided design based on technological heredity. *Bulletin of the Technological University*. 2011;13:100-102. (In Russ). EDN: ONCNMF.
2. Karlina Yu.I. Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:17-23. (In Russ). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23). EDN: WQHCPV.
3. Bezyazychnyy V.F. *Similarity method in mechanical engineering technology: monograph*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya; 2021, 356 p. (In Russ).
4. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019;31(3):85-98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.

5. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures. In: *Materials Research Proceedings*. 6–10 September 2021, Temryuk. Temryuk; 2022, p. 323-328. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-57>. EDN: ZBJDOB.
6. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools. *Key Engineering Materials*. 2022;910:220-225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
7. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction in cutting. *Russian Engineering Research*. 2023;43(4):451-456. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X23050088>.
8. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Shchetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
9. Kabaldin Yu.G., Ivanov S.V., Bashkov A.A. Tribosystem stability control under external friction and cutting based on the algorithms of nonlinear dynamics, fractal theory and neural network modeling. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;13:150-156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. (In Russ). EDN: NXFIAU.
10. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:202-213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference*. 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Galeev N.R., Galeev F.R. Development of industry 4.0 in various areas of the Russian economy. In: *Luchshaya nauchnaya rabota 2022: sbornik statej V Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa = Best Scientific Work 2022: Collected articles of the 5th International scientific and research competition*. 20 May 2022, Penza, Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2022, p. 57-62. (In Russ). EDN: QKZWCG.
13. Starostina V.A. Industry 4.0: concept, key technologies, trends, obstacles. In: *Aktual'nye voprosy ekonomiki: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual issues of economics: collected articles of the 4th International scientific and practical conference*. 20 December 2020, Penza, Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2020, p. 193-195. (In Russ). EDN: JUSQKO.
14. Bezyazychnyy V.F., Palamar' I.N. Current aspects in automation of scientific researches of machinery surface quality using machine learning methods. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2021;7:12-19. (In Russ). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
15. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022;8(1):1-11. (In Russ). <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
16. Pukhov A.S., Ivanova I.A. Structural synthesis of optimum control systems. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2013;29:107-110. (In Russ). EDN: RCJLJB.
17. Pukhov A.S. Organizational, technical and environmental principles for automated system creation. In: *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti: problemy i resheniya – 2017: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Life Safety: Problems and Solutions - 2017: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 25–26 May 2017, Lesnikovo. Lesnikovo: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev; 2017, 336-342. (In Russ). EDN: YQXKK.
18. Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Tempel' Yu.A., Vasiliev V.I. Use of neuro-fuzzy models while ensuring accuracy of machining on CNC machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences*. 2021;3:249-253. (In Russ). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-249-253>. EDN: OFEELS.
19. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022;103:88-95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDLF.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220-222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Елена Михайловна,
старший преподаватель кафедры автоматизации
производственных процессов,
Курганский государственный университет,
640669, г. Курган, ул. Советская, 63/4, Россия
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena M. Kuznetsova,
Senior Lecturer of the Department of Industrial Process
Automation,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669, Russia
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

Овсянников Виктор Евгеньевич,

д.т.н., доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Некрасов Роман Юрьевич,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Путилова Ульяна Сергеевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
putilovaus@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4128-4129>

Viktor E. Ovsyannikov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Roman Yu. Nekrasov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Ulyana S. Putilova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Mechanical Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
putilovaus@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4128-4129>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2024 г.; принята к публикации 30.08.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 23.06.2024; accepted for publication 30.08.2024.