

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.23-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.23-29.

Научная статья
УДК 621.91
doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации

Александр Николаевич Унянин¹, д.т.н.

Павел Рамдисович Финагеев², вед. инж.-констр.

¹ ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Россия

² АО «Фрест», Ульяновск, Россия

¹ a_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

² pavel_finageev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5143-7929>

Аннотация. Разработана методика коррекции режима механической обработки с изменяющимися во времени параметрами. Методика позволяет минимизировать влияние неопределенности технологической информации, обусловленной некорректностью математических зависимостей и моделей, используемых для расчета параметров процесса, и отсутствием исходных данных для выбора параметров математических моделей, и предусматривает коррекцию зависимостей и моделей по данным текущей информации о выходных параметрах. Коррекция элементов режима выполняется по результатам сравнения расчётных и фактических значений выходных и текущих параметров процесса. Определяются расчётные функции изменения выходных параметров во времени. Методика определения взаимосвязанных текущих и выходных параметров процесса обработки позволяет рассчитать их значения в зависимости от времени наработки инструмента. По результатам сравнения расчётных значений параметров процесса со значениями, которые должны быть получены в момент времени, равный периоду стойкости инструмента, выполняется коррекция элементов режима. Если расчётные значения выходных параметров не превышают их предельные значения, то следует интенсифицировать режим обработки, чтобы увеличить производительность. Определяются интервалы варьирования управляемыми факторами, позволяющие изменить выходные параметры в момент, равный периоду стойкости инструмента, на необходимую величину. При расчетах интервалов варьирования управляемыми факторами на первых этапах коррекции режима ориентируются на исходные модели и зависимости, описывающие процесс. Необходимый результат может быть не достигнут по причине неопределенности информации, в том числе некорректности моделей. Поэтому при необходимости реализуются последующие этапы коррекции режима. Ориентируясь на фактические значения выходных параметров, корректируются модели процесса, а интервалы варьирования управляемыми параметрами рассчитываются с использованием скорректированных моделей. Применение разработанной методики коррекции режима позволяет увеличить производительность точения на 30...35 % при обеспечении на протяжении заданного периода стойкости инструмента требуемого качества обработанных деталей.

Ключевые слова: точение, режим обработки, неопределенность, технологическая информация, коррекция, шероховатость, погрешность

Для цитирования: Унянин А.Н., Финагеев П.Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty

Alexander N. Unyanin¹, D. Eng.

Pavel R. Finageev², PDE

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² JSC «Frest», Ulyanovsk, Russia

¹ a_un@mail.ru

² pavel_finageev@mail.ru

Abstract. A technique for correcting a machining mode with time-varying parameters has been developed. The technique allows minimizing the impact of the uncertainty of technological information caused by the incorrectness of mathematical dependencies and models used for calculating the parameters of the process or due to the lack of initial data for the selection of parameters of mathematical models. It provides for the corrective dependencies and models according to the current information with respect to the output parameters. The correction of the mode elements is performed according to the results of comparing the calculated and actual values of the output and current process parameters. The calculated functions of changing the output parameters over time are determined. The routine for determining the interrelated current and output parameters of the processing process allows calculating their values depending on the operating time of the tool. According to the results of comparing the calculated values of the process parameters with the values that should be obtained at a time equal to the efficient tool life, the correction of the mode elements is performed. If the calculated values of the output parameters do not exceed their limit values, then the operation mode should be intensified for the sake of increasing productivity. The intervals of variation by controlled factors are determined, which allow changing the output parameters at a time equal to the efficient tool life by the desired value. When calculating the intervals of variation by controlled factors at the first stages of mode adjustment, they are guided by the initial models and dependencies describing the process. The necessary result may not be achieved due to the uncertainty of the information, including the incorrectness of the models. Therefore, if necessary, the subsequent stages of mode adjustment are put into operation. Based on the actual values of the output parameters, the process models are adjusted, and the variation intervals by controlled parameters are calculated using adjusted models. The application of the developed method of mode correction makes it possible to increase the turning performance by 30...35 % while ensuring the required quality of the machined parts within a given period of tool durability.

Keywords: turning, operation mode, uncertainty, technological information, adjustment, roughness, error

For citation: Unyanin A.N., Finageev P.R. Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Проблема назначения рационального режима процесса механической обработки является одной из важнейших в области металлообработки. От режима зависит производительность процесса, качество и стоимость изготовленных деталей.

Эффективным методом назначения режима является расчётный, предусматривающий использование математических зависимостей и моделей, связывающих выходные и входные параметры процесса обработки. Однако, используемые зависимости и модели не всегда корректно отражают взаимосвязь параметров процесса. Многие модели не учитывают влияния ряда управляемых и неуправляемых параметров процесса. Часто отсутствует информация, необходимая для расчета. Многие зависимости и модели получены

эмпирическим путём и показывают адекватные результаты лишь в тех условиях, в которых они были получены. В каталогах режущего инструмента элементы режима резания указаны, как правило, диапазоном значений, что осложняет выбор рационального режима. Поэтому часто возникает необходимость коррекции назначенного режима.

Износ режущего инструмента, а следовательно, силы резания, температура в зоне резания и параметры качества изготовленных деталей изменяются с увеличением времени работы инструмента. Колебания припуска и твердости материала заготовки, изменение жесткости технологической системы и другие неуправляемые факторы также влияют на выходные параметры процесса. Вышеприведённые причины ведут к неопределённости

информации, связанной с отсутствием корректных математических моделей и исходных данных для расчета выходных параметров в зависимости от условий обработки и элементов режима резания.

Одним из способов повышения эффективности механической обработки является применение систем автоматического управления станками. Системы с обратной связью позволяют компенсировать возмущающие факторы как систематического, так и случайного характера (колебания механических свойств материала заготовки, припуска на обработку и др.) и обеспечить заданное качество деталей при максимально возможной производительности. Разработаны системы управлением параметрами качества поверхностного слоя заготовки, в том числе микрогеометрией [1, 2].

Система автоматического управления режимом резания на основе нечёткой логики позволяет при различных режимах обработки поддерживать тангенциальную составляющую силы резания и температуру в зоне обработки на постоянном уровне [3]. Недостатком данной системы является то, что она не позволяет адекватно оценить износ инструмента и его влияние на выходные параметры (шероховатость и микротвёрдость поверхностного слоя, точность размеров и др.).

А. Аласкари и С.Е. Ораби разработали адаптивную систему управления процессом черновой токарной обработки [4]. Авторы предлагают подход, основанный на применении рекурсивных непрерывных итераций для прогнозирования (расчёта) величины износа резца по задней поверхности, сил резания и потребляемой мощности. Исследования выполнены с целью обеспечения максимальной скорости съёма материала заготовки. Однако, авторы не учли влияние изменения элементов режима на выходные параметры процесса обработки, в том числе на параметры качества деталей.

Количество выходных и текущих параметров, по результатам измерения которых вырабатывается управляющее воздействие с помощью большинства систем автоматического управления, ограничено: большинство систем реагируют лишь на один параметр (чаще всего параметр шероховатости

обработанной поверхности или упругую деформацию одного из элементов технологической системы), а из всего разнообразия управляющих воздействий также выбирается лишь одно – в большинстве случаев скорость подачи. Если управляющее воздействие определять, ориентируясь лишь на один выходной или текущий параметр процесса, то можно получить недопустимые значения других параметров.

А.Н. Иноземцев [5] предложил метод рекурсивного стохастического самообучения, однако технологический процесс представлен как система с одним управляемым (скорость резания) и одним выходным (период стойкости инструмента) параметром.

Анцев А.В. разработал зависимости для расчета периода стойкости режущего инструмента, которые учитывают стохастичный характер процесса резания, и методику назначения оптимальных режимов резания, предусматривающую обработку с максимально возможными значениями подачи, глубины и скорости резания, ограниченной экономической скоростью и скоростью, обеспечивающей максимальную производительность [6].

Перспективными являются системы, которые позволяют управлять значениями выходных параметров (шероховатость обработанной поверхности и размер детали) с учетом изменяющихся во времени параметров обработки [7].

Одним из путей уменьшения неточностей при расчете или назначении элементов режима в условиях неопределенности технологической информации является коррекция (подстройка) параметров математических моделей, отражающих взаимосвязь выходных и входных параметров, по данным текущей информации о выходных параметрах [8].

Цель исследований – оценка эффективности функционирования разработанной методики коррекции режима обработки, учитывающей изменение параметров процесса с увеличением времени наработки инструмента.

Разработанный алгоритм коррекции режима резания (рис. 1) позволяет учесть взаимное влияние текущих показателей процесса резания (износа инструмента, силы и температуры резания).

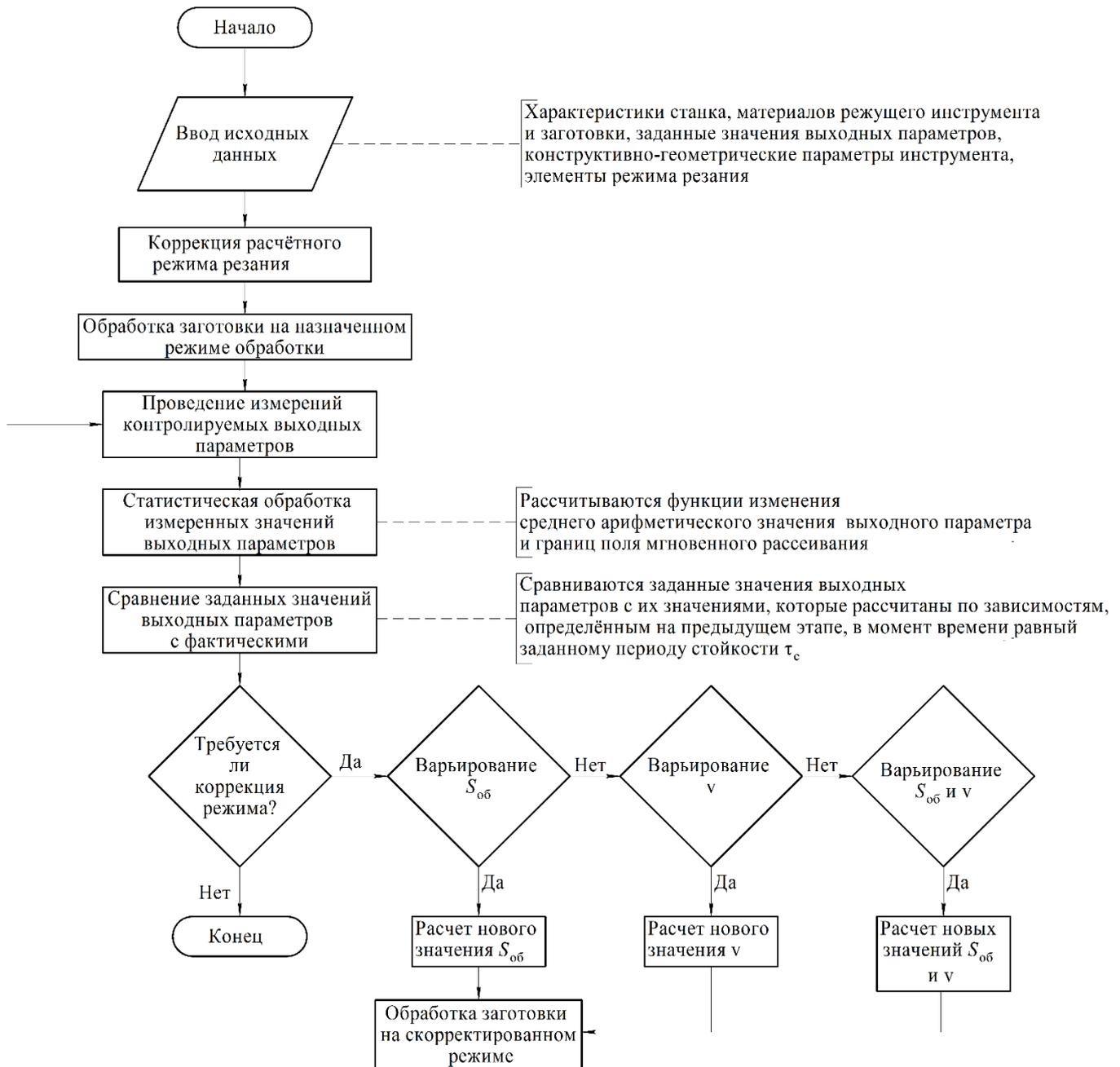


Рис. 1. Алгоритм коррекции режима резания:
 $S_{об}$ – подача инструмента; v – скорость резания

Fig. 1. Algorithm for adjusting the cutting mode:
 S_r – tool feed; v – cutting speed

Для этого предложен следующий подход. Время функционирования процесса обработки разбивается на интервалы Δt (рис. 2). Расчёты выходных и текущих параметров процесса выполняются для моментов времени $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{max}$.

На первом этапе назначается режим обработки по каталогу режущего инструмента

или рассчитывается по формулам теории резания. При необходимости производится коррекция назначенного (расчётного) режима с целью обеспечения заданного качества обработанных деталей при максимальной производительности процесса обработки. Для этого определяются расчётные функции изменения выходных параметров во времени. Сравняются

расчётные значения выходных параметров, которые должны быть получены в момент времени, равный периоду стойкости инструмента, с предельными (заданными) значениями выходных параметров. Производится коррекция режима, в результате которой обеспечивается резерв, равный нулю, по крайней мере, одного из выходных параметров процесса, при условии, что остальные выходные параметры будут иметь положительный резерв (запас). (Под резервом понимается разница между заданным (предельным) значением какого-либо выходного параметра и его расчетным или фактическим значением).

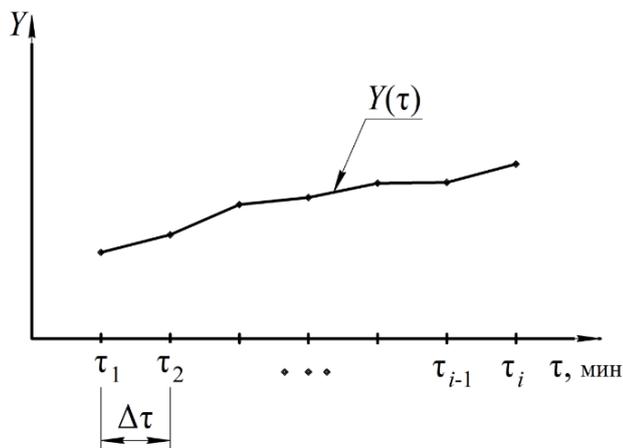


Рис. 2. Траектория изменения выходного параметра Y с увеличением времени наработки инструмента τ

Fig. 2. Trajectory of change of the output parameter Y with an increase in the operating time of the tool τ

На скорректированном режиме производится обработка партии заготовок и измеряются выходные параметры (например, параметры шероховатости обработанной поверхности и размер обработанной детали). Затем производится статистическая обработка фактических (измеренных) значений выходных параметров по методике, приведенной в работе [9], что позволяет определить фактические траектории изменения выходных параметров от времени наработки инструмента. Для статистической обработки фактических значений выходных параметров разработано программное обеспечение.

Если при назначенном режиме значение хотя бы одного выходного параметра в момент времени, равный периоду стойкости режущего инструмента, превышает предельное

(заданное) значение этого параметра, следует изменить (уменьшить) элементы режима, чтобы не допустить появления бракованных изделий. Если фактические значения выходных параметров не превышают их предельных значений, то следует интенсифицировать режим обработки, чтобы увеличить производительность.

Если принято решение корректировать подачу $S_{об}$ и скорость резания v , то следует выбрать один из трех возможных вариантов варьирования этими параметрами:

- варьирование только подачей $S_{об}$;
- варьирование только скоростью резания v ;
- варьирование подачей $S_{об}$ и скоростью резания v .

После выбора варианта варьирования рассчитываются скорректированные элементы режима и на этом режиме производится обработка заготовок.

Для коррекции режима точения в условиях существенного изменения параметров процесса с течением времени разработана программа «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации», которая зарегистрирована в государственном Реестре программ для ЭВМ. Программа позволяет рассчитать выходные параметры в зависимости от времени наработки инструмента: производственную погрешность диаметральных размеров деталей ω и параметр шероховатости Ra их поверхностей. Это даёт возможность оценить изменение её параметров с увеличением времени наработки инструмента и определить период его стойкости.

Программа разработана на языке программирования Delphi, который используется в одноимённой среде разработки Delphi 7. В качестве исходных данных необходимо ввести элементы режима точения (скорость резания v , подача $S_{об}$ и глубина резания t_r), параметры станка (мощность и КПД двигателя, жёсткость станка, диапазоны частот вращения шпинделя и подач), конструктивные параметры резца (передний угол γ , главный ϕ и вспомогательный ϕ_1 углы в плане, угол наклона передней поверхности λ , радиус при вершине режущей кромки r , ширина B и высота державки H , вылет резца из резцедержателя), материалы заготовки, режущей части инструмента и державки резца и др.

Экспериментальные исследования были проведены при следующих условиях. Обрабатывали точением наружные цилиндрические поверхности заготовок диаметром 50 мм из стали 12X18H10T проходным резцом со сменной многогранной твердосплавной пластиной из сплава T15K6 на токарном станке с ЧПУ СТХ310 Ecoline.

Заданное (предельное) значение шероховатости обработанной поверхности $Ra = 3,2$ мкм; допуск диаметрального размера составляет 0,1 мм (по 10 качеству). Период стойкости инструмента $\tau_c = 30$ мин.

Исследование проведено в следующей последовательности:

1. По формулам теории резания [10] произведен расчет элементов режима точения заготовки из 12X18H10T: $S_{об} = 0,11$ мм/об; $v = 146$ м/мин.

2. По результатам расчета выходных параметров (параметра шероховатости Ra и погрешности диаметрального размера ω) на назначенном режиме был получен положительный резерв по параметру Ra и отрицательный резерв по значению параметра ω . Поскольку расчетная погрешность диаметрального размера превышает допуск, необходимо выполнить коррекцию рассчитанного режима обработки. Скорректированный режим должен обеспечить резерв одного из параметров, равный нулю, при положительном резерве второго выходного параметра. С применением разработанного программного обеспечения получили скорректированный режим: $S_{об} = 0,11$ мм/об; $v = 142$ м/мин.

3. При обработке на скорректированном режиме выходные параметры (параметр шероховатости Ra и диаметральный размер) измеряли на ограниченном отрезке времени наработки инструмента, равном 0...5,63 мин (меньшим, чем период стойкости), а затем экстраполировали на время, равное периоду стойкости. Выполнив обработку результатов по методике [9], получили значения выходных параметров в момент времени $\tau_c = 30$ мин: шероховатости – $Ra_{\phi}^0 = 1,95$ мкм и погрешности диаметрального размера – $\omega_{\phi}^0 = 0,05$ мм. Следовательно, могут быть получены положительные резервы (запасы) по параметру шероховатости Ra_{ϕ} и погрешности диаметрального

размера ω_{ϕ} . Поэтому имеется возможность интенсифицировать режим обработки.

Разработанная программа позволила рассчитать новые значения управляемых параметров: $S_{об} = 0,168$ мм/об; $v = 140$ м/мин. Выходные параметры (шероховатость и диаметр обработанной поверхности) заготовок, обработанных на данном режиме, измеряли на отрезке времени, равном периоду стойкости резца и получили фактические значения выходных параметров: $Ra_{\phi}^1 = 2,84$ мкм и $\omega_{\phi}^1 = 0,04$ мм. Обработка на скорректированном режиме ($S_{об} = 0,168$ мм/об; $v = 140$ м/мин) позволяет увеличить производительность процесса точения на 34 % по сравнению с назначенным режимом при обеспечении заданного качества деталей.

Аналогичные эксперименты выполнены также при следующих условиях: материал заготовок – 12X18H10T; режущий инструмент – резец MSDNN 2020K12; режущая пластина (СМП) – SNMG 120404-SFIS7015 (ф. InTool) с износостойким покрытием TiAlN. Требуемое значение шероховатости $Ra = 1,6$ мкм; диаметральный размер (по восьмому качеству) – $\phi 34h8 (-0,039)$ мм. Режим резания был назначен по каталогу производителя инструмента: $S_{об} = 0,080$ мм/об; $v = 250$ м/мин; $t_r = 0,5$ мм.

Использование скорректированного режима ($S_{об} = 0,129$ мм/об; $v = 250$ м/мин; $t_r = 0,5$ мм) позволяет повысить производительность обработки партий образцов из 12X18H10T на 33 % по сравнению с назначенным режимом. При этом на протяжении заданного периода стойкости $\tau_c = 30$ мин обеспечивается заданный параметр шероховатости Ra и точность диаметрального размера.

ВЫВОДЫ

1. Выполнены исследования эффективности методики коррекции, назначенного в условиях неопределённости технологической информации режима токарной обработки с учетом изменяющихся во времени параметров процесса.

2. Применение разработанной методики позволяет увеличить производительность точения на 30...35 % при обеспечении на протяжении заданного периода стойкости инструмента требуемого качества обработанных деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
2. **Суслов А. Г.** Самообучающиеся автоматизированные технологические системы / А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин, Д.Н. Финатов. Справочник. Инженерный журнал. № 1. 2004. С. 14–17.
3. **Зориктуев В.Ц., Шангареев Р.Р.** Система автоматического управления режимами резания на основе нечеткой логики // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14, № 2 (37). С. 163–169.
4. **Alaskari A.** Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning / A. Alaskari, S.E. Oraby // Journal of Engineering Research. 2018, Vol. 6. № (2). pp. 20–231.
5. **Теоретико-вероятностный** анализ производительности станочных систем / С.А. Васин, А.Н. Иноземцев, Н.И. Пасько. Тульский гос. ун-т. Тула: ТулГУ, 2002. 276 с.
6. **Анцев А.В.** Учет разброса периода стойкости при оптимизации режимов резания и профилактической замены инструмента / А.В. Анцев, Н.И. Пасько // Вестник машиностроения. № 9. 2019. С. 72–77.
7. **Ulsoy A.G., Koren Y.** Control of machining processes. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control. 1993, 115, 301–308. DOI: 10.1115/1.2899070.
8. **Unyanin A.N.** Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020). 022034. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022034.
9. **Унянин А.Н.** Статистический анализ параметров процесса механической обработки / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Горное оборудование и электромеханика. № 6. 2019. С. 48–54. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-48-54.
10. **Прогрессивные** режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчикова

и др.; под общ. ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 399 с.

REFERENCES:

1. Suslov A.G. (2008) Surface engineering of parts. Machine Building, Moscow.
2. Suslov A.G., Petreshin D.I., Finatov D.N. (2004) Self-learning automated technological systems. SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal, № 1, pp. 14–17.
3. Zoriktuev V.Ts., Shangareev R.R. (2010) Automatic control of cutting modes based on fuzzy logic. Vestnik UGATU, V.14, № 2 (37), pp. 163–169.
4. Alaskari A. Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning / A. Alaskari, S.E. Oraby // Journal of Engineering Research. 2018, Vol.6. № (2) pp. 209–231.
5. Vasin S.A., Inozemtsev A.N., Pasko N.I. (2002) Theoretical and probabilistic analysis of machine system performance. TulaStateUniversity, Tula.
6. Antsev A.V. Taking into account the spread of the service life when optimizing cutting modes and preventive replacement of tools / A.V. Antsev, N.I. Pasko // Bulletin of mechanical engineering. No. 9. 2019. pp. 72–77.
7. Ulsoy A.G., Koren Y. Control of machining processes. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control. 1993, 115, 301–308. DOI:10.1115/1.2899070.
8. Unyanin A.N. Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conf. Series: MaterialsScienceandEngineering.709 (2020). 022034. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022034.
9. Unyanin A.N. Statistical analysis of the parameters of the machining process / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // Mining equipment and electromechanics. No. 6. 2019. pp. 48 – 54. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-48-54.
10. Progressive cutting tools and metal cutting modes: Handbook / V.I. Baranchikova et al.; Under the general editorship of V.I. Baranchikova. М.: Mashinostroenie, 1990. 399 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 27.06.2023; assepted for publication 05.07.2023.