

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

М.М. Пащенко, midubk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7857-6059>

В.Д. Онискив, oniskivf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9455-0446>

В.Ю. Столбов, valeriy.stolbov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3259-8660>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. Повышение эффективности процессов токарной обработки на станках с ЧПУ требует разработки специального математического и информационного обеспечения для реализации адаптивного управления. Предлагается в качестве моделей процесса резания использовать нейросетевые аппроксиматоры, построенные на основе экспериментальных данных, полученных на конкретном станке с ЧПУ при обработке конкретного материала с помощью фиксированного инструмента. **Цель исследования:** проработка вопросов применения методов искусственного интеллекта для адаптивного управления процессом токарной обработки на основе полученных данных о вибрации инструмента. **Материалы и методы.** Предлагается алгоритм решения задачи оптимального адаптивного управления, обеспечивающий в автоматическом режиме максимальную производительность станка с ЧПУ. Для организации обратной связи при адаптивном управлении процессом резания непрерывно снимаются и обрабатываются данные датчика о виброускорении режущего инструмента. Вычисляется оценка удельной энергии сигнала на заданном интервале времени и устанавливается связь между ней и шероховатостью обрабатываемой поверхности детали. Для этого используется обученная нейросеть, предсказывающая по величине энергии сигнала по вибрации значение шероховатости при заданных режимах резания. **Результаты.** Предложена постановка задачи адаптивного управления процессом токарной обработки резанием с учетом износа инструмента. Разработан алгоритм интеллектуальной обработки данных о виброускорении инструмента в процессе резания и построена нейросеть, устанавливающая связь между уровнем вибрации и шероховатостью поверхности. Предложен эффективный алгоритм решения задачи оптимального адаптивного управления. Он позволяет в реальном времени подбирать режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность процесса резания при выполнении ограничения на шероховатость поверхности. **Заключение.** Исследуемые алгоритмы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы адаптивного управления процессом токарной обработки.

Ключевые слова: токарная обработка, адаптивное управление, износ инструмента, данные о вибрации, алгоритм управления, нейросетевые технологии

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках федеральной программы «Приоритет-2030».

Для цитирования: Пащенко М.М., Онискив В.Д., Столбов В.Ю. Об одном алгоритме адаптивного управления процессом токарной обработки с использованием методов искусственного интеллекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 1. С. 43–52. DOI: 10.14529/ctcr250104

ABOUT ONE ALGORITHM OF ADAPTIVE CONTROL OF THE TURNING PROCESS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

M.M. Pashchenko, midubk@gmail.com
V.D. Oniskiv, oniskivf@gmail.com
V.Yu. Stolbov, valeriy.stolbov@gmail.com

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Increasing the efficiency of turning processes on CNC machines requires the development of special mathematical and information support for the implementation of adaptive control. It is proposed to use neural network approximators as models of the cutting process, constructed on the basis of experimental data obtained on a specific CNC machine during the processing of a specific material using a fixed tool. **The purpose of the study:** to study the issues of applying artificial intelligence methods for adaptive control of the turning process based on the obtained data on tool vibration. **Materials and methods.** An algorithm for solving the problem of optimal adaptive control is proposed, which ensures maximum productivity of a CNC machine in automatic mode. To organize feedback in adaptive control of the cutting process, sensor data on vibration acceleration of the cutting tool are continuously taken and processed. An estimate of the specific energy of the signal is calculated for a given time interval and a connection is established between it and the roughness of the workpiece surface. For this, a trained neural network is used, predicting the roughness value for given cutting modes based on the signal energy value about vibration. **Results.** The problem statement of adaptive control of the turning cutting process taking into account tool wear is proposed. An algorithm for intelligent processing of data on tool vibration acceleration during cutting is developed and a neural network is built that establishes a connection between the vibration level and surface roughness. An effective algorithm for solving the problem of optimal adaptive control is proposed. It allows real-time selection of cutting modes that ensure maximum cutting process productivity while meeting surface roughness constraints. **Conclusion.** The studied algorithms and models were tested on real data, which confirms the possibility of their use in the development of an intelligent information system for adaptive control of the turning process.

Keywords: turning, adaptive control, tool wear, vibration data, control algorithm, neural network technologies

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal program “Priority-2030”.

For citation: Pashchenko M.M., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu. About one algorithm of adaptive control of the turning process using artificial intelligence methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(1):43–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250104

Введение

Адаптивное управление станками является новым этапом развития металлообрабатывающего оборудования [1]. При обработке заготовок на станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания процесса обработки и насколько изменяются исходные параметры, принятые при расчете и составлении управляющей программы (припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.).

В действительности условия процесса обработки изменяются во времени случайным образом по следующим причинам:

- непрерывно изменяются режущие свойства инструментов, которые невозможно точно определить в данный момент;
- неопределенные свойства всей технологической системы (упругие и температурные деформации, вибрации);
- для каждой заготовки из обрабатываемой партии имеется разброс припусков, твердости, структуры металла и др.

Поэтому качество обработки зависит от опыта оператора станка с ЧПУ и влияние «человеческого фактора» здесь велико [2]. Адаптивное управление станками, в отличие от обычных систем ЧПУ, обеспечивает автоматическое приспособление процесса обработки заготовки к изменяющимся условиям обработки по определенным критериям. Это приспособление осуществляется на основе информации, получаемой системой управления непосредственно в процессе обработки заготовок.

На основе получаемой информации о текущем состоянии процесса обработки система адаптивного управления станка, увеличивая или уменьшая объем снимаемого металла с заготовки путем соответствующего изменения скорости резания и подачи, поддерживает постоянным предельное значение какого-либо заданного параметра обработки (например, силы резания) или в более общем, но и более сложном случае – обеспечивает получение оптимальных значений точности, производительности или себестоимости обработки заготовок.

В рассматриваемом случае предлагается использовать подход оптимального адаптивного управления. Целью проекта является повышение производительности резания при обеспечении заданного уровня шероховатости обрабатываемой поверхности.

Общая схема оптимального адаптивного управления приведена на рис. 1. Адаптивные системы оптимального управления при обработке заготовок осуществляют автоматический поиск и поддержание таких сочетаний скорости резания V и подачи S , которые обеспечивают экстремальное значение целевой функции $J(V,S)$ обработки (точность, производительность или себестоимость обработки) при наличии технических ограничений и действии возмущающих воздействий (колебаний припуска, твердости материала заготовки, изменения режущих свойств инструмента и др.)

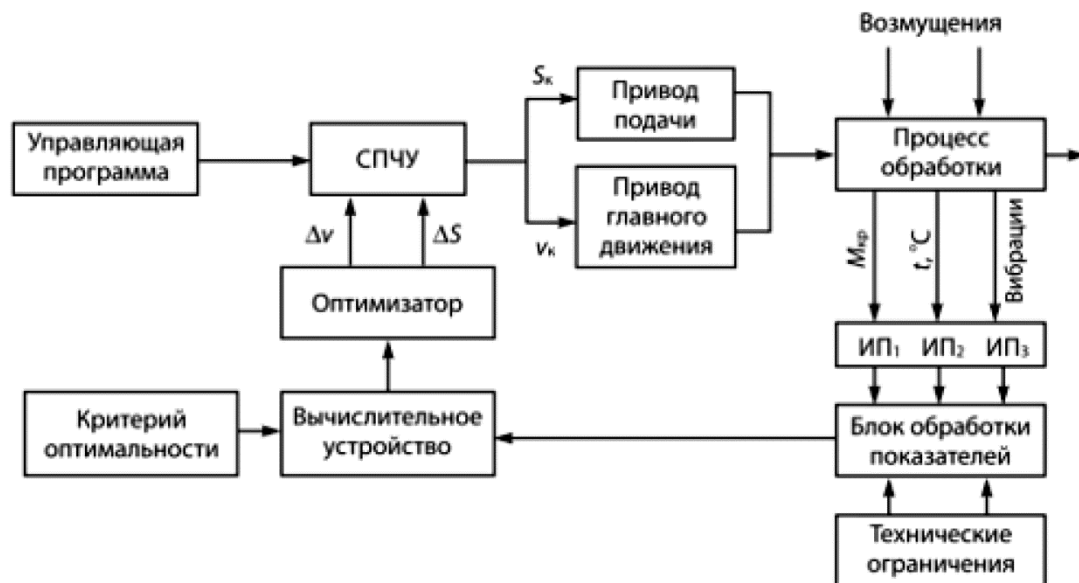


Рис. 1. Схема построения адаптивной системы оптимального управления [1]
Fig. 1. Scheme for constructing an adaptive optimal control system [1]

Основой для построения системы адаптивного управления станками оптимального типа является математическая модель управляемого процесса обработки, задающая аналитически систему технических ограничений области поиска оптимальных режимов резания и выражающая зависимость критерия оптимальности от параметров процесса обработки.

В последнее время с появлением новых методов интеллектуальной обработки больших данных возрос интерес к совершенствованию систем адаптивного управления процессами токарной обработки. При этом исследуются как 2-канальные системы управления (с оператором), так и одноканальные системы (без оператора).

Например, в рамках 2-канальной системы адаптивного управления E.G. Plaza с соавт. в своей работе [3] описывает метод вейвлет-преобразования пакетов, который позволяет разлагать вре-

менной сигнал на несколько независимых частотно-временных сигналов, известных как пакеты. Этот метод обеспечивает временную локализацию переходных процессов, происходящих в ходе мониторинга процессов резания, что является значительным преимуществом для мониторинга состояния оборудования и диагностики неисправностей. В рамках своего исследования E.G. Plaza предлагает осуществлять мониторинг шероховатости поверхности для оперативного принятия решений о качестве обработки поверхности заготовки. Автор также обсуждает различные аспекты мониторинга на основе замеров вибрации и последующей обработки данных сигналов, которые были изучены в литературе, а также те аспекты, которые получили недостаточное внимание.

Метод вейвлет-преобразования пакетов, описанный в статье E.G. Plaza, преимущественно используется для мониторинга состояния инструмента [4, 5]. Однако другие технологические аспекты, такие как стружкообразование [6] и шероховатость поверхности [7], изучены в меньшей мере.

В рамках одноканальной системы управления S.G. Kim и соавт. разработали методику синхронизации и хранения данных о нагрузке на основную ось и ЧПУ. Эти данные были проанализированы для получения информации о кривой управления опорной нагрузкой (RLCC). На основе полученных данных был создан адаптивный метод управления подачей, который регулирует скорость подачи инструмента в процессе черновой обработки. В ходе тестовой обработки данный метод адаптивного управления позволил уменьшить время изготовления на 4,6–12,8 %, а также увеличить стойкость инструмента до 41,7 % [8].

Y. Li и коллеги в [9] предложили стратегию адаптивного управления, комбинируя активный график подачи и управление в реальном времени. Это уменьшает влияние износа режущих инструментов на стратегию управления, улучшая адаптивность контроллера скорости подачи. Хотя износ инструмента снижает общую эффективность обработки, стойкость инструмента возрастает на 25 %. Предложенный метод позволяет адаптивно справляться с этим компромиссом, где снижение эффективности обработки может привести к увеличению стойкости инструмента в течение всего периода использования [9].

L. Wang и коллеги в [10] разработали новый алгоритм адаптивного управления АСМСА и сравнили его с тремя другими алгоритмами: NSGA-II, СНОА и IABC. Сравнительный анализ и валидация проводились с использованием моделирования и реальных экспериментов по обработке. Результаты показали, что оба метода проверки приводят к одинаковым выводам. Предложенный метод АСМСА снижает вычислительную мощность на 5,63; 4,65 и 4,51 % и повышает эффективность обработки на 27,88; 15,11 и 15,31 % соответственно по сравнению с другими алгоритмами. Кроме того, благодаря этим усовершенствованиям энергопотребление снижается на 58,21; 45,54 и 41,45 % соответственно [10].

В статье [11] представлен интеллектуальный и эффективный метод адаптивной обработки данных для повышения производительности станков с ЧПУ. Основным новшеством исследования является внедрение нового адаптивного подхода на основе методов машинного обучения, который классифицирует заготовки, сегментирует процессы и регулирует скорость подачи исключительно на основе сигналов о мощности шпинделя. Этот метод эффективно использует большие данные в процессе обработки, существенно увеличивая практическую применимость адаптивной обработки. Практические эксперименты по резке подтвердили эффективность предложенного метода [11].

P. Bakhshandeh и соавт. в [12] представили систему мониторинга и адаптивного управления на основе цифровых двойников, разработанных в данной работе. Эта система позволяет принимать обоснованные решения благодаря предоставлению информации о цифровых двойниках алгоритмам управления и коррекции неопределенностей виртуальной модели. Включение внутренних данных ЧПУ и измерений датчиков в режиме реального времени обеспечивает работу системы. Для восстановления сил резания по результатам измерений виброускорения использовался держатель, интегрированный в датчик, с применением алгоритма фильтра Калмана. Адаптивное управление силами резания осуществлялось с помощью цифровых двойников для ограничения максимальной нагрузки. Новый подход к отслеживанию износа инструмента был представлен путем совмещения совокупной толщины стружки от цифрового двойника с измерением тока

шпинделя от ЧПУ. Добавление информации виртуальной модели повысило надежность алгоритмов мониторинга и управления, что позволило избежать ложных срабатываний и переходных аномалий [12].

Подводя итоги, можно говорить о все более широком применении методов искусственного интеллекта в системах адаптивного управления процессами токарной обработки. Однако анализ рассмотренных статей показывает, что вопросы учета влияния износа инструмента на шероховатость обрабатываемой поверхности при адаптивном управлении остаются малоизученными в литературе, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в этой области.

1. Постановка задачи

В качестве критерия оптимальности J , характеризующего производительность процесса, выберем объем металла, снимаемого за период резания:

$$J(x(t), z(t)) = O(x, z)/T, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор-функция управления процессом резания; $z(t)$ – функция износа инструмента; O – объем снимаемого металла; T – рассматриваемый период времени.

Требуется найти такие оптимальные управления x^* , при которых критерий оптимальности достигает максимума

$$J(x^*, z(t)) = \max J(x(t), z(t)) \quad (2)$$

при ограничениях типа равенств:

$$h(t) = F(x(t), z(t)), \quad t \in [0, T]; \quad (3)$$

$$z(t) = G(p(t)), \quad t \in [0, T] \quad (4)$$

и неравенств

$$h(t) < h^*, \quad t \in [0, T]. \quad (5)$$

Здесь $h(t)$ – функция, характеризующая уровень шероховатости обработанной поверхности; $p(t)$ – вектор-функция, характеризующая работу станка с ЧПУ в процессе резания (уровень вибрации, сила резания, температура и т. д.), h^* – заданное значение допустимого уровня шероховатости.

Отметим, что в задаче управления (1)–(5) функции F и G выступают в качестве модели процесса резания. Предлагается их определять с помощью нейросетевого моделирования, т. е. их можно считать нейросетевыми аппроксиматорами, построенными на основе экспериментальных данных, полученных на конкретном станке с ЧПУ при обработке конкретного материала с помощью фиксированного инструмента [13, 14].

2. Оценка величины вибрации инструмента

Как было отмечено выше, шероховатость обрабатываемой поверхности зависит от износа инструмента. Будем считать, что износ инструмента, в свою очередь, в основном определяется уровнем вибрации инструмента. На рис. 2 приведены результаты замеров виброускорения с помощью датчика, закрепленного на режущем инструменте токарного станка.

Для организации обратной связи при адаптивном управлении процессом резания необходимо непрерывно снимать данные датчика и обрабатывать их с помощью специального алгоритма. Желательно на основе интеллектуального анализа данных получать на заданном интервале времени объективную информацию об износе инструмента и величине шероховатости поверхности. Предлагается обрабатывать временной ряд с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [15] и получать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сигнала на заданном промежутке времени. На рис. 3 приведен пример АЧХ сигнала после БПФ. Видно, что на заданном интервале наблюдается конечное число частот, характеризующихся наибольшими значениями амплитуд.

1 Поперечно Замер от 04.07.2024 в 19:49:07

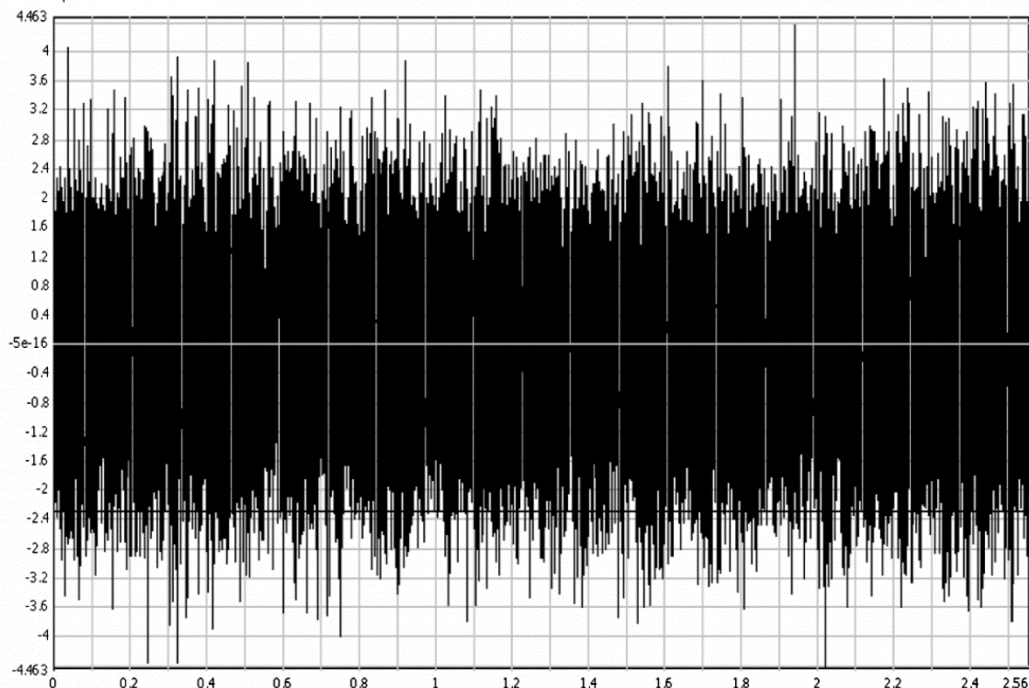


Рис. 2. Пример временного сигнала о виброускорении инструмента в процессе обработки
Fig. 2. Example of a time signal about vibration acceleration of a tool during processing

1 Поперечно Замер от 04.07.2024 в 19:49:07

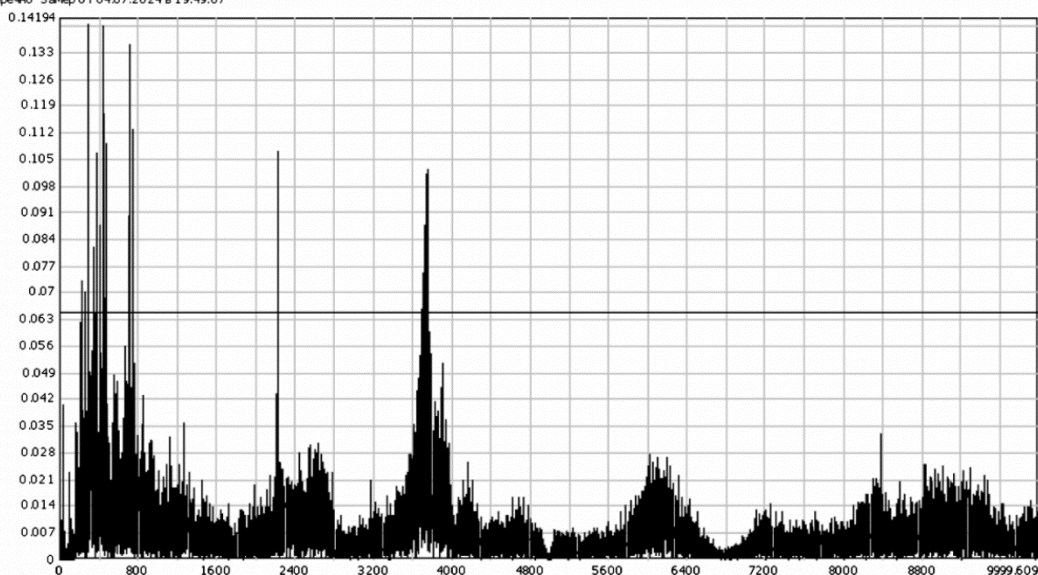


Рис. 3. Пример АЧХ обработанного сигнала с помощью БПФ
Fig. 3. Example of frequency response of a processed signal using FFT

Предлагается заменить АЧХ одним числовым значением, вычисляя энергию сигнала на заданном интервале времени.

Известно соотношение для энергии волны:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2, \quad (6)$$

где m – масса; ω – угловая частота; A – амплитуда колебаний.

Введем величину $\hat{E} = E/m$ – удельную энергию колебаний на единицу массы.

Как отмечено выше, в экспериментах измерялось виброускорение. Следовательно, для расчета энергии либо необходимо дважды интегрировать данные, либо учесть следующие рассуждения:

$$\delta(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow \ddot{\delta}(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow | \quad (7)$$

$$\ddot{A}(t) = -A\omega^2 \text{ или } (\ddot{A})^2 = A^2\omega^4.$$

Теперь соотношение (6) можно записать в виде

$$\hat{E} = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \frac{\ddot{A}^2}{\omega^4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\omega^2}. \quad (8)$$

Поскольку $\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$, здесь T – период колебаний (тело совершает полный оборот),

$\nu = \frac{1}{T}$ – частота (число оборотов за 1 с).

С учетом этого перепишем (8) в виде:

$$\hat{E} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\omega^2} = \frac{1}{2} \ddot{A}^2 (2\pi\nu)^{-2} = \frac{1}{8\pi^2} \cdot \frac{\ddot{A}^2}{\nu^2}. \quad (9)$$

Отметим, что после БФП имеем АЧХ для \ddot{A} , то есть $\ddot{A}(\nu)$.

Тогда удельная энергия сигнала (на единицу массы) имеет окончательный вид:

$$\hat{E} = \frac{1}{8\pi^2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\ddot{A}_i^2(\nu_i)}{\nu_i^2} \right). \quad (10)$$

Заметим, что коэффициент $\frac{1}{8\pi^2}$ в формуле (10) можно опустить. Он не важен для оценки

уровня вибрации, поскольку одинаков для всех членов ряда (10). Кроме этого, для упрощения расчетов можно ограничиваться небольшим числом членов ряда с наибольшими значениями амплитуд.

3. Алгоритм адаптивного управления

Для решения поставленной задачи адаптивного управления (1)–(5) предложен следующий алгоритм:

1) выбираются параметры управления процессом резания: величина подачи S , мм/об; глубина резания l , мм; скорость резания V , м/мин;

2) назначаются пределы изменения параметров: $S_{\min} = 0,1$ мм/об; $S_{\max} = 0,5$ мм/об; $l = \text{fix}$; $V = \text{fix}$ (глубина и скорость резания считаются постоянными и задаются из возможностей оборудования);

3) выбирается шаг управления: $\Delta S = 0,1$ мм/об;

4) резание начинается с максимального значения подачи S_{\max} ;

5) непрерывно вычисляется удельная энергия сигнала с датчика, характеризующая уровень вибрации и износа инструмента, по формуле

$$\hat{E}^* = \sum_{i=1}^N \frac{\ddot{A}_i^2(\nu_i)}{\nu_i^2}, \quad (11)$$

где A_i – амплитуды Фурье-спектра виброускорения на заданном интервале времени обработки; $N = 4$; ν_i – частоты (берутся первые 4 частоты, соответствующие наибольшим значениям амплитуды);

6) по величине энергии с помощью обученной нейросети определяется шероховатость поверхности [13] при заданных режимах резания;

7) при достижении максимально допустимой величины шероховатости снижается величина подачи и процесс обработки продолжается дальше.

Следует отметить, что данный алгоритм обеспечивает выполнение условия (2) поставленной задачи оптимального управления, так как процесс обработки начинается с максимально возможной величины подачи инструмента с постепенным снижением ее при выходе на ограничение (5).

Заключение

Предложен эффективный алгоритм адаптивного управления процессом резания на станке с ЧПУ в рамках оптимального подхода. Отличительной особенностью алгоритма является использование нейросетевых аппроксиматоров, задающих зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины энергии сигнала с датчика (11), характеризующей уровень вибрации и износа инструмента при различных режимах резания. Предложенный алгоритм обеспечивает максимально возможный объем съемного металла при заданной шероховатости поверхности, что значительно повышает производительность процесса токарной обработки.

Список литературы

1. Балакшин Б.С. Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1973. 688 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 256 с.
3. Plaza E.G., Núñez López P.J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 98. P. 902–919. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.028
4. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23, no. 2. P. 547–560. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.04.010
5. Effect of different features to drill-wear prediction with back propagation neural network / J. Xu, K. Yamada, K. Seikiya et al. // *Precision Engineering*. 2014. Vol. 38, no. 4. P. 791–798. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.007
6. Liao Z., Axinte D.A. On monitoring chip formation, penetration depth and cutting malfunctions in bone micro-drilling via acoustic emission // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 82–93. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.016
7. Cognitive Decision Making in Multiple Sensor Monitoring of Robot Assisted Polishing / T. Segreto, S. Karam, R. Teti, J. Ramsing // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 33. P. 333–338. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.075
8. Advanced adaptive feed control for CNC machining / S.G. Kim, E.Y. Heo, H.G. Lee et al. // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 85. P. 102621. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102621
9. Active-passive hybrid feed rate control systems in CNC machining: Mitigating force fluctuations and enhancing tool life / Y. Li, Z. Zhao, K. Wang et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 77. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.004
10. Modelling and optimization method for energy saving of computer numerical control machine tools under operating condition / L. Wang, P. Wei, W. Li, L. Du // *Energy*. 2024. Vol. 306. P. 132556. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132556
11. Intelligent in-process enhancement technique for machining efficiency in CNC machine tools based on spindle power / Y. Jiang, K. Liu, J. Huang et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 216. P. 111495. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111495
12. Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control / P. Bakhshandeh, Y. Mohammadi, Y. Altintas, F. Bleicher // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024. Vol. 49. P. 180–190. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.01.005
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024668654. Нейросетевой аппроксиматор зависимости шероховатости поверхности от режимов резания / В.С. Данелян, А.В. Ключев, В.Ф. Макаров. Заявл. 09.08.2024; опублик. 09.08.2024.
14. Analysis of Grain Size Effect of Titanium Ti-6Al-4V Depending on Surface Roughness at Different Cutting Parameters Using Artificial Intelligence Methods / V.F. Makarov, M.V. Pesin, V.S. Danelian et al. // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2024. Vol. 6, no. 4. P. 171–177. DOI: 10.17586/2687-0568-2024-6-4-171-177
15. Альтман, Е.А. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье: моногр. Омск: Изд-во Омского ГУПС, 2019. 170 с.

References

1. Balakshin B.S. *Adaptivnoe upravlenie stankami* [Adaptive control of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1973. 688 p. (In Russ.)
2. Burkov V.N. *Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh sistem* [Fundamentals of the mathematical theory of active systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 256 p. (In Russ.)
3. Plaza E.G., Núñez López P.J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018;98:902–919. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.05.028
4. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden Markov models. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009;23(2):547–560. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.04.010
5. Xu J., Yamada K., Seikiya K., Tanaka R., Yamane Y. Effect of different features to drill-wear prediction with back propagation neural network. *Precision Engineering*. 2014;38(4):791–798. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.04.007
6. Liao Z., Axinte D.A. On monitoring chip formation, penetration depth and cutting malfunctions in bone micro-drilling via acoustic emission. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;229:82–93. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.016
7. Segreto T., Karam S., Teti R., Ramsing J. Cognitive Decision Making in Multiple Sensor Monitoring of Robot Assisted Polishing. *Procedia CIRP*. 2015;33:333–338. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.075
8. Kim S.G., Heo E.Y., Lee H.G., Kim D.W., Yoo N.H., Kim T.H. Advanced adaptive feed control for CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024;85:102621. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102621
9. Li Y., Zhao Z., Wang K., Qian N., Fu Y., Cao S. Active-passive hybrid feed rate control systems in CNC machining: Mitigating force fluctuations and enhancing tool life. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024;77:184–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.004
10. Wang L., Wei P., Li W., Du L. Modelling and optimization method for energy saving of computer numerical control machine tools under operating condition. *Energy*. 2024;306:132556. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132556
11. Jiang Y., Liu K., Huang J., Zhao D., Yang W., Wang Y. Intelligent in-process enhancement technique for machining efficiency in CNC machine tools based on spindle power. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024;216:111495. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111495
12. Bakhshandeh P., Mohammadi Y., Altintas Y., Bleicher F. Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024;49:180–190. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.01.005
13. Danelian V.S., Klyuev A.V., Makarov V.F. *Neural network approximator of the dependence of surface roughness on cutting modes*. Certificate of registration of a computer program RU 2024668654, 09.08.2024. (In Russ.)
14. Makarov V.F., Pesin M.V., Danelian V.S., Stolbov V.Yu., Khabarova A.V., Polyakov A.V., Semenova I.P. Analysis of Grain Size Effect of Titanium Ti-6Al-4V Depending on Surface Roughness at Different Cutting Parameters Using Artificial Intelligence Methods. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2024;6(4):171–177. DOI: 10.17586/2687-0568-2024-6-4-171-177
15. Altman E.A. [Fast Fourier Transform Algorithms: monograph]. Omsk: Publishing House of Omsk State University of Railways; 2019. 170 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Пашенко Максим Михайлович, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; midubk@gmail.com.

Онискив Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доц. кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; oniskivf@gmail.com.

Столбов Валерий Юрьевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; valeriy.stolbov@gmail.com.

Information about the authors

Maksim M. Pashchenko, Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; midubk@gmail.com.

Vladimir D. Oniskiv, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; oniskivf@gmail.com.

Valeriy Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; valeriy.stolbov@gmail.com.

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 30.11.2024

The article was submitted 30.11.2024