

Совместное моделирование нечеткой двусвязной системы управления продольным точением в MSC.Adams и Matlab

А. В. Белоусов¹, А. В. Рыбина¹ ✉

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: anna.vasilevna@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В статье рассматривается возможность разработки и моделирования нечеткой двусвязной системы управления процессом токарной обработки деталей на основе совместного применения программы для создания виртуальных моделей MSC.Adams и пакета математического анализа Matlab. Актуальность темы исследования связана с тенденцией применения в отечественном и зарубежном станкостроении функций искусственного интеллекта для компенсации температурных деформаций, силовых и вибрационных возмущений, мониторинга состояния инструментов, адаптивного управления с учетом фактического состояния процесса резания в режиме реального времени. При проектировании новых систем управления процессом токарной обработки изделий важной задачей является создание математических и виртуальных моделей и синтеза интеллектуальных алгоритмов управления, обеспечивающих решение задач в условиях воздействия неопределенных возмущений.

Методы. Для разработки математической модели и ее анализа применены основы теории нечетких множеств в задачах управления, теории металлообработки, методы математического моделирования систем управления. Синтез нечеткого регулятора и виртуальная модель выполнены с помощью современных прикладных программных пакетов Matlab и MSC.Adams.

Результаты. В статье представлен алгоритм нечеткого управления резанием и его реализация в среде Simulink с передачей данных в MSC.Adams, а также виртуальный прототип токарного станка в MSC.Adams. Приведены и проанализированы графики виброперемещений режущей кромки инструмента, изменения температуры и силы резания.

Заключение. Результаты тестирования модели показывают, что использование совместного моделирования нечеткой двусвязной системы управления токарной обработкой возможно для решения задачи повышения эффективности обработки на действующем оборудовании в условиях воздействия неопределенных возмущений.

Ключевые слова: продольное точение; процесс резания; температура резания; вибрации; виртуальная модель; MSC.Adams; шероховатость.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Белоусов А. В., Рыбина А. В. Совместное моделирование нечеткой двусвязной системы управления продольным точением в MSC.Adams и Matlab // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 116-128. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-116-128>.

Поступила в редакцию 24.01.2022

Подписана в печать 09.02.2022

Опубликована 31.03.2022

© Белоусов А. В., Рыбина А. В., 2022

Joint Modeling of a Fuzzy Two-Connected Longitudinal Turning Control System in MSC. Adams and Matlab

Alexander V. Belousov¹, Anna V. Rybina¹ ✉

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
46, Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: tanygin@yandex.com

Abstract

Purpose of research. The article considers the possibility of developing and modeling a fuzzy bipartite control system of the turning process based on the joint application of the program for creating virtual models MSC.Adams and mathematical analysis package Matlab. The relevance of the research topic is related to the trend of application of artificial intelligence functions in domestic and foreign machine tool industry for compensation of temperature deformations, force and vibration disturbances, tool condition monitoring, adaptive control taking into account the actual state of the cutting process in real time. In designing new control systems of the turning process, an important task is to create mathematical and virtual models and synthesis of intelligent control algorithms, providing solutions to problems under conditions of uncertain perturbations.

Methods. For the development of the mathematical model and its analysis basics of the theory of fuzzy sets in the problems of control, theory of metalworking, methods of mathematical modeling of control systems have been applied. The synthesis of fuzzy controller and virtual model have been developed with the help of modern applied software packages Matlab and MSC.Adams.

Results. The fuzzy cutting control algorithm and its implementation in the Simulink environment with the data transfer to MSC.Adams, as well as the virtual prototype of the lathe in MSC.Adams are presented in the article. Graphs of the vibration movements of the cutting edge of the tool, changes in temperature and cutting force are given and analyzed.

Conclusion. The results of model testing show that the use of joint modeling of fuzzy two-connected turning control system is possible to solve the problem of improving the efficiency of machining on the operating equipment under the influence of uncertain disturbances.

Keywords: longitudinal turning; cutting process; cutting temperature; vibrations; virtual model; MSC.Adams; roughness.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Belousov A. V., Rybina A. V. Joint Modeling of a Fuzzy Two-Connected Longitudinal Turning Control System in MSC. Adams and Matlab. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 116-128 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-116-128>.

Received 24.01.2022

Accepted 09.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

В настоящее время главной тенденцией развития отечественного и зарубежного станкостроения является применение функций искусственного интеллекта для компенсации температурных деформаций, силовых и вибрационных возмущений; мониторинга состояния инструментов, адаптивного управления с учетом фактического состояния процесса резания в режиме реального времени [1-3]. Важную роль при разработке новых систем управления процессом металлообработки имеет решение задач создания математических или виртуальных моделей и синтеза алгоритмов управления, обеспечивающих функционирование в условиях воздействия неопределенных возмущений [4-9]. В работе [10] представлен подход к разработке обобщенной модели системы управления процессом токарной обработки изделий в Matlab/Simulink с учетом взаимодействия силовых, вибрационных и температурных процессов. Как известно, собственные вибрации и колебания температуры при продольном точении изделий оказывают существенное влияние на высоту микронеровностей обработанной поверхности.

В настоящей работе будет представлена виртуальная модель станка, разработанная в среде Adams, и нечеткая двусвязная система управления, реализованная в Matlab/Simulink, а также оценка шероховатости и волнистости обработанной поверхности детали. Задача совместного решения уравнений

динамики резания и алгоритма нечеткого управления была сформулирована и реализована в инженерных пакетах для создания виртуальных моделей и математического анализа MSC.Adams и Matlab/Simulink. Программное обеспечение MSC.Adams позволяет создать виртуальную модель (возможно в дальнейшем нелинейную и упругую) кинематической схемы станка с указанием размеров и материалов без описания аналитической модели на основе системы дифференциальных уравнений [11-13]. Matlab включает пакет расширений Fuzzy Logic Toolbox для разработки алгоритма нечеткого вывода с динамической настройкой подачи и скорости вращения. Большинство существующих систем адаптивного управления резанием включает регулирование одного режимного параметра, чаще всего подачи, для повышения точности стабилизации характеристик качества поверхностного слоя целесообразно использовать многосвязные системы управления, в частности в данной работе предложен нечеткий алгоритм изменения скорости резания и подачи в процессе формообразования. Экспериментально доказано, что оптимальным условиям резания соответствуют оптимальная температура и минимальный или минимально-стабилизированный параметр силы резания. Данное утверждение подтверждается в работе [14] на основе опытов с одновременным измерением составляющих силы и температуры резания. Современное технологическое оборудо-

вание – это многоконтурные нестационарные и нелинейные системы. Динамическое состояние металлообрабатывающего оборудования изменяется в процессе работы не только при смене операций, но и в процессе выполнения типовой операции технологического процесса. Так как все возмущающие воздействия априорно учесть практически невозможно, то при расчете режимов резания необходимо учитывать множество факторов, связанных с фактическим состоянием заготовки, инструмента и всей технологической системы в целом. Этим и определяется актуальность оптимизации режимов механической обработки изделий с учетом фактического состояния процесса в режиме реального времени. Применение двух каналов управления позволит наиболее полно использовать запас мощности приводов подачи и главного движения. Метод совместного моделирования токарных станков на основе MSC. Adams и Matlab позволит совершенствовать системы управления режимами обработки с учетом вибрационных и тепловых процессов при резании для достижения заданных параметров шероховатости поверхности изделий при воздействии внешних возмущающих воздействий.

Материалы и методы

Динамическая модель системы резания токарного станка может быть

представлена системой уравнений с тремя степенями свободы:

$$[M]\{\ddot{q}\} + H\{\dot{q}\} + C\{q\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$ — симметричная диагональная инерционная матрица масс элементов расчетной модели; $M\{\ddot{q}\}$ – второй закон Ньютона; $H\{\dot{q}\}$ – сила упругости; $C\{q\}$ – конструкционная демпфирующая сила, пропорциональная перемещению, $\{F(t)\}$ – сила резания, включающая три взаимно-перпендикулярных составляющих [15, 16]. Циклическое изменение динамического усилия резания, вызванное системой резец-заготовка, вызывает вибрацию вдоль осей X, Y, Z . С помощью разработанной модели упругой системы можно определить упругое перемещение вершины резца в осевом, радиальном и касательном направлениях под действием составляющих силы резания.

Виртуальный прототип реализован в MSC.Adams, и с помощью модуля MSC.Adams Controls (рис. 1, 2) модель кинематики станка интегрирована в нечеткую двусвязную систему управления токарным станком, реализованную в среде Matlab/Simulink (рис. 3).

Нечеткая модель состоит из двух входных и двух выходных переменных. Алгоритм коррекции параметров режима резания для токарной обработки изделий на основе нечетко-логического вывода включает восемь этапов [17, 18].

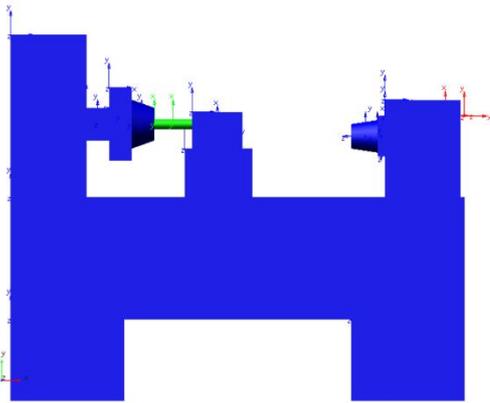


Рис. 1. Виртуальный прототип токарного станка в Adams

Fig. 1. Virtual lathe prototype at Adams

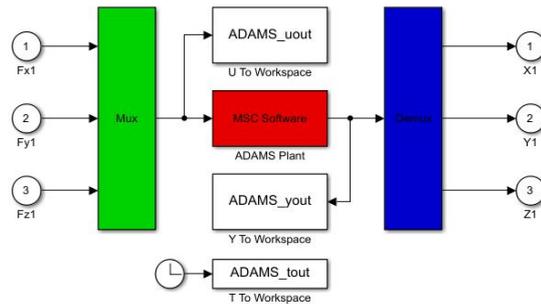


Рис. 2. Блок Adams_sub, обеспечивающий интеграцию модели Adams с Matlab/Simulink

Fig. 2. Adams_sub block providing integration of the Adams model with Matlab/Simulink

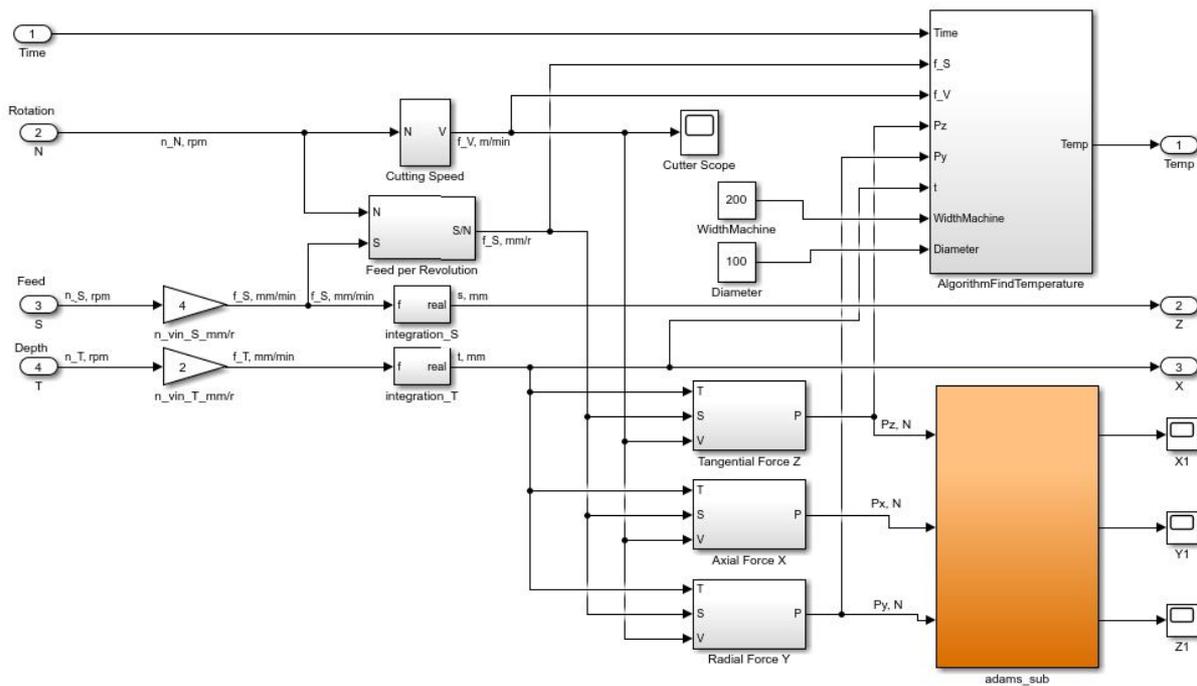


Рис. 3. Математическая модель токарного станка в Matlab Simulink с передачей данных в MSC.Adams

Fig. 3. Mathematical model of a lathe in Matlab Simulink with data transfer to MSC.Adams

1. Расчет прогнозируемых значений силы и температуры резания при токарной обработке изделия по эмпирическим формулам с учетом заданных па-

раметров станка, режущего инструмента и детали.

2. Формализация описания процесса продольного точения:

$T = \{ \langle T, \mu(T) \rangle \}, F = \{ \langle F, \mu(F) \rangle \},$
 $V = \{ \langle V, \mu(V) \rangle \}, S = \{ \langle S, \mu(S) \rangle \},$
 где $\mu(T) \rightarrow [0,1], \mu(F) \rightarrow [0,1], \mu(V) \rightarrow [0,1],$
 $\mu(S) \rightarrow [0,1]$ — степени принадлежности переменных температуры T , силы

резания F , скорости резания V и подачи S . На рис. 4 представлены функции принадлежности переменных (рис. 4).

3. Разработка базы правил знаний, основанной на пятнадцати нечётких продукционных правилах (табл. 1).

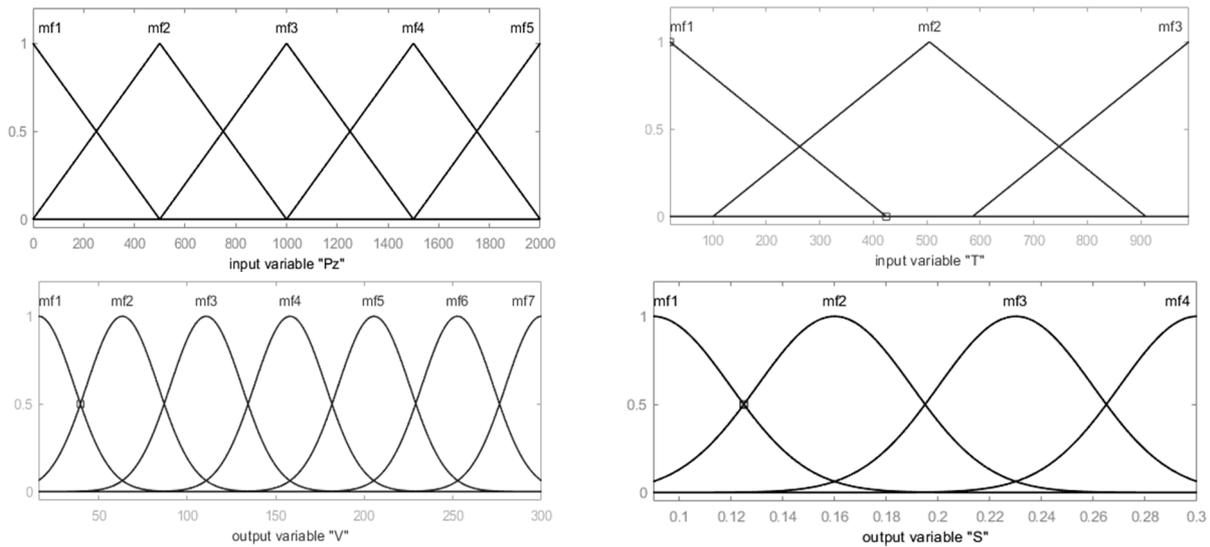


Рис. 4. Входные функции силы и температуры резания и выходные функции скорости резания и подачи

Fig. 4. Input functions for cutting force and temperature and output functions for cutting speed and feed

Таблица 1. База правил модели нечеткого логического вывода

Table 1. The rule base of the fuzzy inference model

Fuzzy rule	If		Then	Fuzzy rule	If		Then	Fuzzy rule	If		Then
1	T_1	F_1	V_7, S_1	6	T_2	F_1	V_6, S_1	11	T_3	F_1	V_7, S_1
2	T_1	F_2	V_6, S_1	7	T_2	F_2	V_5, S_2	12	T_3	F_2	V_6, S_1
3	T_1	F_3	V_6, S_2	8	T_2	F_3	V_4, S_2	13	T_3	F_3	V_2, S_4
4	T_1	F_4	V_5, S_2	9	T_2	F_4	V_3, S_3	14	T_3	F_4	V_2, S_4
5	T_1	F_5	V_4, S_2	10	T_2	F_5	V_2, S_4	15	T_3	F_5	V_1, S_4

Установка соответствия между численным значением и значением функции принадлежности переменных V и S .

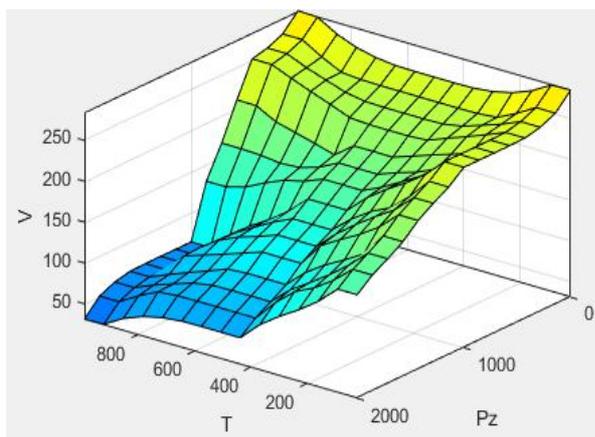
$$V' = \bigcup_{i=1}^n V_i, S' = \bigcup_{i=1}^m S_i, \text{ где } n, m - \text{количество}$$

заклучений нечетко логического вывода.

Для аккумуляции усеченных функций принадлежности V' и S' используется операция максимума $\alpha_i = \max(V')$, $\beta_i = \max(S')$.

Дефаззификация с помощью метода центра тяжести выходных величин скорости и подачи:

$$V'' = \frac{\sum_{i=1}^n V_i' \mu(V')}{\sum_{i=1}^n \mu(V')}, \quad S'' = \frac{\sum_{i=1}^n S_i' \mu(S')}{\sum_{i=1}^n \mu(S')}.$$



Сравнение исходных значений выходных переменных с текущими и передача сигнала о необходимости изменения параметров резания.

На основе разработанной нечеткой математической модели были получены графики поверхностного отклика нечетких выходных переменных V и S (рис. 5).

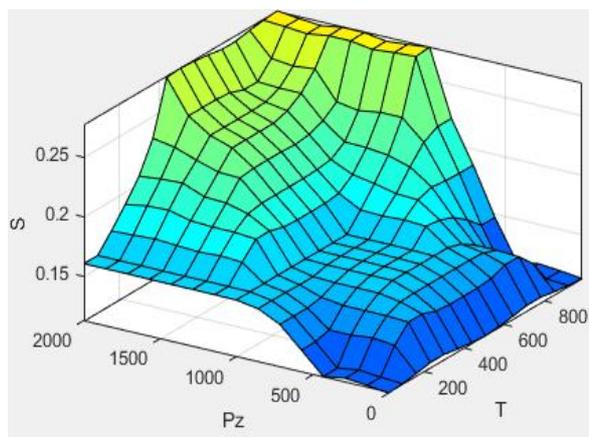


Рис. 5. Поверхности отклика выходных переменных скорости и подачи нечеткой системы управления

Fig. 5. Response surfaces of output speed and feed variables of fuzzy control system

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы модели рассмотрен процесс продольного точения цилиндрической заготовки из стали 45 резцом с рабочей частью из твердого сплава T15K6 без использования СОЖ. Требуемая шероховатость обработанной поверхности $Ra=2,5$ мкм, оптимальная температура $T=950^{\circ}C$ [19], температура окружающей среды $T_{oc}=20^{\circ}C$. Используя Matlab Simulink и Adams, рассматриваемый процесс токарной обработки был смоделирован во времени от первоначального контакта между режущим инструментом и заготовкой

до тех пор, пока процесс резания не стабилизируется.

На рис. 6 и 7 приведен результат расчета вибрационных перемещений инструмента при продольном точении заготовки на основе полученной компьютерной модели нечеткого управления процессом токарной обработки. Вибрационные перемещения инструмента приводят к снижению качества обработанной поверхности (волнистость, шероховатость), а также повышению температуры резания. Из рис. видно, что в момент начала резания вибрационные колебания инструмента в направлениях X и Z резко возрастают.

Также были получены графики изменения температуры и силы резания P_z (рис. 8, 9).

Из графиков можно сделать вывод об уменьшении колебаний силы реза-

ния после возрастания и стабилизации температуры в зоне резания при продольном точении, вследствие чего обеспечивается общая стабилизация процесса обработки.

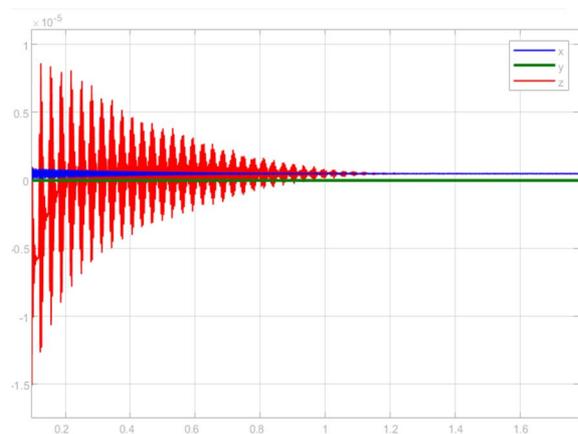


Рис. 6. Графики виброперемещений режущей кромки инструмента вдоль осей X, Y, Z при $0 < t < 2$ с

Fig. 6. Graphs of vibration displacements of the cutting edge of the tool along the X, Y, Z axes at $0 < t < 2$ s.

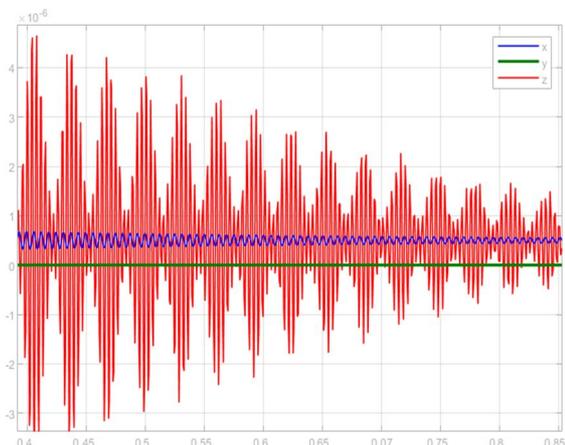


Рис. 7. Графики виброперемещений режущей кромки инструмента вдоль осей X, Y, Z при $0.4 < t < 0.85$.

Fig. 7. Graphs of vibration displacements of the cutting edge of the tool along the X, Y, Z axes at $0.4 < t < 0.85$

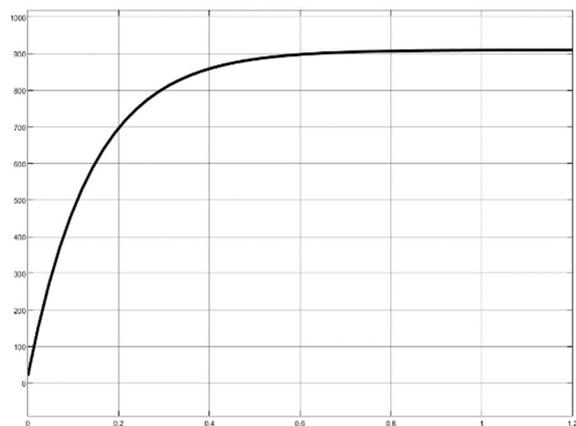


Рис. 8. График изменения температуры в зоне резания от времени

Fig. 8. Graph of temperature change in the cutting zone from time

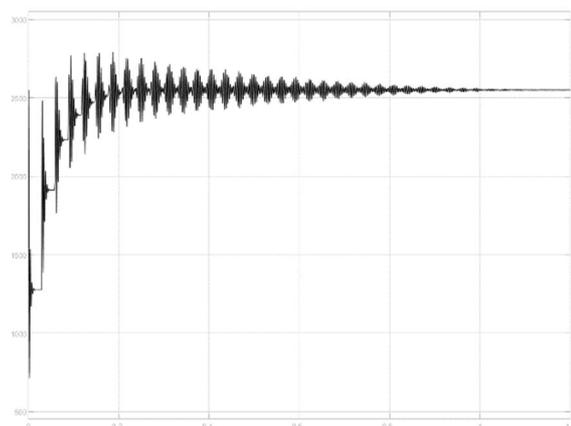


Рис. 9. Графики изменения силы резания от времени

Fig. 9. Graphs of changes in cutting force over time

Волнистость обработанной поверхности полностью определяется уровнем амплитуд автоколебания режущей кромки инструмента, а высотные параметры шероховатости в большей степени определяются интенсивностью автоколебаний. Для определения волнистости и шероховатости по амплитуде колебаний при точении используются разные методики, в данной работе использованы эмпирические зависимости [20]:

$$W_z = C_{W_z} A^{\lambda_{W_z}},$$

$$R_a = C_{R_a} \frac{S^{y_{R_a}} t^{x_{R_a}} \alpha^{n_{R_a}} A^{\lambda_{R_a}}}{V^{z_{R_a}} \gamma^{m_{R_a}}},$$

где W_z – волнистость; R_a – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности; C_{W_z} , $A^{\lambda_{W_z}}$, C_{R_a} , $S^{y_{R_a}}$, $t^{x_{R_a}}$, $\alpha^{n_{R_a}}$, $A^{\lambda_{R_a}}$, $V^{z_{R_a}}$, $\gamma^{m_{R_a}}$ — эмпирические коэффициенты для заданных параметров обрабатываемого материала.

Полученные значения параметров $W_z = 14,34$ мкм $R_a = 1,62$ мкм, при расчете продольная шероховатость не учитывалась, так как она меньше поперечной.

Для внедрения разработанной системы управления на станках с ЧПУ необходимо установить датчики силы и температуры резания, а нечеткий закон управления скоростью резания для достижения оптимальной температуры и подачи для регулирования силы резания возможен посредством ПЛК. Таким

образом, траектория движения режущего инструмента и глубина резания будет заданы штатной системой программного управления станка, а необходимые значения скорости резания и подачи будут определяться динамически на основе нечетких интеллектуальных алгоритмов анализа информации, получаемой от измерительной аппаратуры и характеризующей текущее состояние процесса резания.

Выводы

Интегрирование пакетов виртуального моделирования и математического анализа MSC.Adams и Matlab позволило создать полномасштабную имитационную модель с учетом нечетких алгоритмов управления. Полученная совместная модель на основе виртуального прототипа в Adams и нечеткой двусвязной системы управления токарным станком в Matlab позволяет проводить исследования без создания полномасштабной натурной модели. Из приведенных результатов моделирования видно, что нечеткий закон управления токарной обработкой обеспечивает требуемые показатели качества поверхности в соответствии с заданием. В связи с этим, предложенную совместную модель можно рекомендовать к дальнейшему исследованию для разработки систем управления продольным точением.

Список литературы

1. Кабалдин Ю.Г. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 271 с.
2. A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends / M. Kuntoglu, A. Aslan, U. Ali Usca, E. Salur // *Sensors*, 2021, 21, 108. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010108>.
3. Бобырь М.В. Интеллектуальная система управления оборудованием с ЧПУ // *Автоматизация. Современные технологии*. 2018. № 7. С. 301-306.
4. Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Компенсация взаимосвязи контуров управления поперечной и продольной подачи на основе редуцированной модели токарной обработки // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. № 1 (25). С. 151-166.
5. Learning dynamics and vibrations by MSC. Adams software. URL: <https://aintelligentmanufacturing.com/wp-content/uploads/2020/10/Learning-Dynamics-and-Vibrations-by-ADAMS.pdf> (дата обращения: 11.01.2022).
6. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2188, N 1. P. 030002.
7. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations / V.L. Zakovorotny, V.P. Lapshin, T.S. Babenko // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, N 9. P. 707–708.
8. Influence of the temperature in the tool-workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning / V.P. Lapshin, I.A. Turkin, V.V. Khristoforova, T.S. Babenko // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40, iss. 3. P. 259– 265. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030156>.
9. Linear Regression Thermal Displacement Lathe Spindle Model / Lin C-J, Su X-Y, Hu C-H, Jian B-L, Wu L-W, Yau H-T. // *Energies*, 2020, 13, 949. <https://doi.org/10.3390/en13040949>.
10. Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания / В.Г. Рубанов, И.А. Рыбин, С.А. Сильченко, А.В. Рыбина // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2020. №3/4(10). С. 50-63.
11. MSC Software Corporation. URL: <http://www.mssoftware.ru/>.
12. ControlEngineering. URL: <https://controlengrussia.com/> (дата обращения: 20.01.2022).

13. Рыбина А.В. Моделирование и анализ динамических характеристик обрабатывающего центра. URL: https://www.mscsoftware.com/sites/default/files/ru_forum_pdfs/vuz2017_19_BGTU_Rybina.pdf.

14. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов. 2020. № 3. С. 44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>.

15. Туркин И.А., Русановский Р.В., Калинин А.И. Влияние температуры на динамику процесса ортогонального резания при обработке металлов на станках токарной группы // Молодой исследователь Дона. 2020. № 2(23). С. 55-61.

16. Заковоротный В.Л., Винокурова И. А. Влияние производства тепла на динамику процесса резания // Вестник ДГТУ. 2017. № 3 (90). С. 14– 26.

17. Slavica Prvulovic, Predrag Mosorinski, Dragica Radosav, Jasna Tolmac, Milica Josimovic, Vladimir Sinik Determination of the temperature in the cutting zone while processing machine plastic using fuzzy-logic controller (FLC), Ain Shams Engineering Journal, Volume 13, Issue 3. 2022. 101624. ISSN 2090- 4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.019>.

18. Grinek A.V., Boychuk I.P., Dantsevich I.M. Using fuzzy models in machining control system and assessment of sustainability IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018.

19. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов / С.С. Силин. М. : Машиностроение, 1979. 152 с.

20. Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник ИргТУ. 2018. № 9. С. 67–81.

References

1. Kabaldin YU.G. *Iskusstvennyj intellekt i kiberfizicheskie mekhanoobrabatyvayushchie sistemy v cifrovom proizvodstve* [Artificial Intelligence and Cyber-Physical Machining Systems in Digital Manufacturing]. NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2018, 271 p.

2. Kuntoglu M., Aslan A., Ali Usca U., Salur E. A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends. *Sensors*, 2021, 21, 108. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010108>.

3. Bobyr' M.V. Intellektual'naya sistema upravleniya oborudovaniem s ChPU [Intelligent control system for CNC equipment]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*, 2018, no. 7, pp. 301-306.

4. Mostovoi V.D., Biryukov V.P. Kompensatsiya vzaimosvyazi konturov upravleniya poperechnoi i prodol'noi podachi na osnove redutsirovannoi modeli tokarnoi obrabotki

[Compensation of the interconnection of the control circuits of transverse and longitudinal feed based on a reduced turning model]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2018. no. 1 (25). pp. 151-166.

5. Learning dynamics and vibrations by MSC. Adams software URL: <https://aintelligentmanufacturing.com/wp-content/uploads/2020/10/Learning-Dynamics-and-Vibrations-by-ADAMS.pdf> (дата обращения: 11.01.2022).

6. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2188, no. 1. P. 030002.

7. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 707–708.

8. Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V., Babenko T.S. Influence of the temperature in the tool-workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning. *Russian Engineering Research*. 2020, vol. 40, iss. 3, pp. 259–265. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20030156>.

9. Lin C-J, Su X-Y, Hu C-H, Jian B-L, Wu L-W, Yau H-T. Linear Regression Thermal Displacement Lathe Spindle Model. *Energies*, 2020, 13, 949. <https://doi.org/10.3390/en13040949>.

10. Rubanov V. G., Rybin I. A., Sil'chenko S. A., Rybina A. V. Modelirovanie sistem upravleniya rezhimami tokarnoi obrabotki s uchetom izmeneniya temperatury v zone rezaniya [Modeling of control system for turning modes, taking into account temperature changes in the cutting area *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2020, no. 3/4(10), pp. 50-63.

11. MSC Software Corporation. Available at: <http://www.mscsoftware.ru/>

12. ControlEngineering. Available at: <https://controlengrussia.com/> (accessed: 20.01.2022).

13. Rybina A.V. Modeling and analysis of dynamic characteristics of the processing center. URL: https://www.mscsoftware.com/sites/default/files/ru_forum_pdfs/vuz2017_19_BGTU_Rybina.pdf.

14. Lapshin V. P., Khristoforova V. V., Nosachev S. V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [The relationship of temperature and cutting force with wear and tool vibrations in metal turning] // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Processing (technology, equipment, tools)*, 2020, no. 3, pp. 44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>.

15. Turkin I. A., Rusanovskii R. V., Kalinin A. I. Vliyanie teperatury na dinamiku protsessa ortogonal'nogo rezaniya pri obrabotke metallov na stankakh tokarnoi gruppy [The

influence of temperature on the dynamics of orthogonal cutting process during metal processing on lathes]. *Molodoi issledovatel' Dona =Young Researcher of the Don*, 2020, no. 2(23), pp. 55-61.

16. Zakovorotnyi V. L., Vinokurova I. A. Vliyanie proizvodstva tepla na dinamiku protsessa rezaniya [The effect of heat production on the dynamics of the cutting process]. *Vestnik DGTU = Bulletin of the DSTU*, 2017, no. 3 (90), pp. 14–26.

17. Slavica Prvulovic, Predrag Mosorinski, Dragica Radosav, Jasna Tolmac, Milica Josimovic, Vladimir Sinik Determination of the temperature in the cutting zone while processing machine plastic using fuzzy-logic controller (FLC), *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 3. 2022. 101624. ISSN 2090- 4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.019>.

18. Grinek A. V., Boychuk I. P., Dantsevich I. M. Using fuzzy models in machining control system and assessment of sustainability IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018.

19. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [The method of similarity in metal cutting]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979, 152 p.

20. Pyatykh A. S. Povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva obrabotki otverstii na osnove otsenki dinamiki protsessa rezaniya [Improving the productivity and quality of hole processing based on the assessment of the dynamics of the cutting process]. *Vestnik IrGTU= Bulletin of IrSTU*, 2018, no. 9, pp. 67–81.

Информация об авторах / Information about the Authors

Белоусов Александр В., кандидат технических наук, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: ntk@intbel.ru

Alexander V. Belousov, Cand. Of Sci. (Engineering), Director of the Institute of Energy, Information Technologies and Control Systems, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: ntk@intbel.ru

Рыбина Анна В., аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru

Anna V. Rybina, Post-Graduate Student, Department of Technical Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: anna.vasilevna@mai.ru