

А. Н. Шмойлов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСОТОКАРНЫМ СТАНКОМ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРОФИЛЯ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Аннотация. Рассмотрен вопрос разработки автоматизированной системы управления колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов, установлены причины преждевременного выхода из строя быстроходных фрез специализированных колесотокарных станков. Была определена функция готовности системы управления скоростью вращения шпинделя станка и подачи рабочего инструмента. В работе были проанализированы значения модуля скорости резания металла при восстановлении профиля катания колесной пары и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка, а также результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы колесотокарного станка и основные характеристики элементов динамической системы станка. Исследован характер колебаний рабочего инструмента станка и проанализированы факторы, которые вызывают данные колебания. Предложена блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком и приведен набор основных элементов основного контура системы управления специализированным колесотокарным станком.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, колесотокарный станок, динамическая система, оптимальная скорость подачи режущего инструмента, автоколебания, концевая быстроходная фреза.

Для цитирования: Шмойлов, А. Н. Автоматизированная система управления колесотокарным станком при восстановлении профиля катания колесных пар грузовых вагонов / А. Н. Шмойлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 44–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_44.

Введение

В настоящее время актуальным остается вопрос увеличения показателей надежности тех узлов и деталей эксплуатируемого парка подвижного состава, которые являются наиболее нагруженными и чаще других выходят из строя [1]. Согласно действующим регламентным документам на железнодорожном транспорте в целях обеспечения безопасности движения поездов особое внимание должно уделяться техническому состоянию ходовых частей вагонов, в том числе колесным парам [2]. Операции по восстановлению профиля катания колесных пар являются неотъемлемой частью важнейших технологических цепочек производственного цикла вагоноремонтных депо [3]. От эффективности данной технологической операции зависит значительная часть экономии ресурсов предприятия и трудозатрат при ремонте колесных пар. Развитие железнодорожного транспорта тесно связано с развитием основных отраслей современного машиностроения.

Технологические операции по восстановлению профиля катания колесных пар сопровождаются динамической нестабильностью технической системы колесотокарного станка, что негативно сказывается на стойкости инструмента, оборудования и качестве обработки. Регенерация автоколебаний под воздействием вибраций на поверхности резания является основной причиной динамической нестабильности [4]. Необходимо понимать природу и закономерности этого процесса для эффективного управления автоколебаниями. Модуляция скорости резания может открывать новые возможности для стабилизации технологической системы.

Цель научной разработки

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов. В соответствии с поставленной целью разрабатываемая система должна учитывать влияние динамических процессов обработки металла резанием на ресурс и долговечность режущего инструмента в условиях различных внешних возмущений с целью осуществления управляющих воздействий на электроприводы станка.

Основная часть

Важную роль при восстановлении профиля катания колесных пар на колесотокарном станке играет четкое соблюдение алгоритма работы и выполнение всех технологических операций при взаимодействии всех элементов динамической системы станка [5]. Данные взаимодействующие элементы принято рассматривать как комбинацию элементов упругой динамической системы и рабочих процессов торцевого фрезерования при обработке поверхности колесной пары. Были аналитически определены различные параметры представленной системы и определены параметры срезаемого слоя. При этом учитывались поправки на толщину среза и фактического положения в пространстве рабочего инструмента колесотокарного станка. Учитывались вибрации, которые возникают в точке пересечения рабочего инструмента с передней кромкой инструмента.

Для дальнейшего экспериментального исследования данных процессов поверхность рабочей фрезы была математически преобразована и описана. Данные преобразования позволили составить схему динамической системы фрезерного станка. В основу данной динамической системы легла пространственная матрица точек. Основные элементы динамической системы колесотокарного станка и ее структурная схема представлены на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема динамической системы колесотокарного станка

В данной динамической системе указаны входные и выходные величины, которые обладают линейными зависимостями. В качестве входных величин приняты составляющие силы подсистемы режущего инструмента (P_a , P_b , P_c) и момент резания (M_p). Выходами данной модели приняты значения характеристик движения отдельных звеньев системы и колебательных контуров (A_1 , B_1 , C_1) и заготовки (перемещения (A_2 , B_2 , C_2), а также скорости V_2).

Экспериментальные исследования данной динамической системы колесотокарного станка позволили установить прямую зависимость между напряжениями и деформациями отдельных элементов станка. При этом установлено, что при воздействии внешних сил на упругое тело системы в любом известном соотношении, напряжения, деформации и перемещения увеличиваются (уменьшаются) в одинаковой пропорции в любой точке тела.

На основе представленной динамической системы была разработана экспериментальная модель, которая описывает жесткость системы «станок – инструмент – заготовка». Данная модель позволяет реализовывать оптимальные режимы резания (глубина резания, подача) при восстановлении профиля колесных пар. Разработанная экспериментальная модель состоит из трех подмоделей: эластичной модели станка, рабочего режущего инструмента и процесса резания обрабатываемой поверхности.

Исследование представленной динамической модели позволило установить взаимосвязь между параметрами сил трения соприкасающихся элементов станка, жесткости системы станка и возникающих автоколебаний рабочего инструмента при обточке поверхности катания колесной пары.

Установлено, что большое количество деталей в силовой схеме станка и наличие относительного небольшого перемещения в соединениях данных деталей при вибрациях системы приводят к разбалансировке всей системы [6]. Данная разбалансировка приводит к большим отклонениям заданного положения рабочего инструмента станка, вследствие чего происходит отклонение допусков снимаемого слоя металла и, в конечном итоге, нарушение технологии восстановления профиля катания колёсных пар грузовых вагонов железнодорожного транспорта.

Практическая реализация результатов предоставленной работы заключается в решении следующих вопросов: уменьшение вибраций, снижение износа рабочего инструмента и повышение точности обработки.

Данные целевые показатели невозможно выполнить без постоянного контроля и мониторинга величин вибраций. Данный контроль позволит повысить качество обрабатываемой поверхности колесной пары и даст предпосылки к снижению трудоемкости данной технологии.

С целью снижения проявления нарушений допусков при обработке и уменьшения ресурса режущего инструмента в процессе восстановления профиля катания колесных пар на колесотокарном станке необходимо более ответственно отнестись к выбору составных частей системы управления данной замкнутой динамической системы. Правильно выбранная система управления позволит свести к минимуму колебания режущего инструмента в процессе обработки колесной пары. В результате проведенной работы было установлено, что при увеличении величин динамических возмущений происходит рост интенсивности износа рабочего инструмента и снижение точности обработки.

В работе были проанализированы различные варианты настройки оборудования станка в зависимости от величины динамических возмущений. Была определена функция готовности системы управления скоростью станка по формуле (1). Вероятность наступления первого события равна вероятности безотказной работы объекта $F(t)$ в течение определенного периода времени $(0, t)$.

$$\Gamma(t) = \frac{\lambda_s}{\lambda_0 + \lambda_s} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_s} \cdot \exp[-(\lambda_s + \lambda_0) \cdot t], \quad (1)$$

где λ_0 – параметр распределения наработки между отказами;

λ_s – параметр распределения времени восстановления.

Функцию готовности была рассчитана на интервале $0 \dots 20$ ч с промежутками 2 ч.

Пример графических зависимостей приведен на рис. 2.

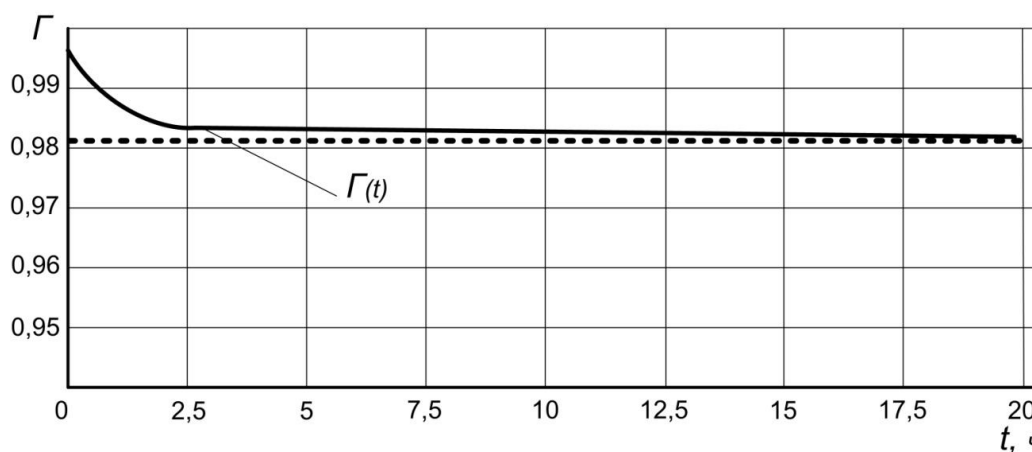


Рис. 2. Результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы специализированного колесотокарного станка

По итогам данной работы была разработана система автоматического управления специализированным колесотокарным станком для восстановления профиля катания колесной пары. Данная система управления включает в себя подсистему модулирования скорости резания обрабатываемой поверхности колесной пары. Детально проработаны конструктивные технические особенности основных составных частей данной системы [7]. Предлагается решить проблему возбуждения путем создания цепи обратной

связи в «механической» части. Это позволяет упростить систему снятия и возбуждения колебаний, а также обеспечить самонастройку на резонансную частоту и отслеживать ее изменение [8–9].

В качестве чувствительных элементов в системе могут быть использованы мембранные и нелинейные преобразователи колебаний различных конструкций. Данные технические решения позволяют снизить трудоёмкость испытаний и дают возможность осуществлять непрерывную дистанционную настройку и корректировку программы измерений при монтаже блоков контроля параметров в основные узлы и приводы колесотокарного станка [10].

Был разработан алгоритм управления колесотокарным станком, который позволит в автоматическом режиме подбирать оптимальную скорость подачи режущего инструмента и необходимую технологическую программу по работе основных механизмов и приводов станка при восстановлении профиля катания колесной пары.

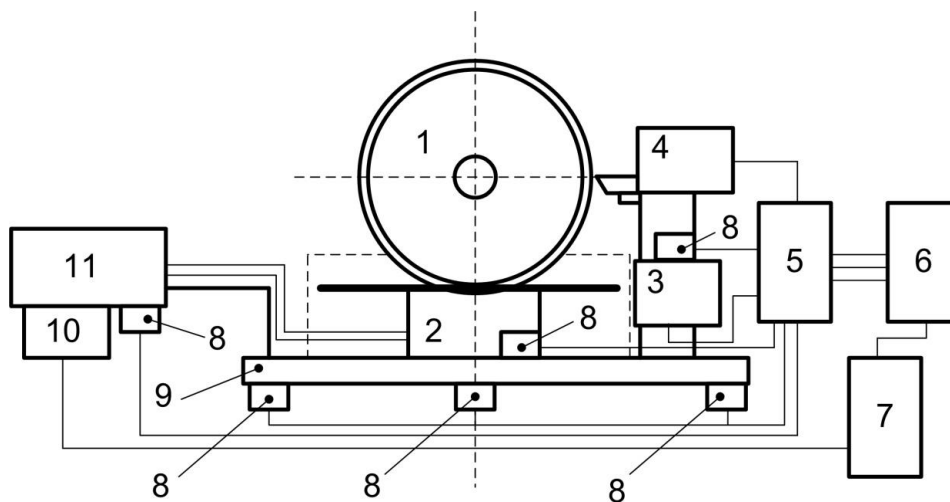


Рис. 3. Блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком по восстановлению профиля катания колесной пары:

1 – обрабатываемая колесная пара; 2 – металлическая основа; 3 – блок контроля вертикальных перемещений; 4 – блок контроля горизонтальных перемещений; 5 – преобразователь сигналов; 6 – блок вычислений; 7 – подсистема модулирования скорости резания металла; 8 – блок контроля вибраций; 9 – горизонтальный кронштейн металлической основы станка; 10 – модуль управления электроприводом; 11 – электропривод станка

Подсистема модулирования скорости резания металла соединена через блок вычислений и преобразователь сигналов с блоком контроля вибраций. Металлическая основа станка имеет в своем составе горизонтальный кронштейн с расположенными на нем блоками контроля вибраций. Электропривод станка получает управляющие сигналы от подключенного к нему специального модуля управления электроприводом. Корректировка работы модуля управления электроприводом осуществляется с помощью подсистемы модулирования скорости резания металла. Блок вычислений с подключенными к нему блоками контроля горизонтальных и вертикальных перемещений и преобразователем сигналов образуют основной контур системы управления специализированным колесотокарным станком.

Далее был разработан алгоритм управления данным станком, который позволит в автоматическом режиме подбирать оптимальную скорость обработки поверхности катания колесной пары в зависимости от возникающих автоколебаний.

В работе были проанализированы значения модуля скорости резания металла при восстановлении профиля катания колесной пары и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка, а также результаты расчетов показателей готовности восстанавливаемых объектов динамической системы колесотокарного станка и основные характеристики элементов динамической системы станка.

На рис. 4 приведены зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний рабочего инструмента станка. Рабочим инструментом колесотокарного станка является концевая быстроходная фреза.

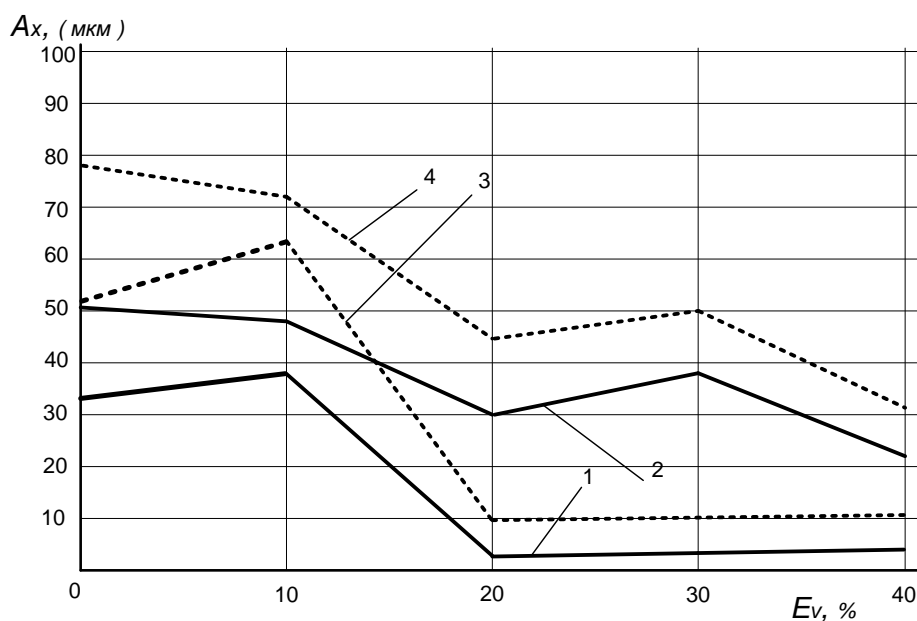


Рис. 4. Зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний концевой быстроходной фрезы станка:

1, 3 – нормальный режим обработки, 2, 4 – режим обработки при сдвиге модуля скорости

При обработке поверхности катания колесной пары происходит колебание рабочего инструмента. Характер данных колебаний зависит от различных факторов: направления действия и величин сил, прикладываемых к резу. Образующиеся при этом колебательные процессы можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся вынужденные колебания, которые образуются в результате вхождения зубьев фрезы в заготовку. Данный вид вынужденных колебаний формируется, в основном, при выполнении чистовой обработки поверхности катания колесной пары. Ко второй группе можно отнести колебания возникающих при черновой и чистовой обработке поверхности катания колесных пар. Данные колебания формируются при низких скоростях вращения шпинделя станка в подсистеме изгиба инструмента. Основным фактором возникновения данных колебаний является жесткость резания металла поверхности катания колесной пары.

Крутильные автоколебания, возникающие при высоких скоростях вращения шпинделя инструмента при черновой и чистовой обработке поверхности катания колесной пары, относятся к третьей группе вынужденных колебаний. Характер данных колебаний хаотичный и интенсивный. При этом существует большая вероятность появления резонансных колебаний изгибных подсистем инструмента и обрабатываемой колесной пары.

Применение систем модуляции скорости колесотокарного станка с автоподстройкой скорости в зависимости от величин сил, прикладываемых к резу, позволит уменьшить вероятность возникновения подобных нежелательных колебательных процессов.

Выводы

По итогам проведенных в работе расчетов и исследований можно констатировать следующее: разработка и внедрение автоматизированной системы управления колесотокарным станком позволит на 17 % повысить качество восстановления профиля катания колесных пар грузовых вагонов на вагоноремонтных предприятиях.

В результате проведенной работы были получены следующие основные результаты:

1 Установлены причины преждевременного выхода из строя быстроходных фрез специализированных колесотокарных станков.

2 Разработаны методы определения режимов резания металла и скорости подачи рабочего инструмента на станке с использованием модуляции скорости.

3 В работе были проанализированы различные варианты настройки оборудования станка в зависимости от величины динамических возмущений.

4 Установлены зависимости модуля скорости резания и амплитуды автоколебаний концевой быстроходной фрезы станка.

5 Исследован характер колебаний рабочего инструмента станка и проанализированы факторы, которые вызывают данные колебания.

6 Предложена блок-схема автоматизированной системы управления колесотокарным станком.

Список литературы

1 **Клюканов, А. В.** Повышение эффективности устранения дефектов колесных пар механизированных способом в пункте текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов / А. В. Клюканов, А. Н. Шмойлов, Ю. В. Шмойлова // Транспорт, наука, образование в XXI веке : опыт, перспективы, инновации. Материалы VII Международной научно-практической конференции ; ООО «Аэтерна». – Уфа, 2017. – С. 35–37. – ISBN 978-5-00109-298-8.

2 Оптимизация выбора колесотокарных станков / А. И. Быков, В. Н. Жданов, Т. А. Фролова, О. Ю. Кривич // Наука и техника транспорта. 2018. – №4. – С. 8–12. – ISSN 2074-9325.

3 **Троилин, Н. В.** Обновление парка колесотокарных станков : проблемы, перспективы, решения / Н. В. Троилин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 4 (32). – С. 36–37. – ISSN 1817-6089.

4 **Ягьяев, Э. Э.** Методы стабилизации процесса чистового шлифования с учетом изменения состояния технологической системы / Э. Э. Ягьяев, Л. Б. Шрон // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 4 (82). – С. 230–235. – ISSN 2658-364X.

5 **Кротов, С. В.** Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (44). – С. 70–76. – ISSN 1815-588X.

6 **Каленов, В. Е.** Создание автоколебательного режима работы в микромеханических системах на основе емкостного преобразователя / В. Е. Каленов, А. В. Корляков, С. В. Кротов // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – № 5 (18). – С. 286–296. – ISSN 1813-8586.

7 **Ким, К. К.** Электрические измерения неэлектрических величин / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. А. Ткачук. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 137 с. – ISBN 978-5-4486-0731-8.

8 **Ким, К. К.** Средства электрических измерений и их поверка / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, А. И. Чураков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 316 с. – ISBN 978-5-8114-6981-9.

9 Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, М. А. Ефремов, Р. Ф. Крупский, Х. Х. Азимов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и

References

1 **Klyukanov, A. V.** Improving the efficiency of eliminating defects in wheelsets by a mechanized method at the point of ongoing uncoupling repair of freight wagons / A. V. Klyukanov, A. N. Shmoilov, Yu. V. Shmoilova // Transport, science, education in the 21st century : experience, prospects, innovations. Materials of the VII International scientific and practical conference ; Aeterna LLC. – Ufa, 2017. – P. 35–37. – ISBN 978-5-00109-298-8.

2 Optimization of the choice of wheel lathes / A. I. Bykov, V. N. Zhdanov, T. A. Frolova, O. Y. Krivich // Science and technology of transport. – 2018. – No. 4. – P. 8–12. – ISSN 2074-9325.

3 **Troilin, N. V.** Updating the fleet of wheel lathes : problems, prospects, solutions / N. V. Troilin // Wagons and carriage facilities. – 2012. – No. 4 (32). – P. 36–37. – ISSN 1817-6089.

4 **Yagyaev, E. E.** Methods for stabilizing the process of finishing grinding, taking into account changes in the state of the technological system / E. E. Yagyaev, L. B. Shron // Scientific notes of the Crimean engineering and pedagogical university. – 2023. – No. 4 (82). – P. 230–235. – ISSN 2658-364X.

5 **Krotov, S. V.** Determination of vertical dynamic forces acting on a wheel in contact with a rail / S. V. Krotov, D. P. Kononov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2015. – No. 3 (44). – P. 70–76. – ISSN 1815-588X.

6 **Kalenov, V. E.** Creation of self-oscillating mode of operation in micromechanical systems based on a capacitive converter / V. E. Kalenov, A. V. Korlyakov, S. V. Krotov // Nano- and microsystems technology. – 2016. – No. 5 (18). – P. 286–296. – ISSN 1813-8586.

7 **Kim, K. K.** Electrical measurements of non-electrical quantities / K. K. Kim, G. N. Anisimov, A. A. Tkachuk. – Saratov : IPR Media, 2019. – 137 p. – ISBN 978-5-4486-0731-8.

8 **Kim, K. K.** Electrical measuring instruments and their verification / K. K. Kim, G. N. Anisimov, A. I. Churakov. – St-Petersburg : Lan, 2021. – 316 p. – ISBN 978-5-8114-6981-9.

9 Information and measuring electromechanical system / P. O. Sayapina, M. A. Efremov, R. F. Krupsky, Kh. Kh. Azimov // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Natural sciences and technology. – 2023. – No. I (65). – P. 94–101. – ISSN 2076-4359.

технике. – 2023. – № I (65). – С. 94–101. – ISSN 2076-4359.

10 Саяпина, П. О. Измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, Р. Ф. Крупский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2023. – № 5 (69). – С. 23–29. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-23.

10 Sayapina, P. O. Measuring electromechanical system / P. O. Sayapina, R. F. Krupsky // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. – 2023. – No. 5 (69). – P. 23–29. – DOI 10.17084/20764359-2023-69-23.

A. N. Shmoilov

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A WHEEL LATHE FOR RESTORING THE ROLLING PROFILE OF WHEEL SETS OF FREIGHT WAGONS

Abstract. The study considers the issue of developing an automated control system for a wheel lathe to restore the rolling profile of wheel sets of freight wagons, and establishes the causes of premature failure of high-speed milling cutters of specialized wheel-rolling machines. The readiness function of the control system for the rotation speed of the machine spindle and the working tool feed was determined. The work analyzes the values of the modulus of the metal cutting speed during the restoration of the rolling profile of the wheelset and the amplitude of the self-oscillation of the working tool of the machine, as well as the results of calculations of the readiness indicators of the restored objects of the dynamic system of the wheel machine and the main characteristics of the elements of the dynamic system of the machine. The nature of the oscillations of the working tool of the machine is investigated and the factors that cause these oscillations are analyzed. A block diagram of an automated wheel-rolling machine control system is proposed and a set of basic elements of the main contour of the control system for a specialized wheel lathe is presented.

Keywords: automated control system, wheel lathe, dynamic system, optimal feed rate of the cutting tool, self-oscillation, high-speed end mill.

For citation: Shmoilov, A. N. Automated control system for a wheel lathe for restoring the rolling profile of wheel sets of freight wagons / A. N. Shmoilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 44–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_44.

Сведения об авторах

Шмойлов Андрей Николаевич

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС),
кафедра «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Shmoilov@inbox.ru

Information about the authors

Shmoilov Andrey Nikolaevich

Volga State Transport University (VSTU),
Chair “Carriage Facilities and Land Transport Complexes”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Shmoilov@inbox.ru