



Научная статья

УДК 621.71

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>



Динамическое модальное управление движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ

Иван Владимирович Чичерин^а, Борис Андреевич Федосенков^б

^{а,б} Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Автор, ответственный за переписку: Федосенков Борис Андреевич, rafwaveletsve@mail.ru

Резюме. Целью данного исследования являлось представление ряда аспектов современной концепции автоматизированного динамического модального управления карьерными беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ. В частности, в программно-аппаратный комплекс, входящий в состав глобальной структуры «Умный карьер», заложены условия соответствия формы определенных текущих траекторий (их девиации влево или вправо от номинальной осевой траектории) информационным «траекторным» чирп-сигналам. В ходе исследования были использованы методы вейвлет-преобразований одномерных сигналов, формирующих текущие траектории беспилотных транспортных средств, в формат время-частотных распределений класса Козна. Схематично рассмотрено формирование текущих траекторий беспилотного транспортного средства при их девиации влево / вправо от номинальной осевой траектории на прямолинейных и искривленных маршрутах. Отмечено, что отслеживание текущих траекторий на карьерных маршрутах осуществляется с учетом характера траекторных сигналов. Сформулировано отличие вводимого в рассмотрение динамического модального управления беспилотного транспортного средства от статического. В подсистемы автономного и внешнего управления введены фрагменты, отображающие 1D-сигналы в вейвлет-среде. При этом в автоматизированной системе управления используются такие элементы аппарата вейвлет-преобразований, как вейвлет-функции Габора, алгоритм вейвлет-поиска соответствия, время-частотные распределения класса Козна. В результате исследований были сформулированы критерии формирования текущих траекторий системой управления в виде ее реакций на спорадические возмущения, вызванные возникновением на маршруте статических или динамических препятствий. Разработан алгоритм динамического модального управления текущими траекториями. Введено понятие прямых и обратных переходных процессов сигналов девиации траекторий беспилотного транспортного средства. Описана процедура оценки параметров модального регулятора. Разработан алгоритм пересчета матрицы модального регулятора в виде цепочки последовательно реализуемых матричных процедур. В заключение отметим, что на основе проведенных исследований разработана автоматизированная система модального управления процессом девиации текущих траекторий, позволяющая выполнять функции управления динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения беспилотных транспортных средств по карьерным маршрутам в конфликтной среде открытых горных работ.

Ключевые слова: карьерные маршруты, беспилотные транспортные средства, динамическое модальное управление, траектории, девиация, вейвлеты

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-20 19-034 от 22.11.2019 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Разработка и создание высокотехнологичного производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых в системе «Умный карьер»», при участии Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам Института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева за содействие в подготовке публикации.

Для цитирования: Чичерин И. В., Федосенков Б. А. Динамическое модальное управление движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 271–284. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>.



Original article

Dynamic modal control of unmanned vehicle movement in open pit mining

Ivan V. Chicherin^a, Boris A. Fedosenkov^b

^{a,b}T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Corresponding author: Boris A. Fedosenkov, rafwaveletsve@mail.ru

Abstract. The purpose of this study is to present a number of aspects in the modern concept of computer-aided dynamic modal control of unmanned quarry vehicles in open pit mining. In particular, the software and hardware module that is a part of the “Smart Quarry” global structure deals with the conditions of matching a form of specific current trajectories (their deviation to the left or right of the nominal axial trajectory) to information “trajectory” chirp signals. The study employs the methods of wavelet transforms to convert one-dimensional signals that generate unmanned vehicle current trajectories into the time-frequency distributions of Cohen’s class. The formation of unmanned vehicle current trajectories under their deviation to the left / right from the nominal axial trajectory on straight and curved routes is considered schematically. It is noted that the tracking of unmanned current trajectories on quarry routes is carried out taking into account the nature of trajectory signals. The difference between the introduced dynamic modal control of the unmanned vehicle and the static one is formulated. Some fragments displaying 1D-signals in a wavelet medium are introduced into the autonomous and external control subsystems. The computer-aided control system uses such elements of the wavelet transforms technique as Gabor wavelet functions, the wavelet matching pursuit algorithm, and Cohen’s class time-frequency distributions. The research results in formulating the criteria for forming the unmanned vehicle current trajectories by the control system in the form of its reactions to sporadic disturbances caused by the occurrence of static or dynamic obstacles on a route. The algorithm of dynamic modal control of current trajectories has been developed. The concept of forward and reverse transient processes of signals of unmanned vehicle trajectory deviation has been introduced. The estimation procedure of modal controller parameters has been described. The algorithm has been developed for modal controller matrix recalculation, which has the form of the chain of sequentially implemented matrix procedures. It should be noted in conclusion that a computer-aided system for modal control of current trajectory deviation has been developed on the basis of the performed research. It enables to implement the functions of controlling the dynamics of technological and safe movement of unmanned vehicles along the quarry routes in a conflict environment of open pit mining.

Keywords: quarry routes, unmanned vehicles, dynamic modal control, trajectories, deviation, wavelets

Funding: the work was carried out with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement No. 075-11-20 19-034 of November 22, 2019 and the Public Joint Stock Company KAMAZ on the complex project “Development and creation of high-tech production of autonomous heavy platforms for unmanned mining in the Smart Quarry system”, with the participation of the Federal State-funded Educational Institution of Higher Education T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in the implementation of research and development works and technological works.

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the staff of the T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Institute of Information Technologies, Mechanical Engineering, and Motor Transport) for their assistance in publication preparation.

For citation: Chicherin I. V., Fedosenkov B. A. Dynamic modal control of unmanned vehicle movement in open pit mining. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):271-284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-271-284>.

Введение

Для устойчивого и эффективного развития горных территорий, на которых размещены горнорудные предприятия, в том числе угольные и рудные разрезы для открытой добычи полезного ископаемого, весьма важным фактором является внедрение новейшей горно-транспортной техники, к которой относится получающее все большее распространение автономное транспортное оборудование и в

первую очередь беспилотные автосамосвалы большой и сверхбольшой грузоподъемности. В связи с этим научная теоретическая и практическая формы исследования поведения такого рода объектов в конфликтной среде представляют собой чрезвычайно актуальные аспекты функционирования современных производственных систем.

В представленном исследовании рассмотрены принципы динамического модального

управления передвижением беспилотных транспортных средств (БТС) [1–5]¹ по прямым и искривленным технологическим маршрутам в карьерах в условиях открытых горных работ. Технологические маршруты задаются в так называемом формате сплайн-фреймов (S-фреймов) [6, 7], то есть в формате полос движения в виде искривленных (выпуклых или вогнутых) сплайн-окон.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим вопросы, связанные с характеристиками сигналов, формируемых в программно-аппаратном комплексе производственной структуры «Умный карьер» и отражающих динамику текущих траекторий (ТТ) БТС на технологических маршрутах.

В директориях программно-аппаратного комплекса заложены условия соответствия динамики определенной ТТ, то есть ее девиации влево / вправо от номинальной осевой траектории (НОТ), информационным «траекторным» синусоидально подобным сигналам $x(t)$: влево – сигнал с падающей мгновенной частотой, вправо – с возрастающей. В теории обработки сигнальной информации такого рода сигналы именуются «чирп-сигналами» [8, 9], то есть сигналами, изменяющимися с мгновенной время-зависимой частотой.

На рис. 1 на прямом S-фрейме изображены две девиационные ТТ с указанием прямых (отклоняющихся от НОТ) и обратных (возвращающихся к НОТ) ТТ. В программно-аппаратном комплексе, входящем в состав автоматизированной системы диспетчеризации структуры «Умный карьер», прямым и обратным переходным процессам, как указано выше, ставятся в соответствие одномерные (скалярные) информационные чирп-сигналы – сигналы $x(t)$ с время-зависимой частотой. По характеру этих сигналов, а также по их многомерным вейвлет-отображениям [8, 9] в подсистемах внешнего (в составе автоматизированной системы диспетчеризации) и автономного (установленного на борту БТС) управления (ПСВУ и ПСАУ) осуществляется процесс

формирования и отслеживания ТТ перемещения БТС по соответствующему маршруту в карьере.

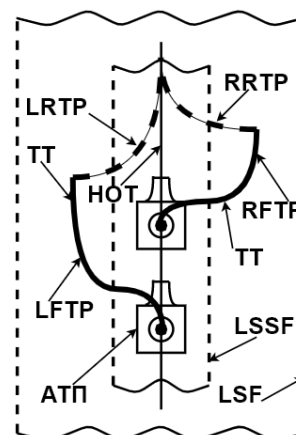


Рис. 1. Схема возникновения возмущенных прямых (девиационных) и формирования обратных восстанавливающих траекторий беспилотного транспортного средства на прямом участке S-фрейма при уходе текущих траекторий влево и вправо от номинальной осевой траектории
Fig. 1. Diagram of origin of disturbed forward (deviation) trajectories and formation of reverse restoring trajectories of an unmanned vehicle on the straight section of the S-frame when a current trajectory moves to the left and right of the nominal axial trajectory

Принцип статического модального управления. Статическое модальное управление [10–12] подразумевает принудительное размещение полюсов объекта управления на комплексной плоскости с помощью матрицы полной обратной связи по состоянию [10, 12]. Объектом управления здесь является сигнал о ТТ БТС на маршруте. Принудительное размещение полюсов необходимо для удовлетворения требования обеспечить соответствующее качество регулирования [11, 12], то есть формирование определенной ТТ на маршруте.

Принцип динамического модального управления. Отличие динамического модального управления от статического состоит в том, что во время переходного процесса происходит смена локализации ряда полюсов на комплексной плоскости, то есть переформатирование созвездия полюсов. Это, в свою

¹ SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles: ground vehicle standard. SAE International, 2016. Issued: January 2014; revised: September 2016. 30 p.



очередь, ведет к варьированию качества регулирования в связи с изменением характера переменных состояния [12] объекта управления. Такое варьирование обусловливается динамическим изменением значений элементов матрицы обратной связи. Подобное динамическое изменение формы созвездия полюсов приводит к динамическому изменению ТТ БТС.

Формирование девиационных текущих траекторий. Рассмотрим подробнее процесс формирования ТТ при их девиациях от НОТ.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: LSF (local spline frame) – локальный S-фрейм; LSSF (local sub-spline frame) – локальный суб-S-фрейм; АТП – автономная тяжелая платформа (БТС); НОТ – номинальная осевая траектория движения АТП; LFTP / RFTP (left forward transient process / right forward transient process) – соответственно прямые переходные процессы девиации ТТ движения БТС влево / вправо от НОТ; LRTP / RRTP (left reverse transient process / right reverse transient

process) – соответственно обратные переходные процессы восстановления НОТ при девиации ТТ движения БТС влево / вправо от НОТ.

На рис. 2 в совмещенном виде схематично изображены искривленные S-фреймы с ТТ, уходящими влево и вправо от НОТ. Сплошными тонкими линиями изображены две линии НОТ движения БТС.

На фрагменте S-фрейма, уходящего по кривой вправо, точками A_r и B_r отмечены точки перегиба сигнала левой и правой прямой траекторий, а точкой E_r – точка перегиба на правой обратной траектории. На маршруте с левым искривлением аналогичные точки перегиба на левой и правой прямой траекториях – это точки A_l и B_l , а точкой C_l отмечена точка перегиба на правой прямой девиационной траектории. Точки перегиба на ТТ удовлетворяют траекториям, формируемым в соответствии с апериодическим процессом второго порядка [11, 12]. К ним относятся ТТ с сигналами, соответствующими левым прямому и обратному переходным процессам, а также

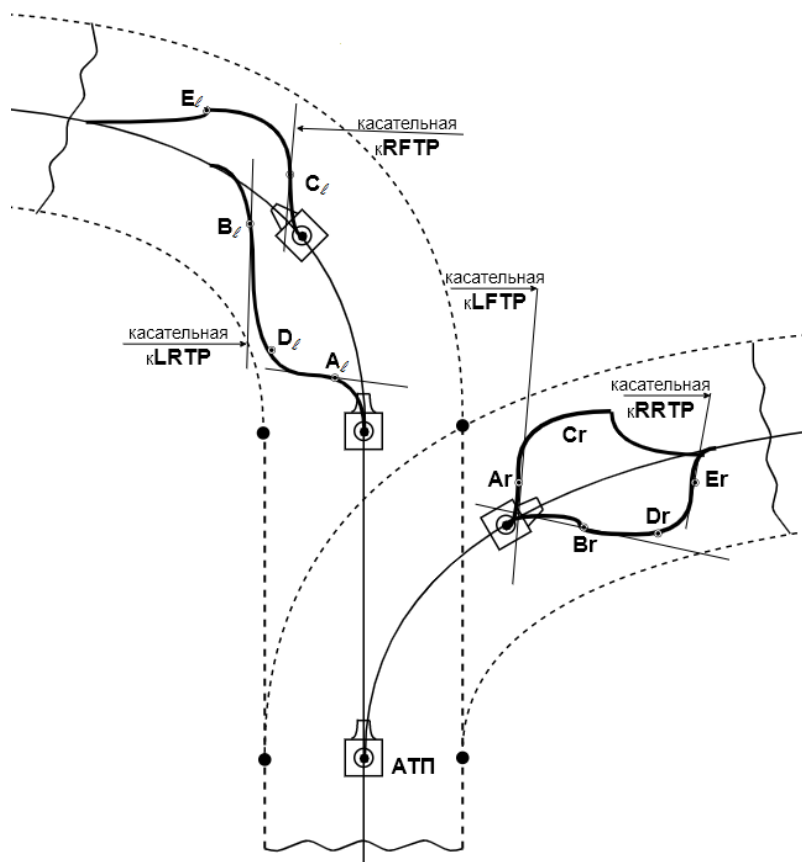


Рис. 2. Искривленные S-фреймы с текущими траекториями, уходящими влево и вправо от номинальной осевой траектории, изображенные в совмещенном виде
Fig. 2. Curved S-frames with current trajectories moving to the left and right of the nominal axial trajectory shown in a combined form



правому прямому на маршруте с левым искривлением. На маршруте с правым искривлением по апериодическому процессу второго порядка формируется траекторный сигнал на левом прямом участке ТТ, а на правой девиационной траектории – на ее прямом и обратном участках.

Точки активации процедуры модального управления – это точки C_r и D_r на левой и правой траекториях соответственно. Точки активации модального управления на девиационных ТТ БТС на маршруте с левым искривлением отмечены как D_l и E_l соответственно на ТТ, отклонившейся влево / вправо от НОТ.

Обратный переходный процесс в режиме модального управления для левой девиационной траектории на S-фрейме с правым искривлением, формируемый в режиме апериодического процесса первого порядка, имеет такой же характер, как и для правой девиационной ТТ на S-фрейме с левым искривлением.

С целью информативно полной и семантически прозрачной обработки сигналов в ПСАУ и ПСВУ в программные комплексы последних введены фрагменты, обеспечивающие формирование вейвлет-преобразований с их элементами: вейвлет-функциями [9, 13–15], алгоритмом вейвлет-поиска соответствия [9, 16], квадратичными вейвлет-распределениями класса Козна [9, 17–19].

Результаты исследования и их обсуждение

Переходные процессы в сигналах девиационных текущих траекторий. Следует отметить, что формирование девиационных ТТ обусловлено возникновением на рабочем маршруте динамического препятствия, например в виде группы идущих людей, стационарного препятствия типа временно установленных средств освещения, электротехнических распределительных устройств с воздушным / кабельным отведением или лежащих на дорожном полотне негабаритных кусков породы / угля.

Объезд транспортным средством динамического или статического препятствия выполняется с учетом следующих положений.

1. Сигнал девиационной ТТ рассматривается состоящим из двух участков (переходных

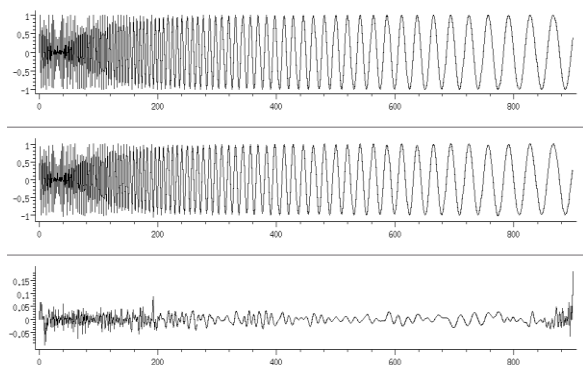
процессов): начального участка траектории в виде прямого переходного процесса и конечного – в виде обратного переходного процесса. Начальный участок траекторного сигнала представляет собой автономно-спорадический процесс, конечный – принудительно-модальный.

В зависимости от стороны объезда препятствия одномерный траекторный чирп-сигнал формируется либо с падающей мгновенной частотой (рис. 3), что соответствует отклонению ТТ влево от НОТ, либо с возрастающей (рис. 4) – при этом ТТ БТС отклоняется вправо от НОТ.

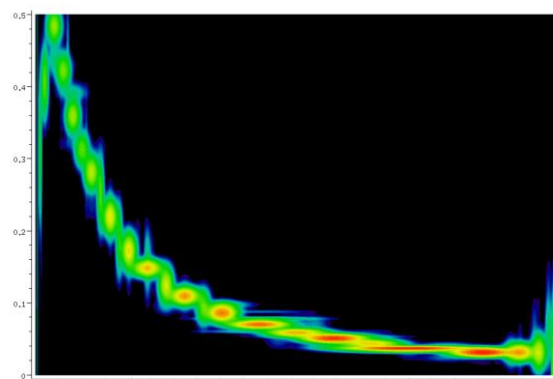
На рис. 3, а показан прямой переходный процесс для девиационной траектории БТС при ее отклонении влево от НОТ в центрированном виде; здесь же представлен реконструированный по алгоритму вейвлет-поиска соответствия (ВПС-алгоритму) траекторный сигнал этого режима, а также ошибка аппроксимации. При этом сигнал прямого переходного процесса имеет вид чирп-сигнала с падающей время-зависимой мгновенной частотой. На рис. 3, б приведена карта Вигнера (время-частотное распределение Вигнера) [9, 16, 20] этого процесса.

На рис. 4, а представлен прямой переходный процесс для девиационной ТТ БТС при ее отклонении вправо от НОТ в центрированном виде; здесь же – реконструированный траекторный сигнал этого режима и ошибка аппроксимации. При этом сигнал прямого переходного процесса имеет вид чирп-сигнала с возрастающей время-зависимой мгновенной частотой. На рис. 4, б приведена карта Вигнера переходного процесса в виде время-частотного распределения.

На вейвлет-карте (W-карте, см. рис. 4, б) динамики ТТ БТС показан зафиксированный экспериментально восходящий прямой переходный процесс (ВППП), то есть автономно-спорадический (АСПП), при реализации начального участка девиационной ТТ БТС при ее отклонении вправо от НОТ в формате вейвлет-распределения Вигнера. В частности, при этом мгновенная частота чирп-сигнала переходного процесса меняется в диапазоне 3,24–6,13 Гц.



a



b

Рис. 3. Одномерный траекторный сигнал для девиационной траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении влево от номинальной осевой траектории:

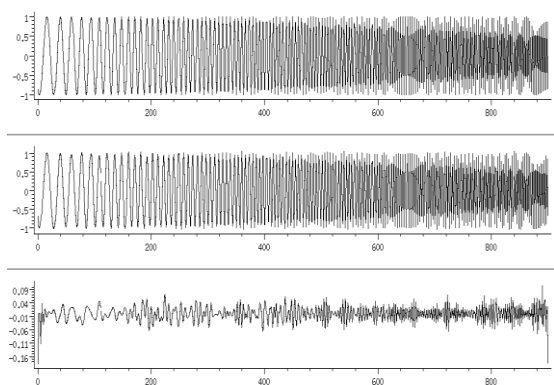
a – исходный сигнал, его аппроксимация и ошибка аппроксимации;

b – карта Вигнера сигнала в переходном режиме

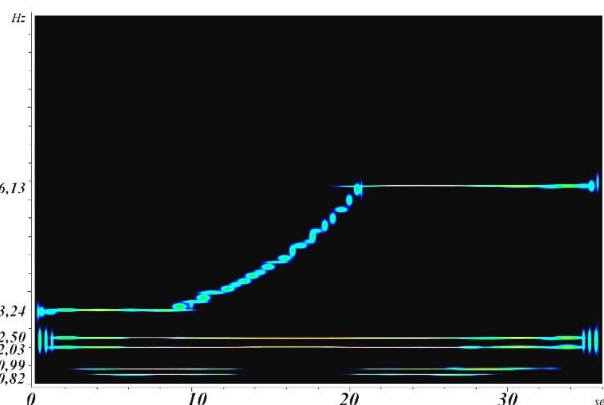
Fig. 3. One-dimensional trajectory signal for the unmanned vehicle deviation trajectory when the latter deviates to the left of the nominal axial trajectory:

a – initial signal, its approximation, and approximation error;

b – Wigner map of the signal in the transient mode



a



b

Рис. 4. Одномерный траекторный сигнал для девиационной траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении вправо от номинальной осевой траектории:

a – исходный сигнал, его аппроксимация и ошибка аппроксимации;

b – карта Вигнера сигнала в переходном режиме

Fig. 4. One-dimensional trajectory signal for the unmanned vehicle deviation trajectory when the latter deviates to the right of the nominal axial trajectory:

a – initial signal, its approximation, and approximation error;

b – Wigner map of the signal in the transient mode

Кроме время-частотного распределения ВППП, который вызван воздействием на ПСАУ БТС спорадического возмущения, обусловленного наличием какого-либо препятствия на пути БТС, на W-карте в совмещенном виде также отображены время-частотные распределения ТТ БТС, движущихся по прямым траекториям, которые соответствуют траекторным сигналам (ТТ-сигналам), то есть сигналам, соответствующим динамике ТТ, с частотами 2,5 и 2,03 Гц. Кроме того, здесь же

представлены время-частотные распределения сигналов, определяющих движение БТС по прямым траекториям в старт-стопных режимах на частотах 0,99 и 0,82 Гц при преодолении препятствий в виде выбоин, кочек и тому подобных ухабов без изменения траектории перемещения.

Отметим, что восходящий обратный переходный процесс (ВОПП), то есть принудительно-модальный (ПМПП), принят в автоматизированной системе модального управления

таким же по форме, что и ВППП на начальном участке ТТ БТС, с целью формирования процессов, восстанавливающих номинальную ТТ БТС, в естественном виде – с точки зрения функционирования электроприводов ходовой части.

2. Выбор автоматизированной системой (ее комплексами ПСВУ или ПСАУ) направления объезда (влево / вправо от препятствия) осуществляется при параметрах, приведенных на рис. 5: здесь W – фронтальный размер препятствия; F_{min} – минимальное расстояние на виде в плане между передним бампером БТС и ближайшей к нему допустимой точкой препятствия; A_r – точка активации процесса модального управления; V – расстояние от линии НОТ до правой крайней точки препятствия на его фронтальной проекции; АСПП – автономно-спорадический переходный процесс (соответствует начальному участку девиационной траектории); ПМПП – принудительно-модальный (соответствует конечному участку девиационной траектории). Активация принудительно-модального процесса возникает в точке максимального отклонения $x(t)_{max}$ девиационной траектории под влиянием автономно-спорадического возмущения.

При фиксации лидарно-радарно-сонарным узлом ПСАУ БТС критериального значения расстояния до препятствия F_{min} система проверяет выполнение соотношений: $V < W/2$ – в этом случае объезд выполняется справа, или $V > W/2$ – объезд слева.

При объезде препятствия беспилотником ПСАУ формирует девиационную траекторию в соответствии с аperiodическим процессом

второго порядка [11, 12, 16], обеспечивая тем самым плавность и аккуратность объезда. Подобная форма объезда дает возможность избежать столкновения БТС с бортом уступа, находящимся справа, а для возвратного движения БТС в забой или для встречного беспилотного автосамосвала – падения с уступа.

Как указано выше, на рис. 5 схематично показана траектория, которую формирует сигнал ПМПП. Окончание такого обратного процесса фиксируется в момент регистрации значения ошибки рассогласования сигнала ТТ с сигналом-линией НОТ в коридоре 5 % от значения траекторного сигнала $x(t)_{max}$ в момент активации процесса модального управления.

При начале процесса девиации ТТ БТС, вызванного автономно-спорадическими возмущениями, необходимо обеспечить снижение скорости БТС по обратной двухэкспоненциальной зависимости (вначале – медленное снижение, затем падение достигает своего максимального значения, после чего темп снижения скорости – ее производная – падает; скорость при этом стабилизируется на новом, пониженном уровне).

Заметим, что резко изменять скорость БТС в момент начала девиации (например, начать формировать ее по типу переходной характеристики, соответствующей аperiodическому закону первого порядка) нельзя, ибо это будет означать резкое торможение БТС в момент начала объезда препятствия, что может повлечь за собой возникновение возмущений в виде опасного крена / опрокидывания БТС, а также негативного воздействия на перевозимый груз и пассажиров.

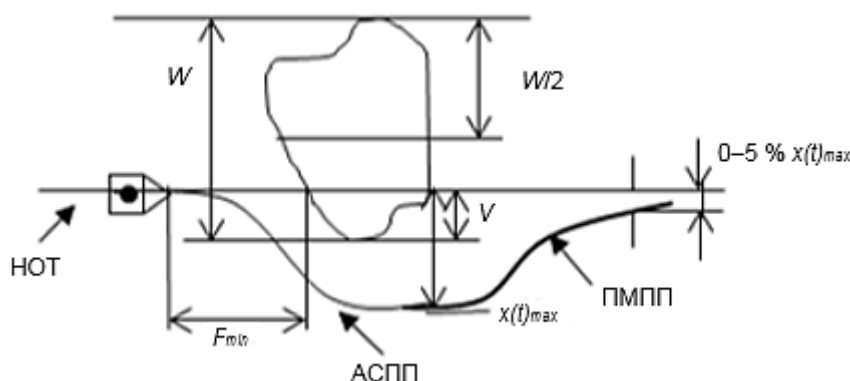


Рис. 5. Схема взаимного расположения беспилотного транспортного средства и препятствия на его пути с наложенным изображением правой девиационной траектории
Fig. 5. Diagram of relative position of the unmanned vehicle and an obstacle in its way with the overlay image of the right deviation trajectory



В момент активации процесса модального управления скорость БТС может быстро возрасти – при левой девиации – по апериодическому процессу первого порядка [11, 16], чтобы избежать столкновения со встречным БТС. Но скорость БТС можно увеличивать и более плавно – когда лидарно-радарно-сонарный узел бортовой подсистемы ПСАУ не обнаруживает встречного БТС или другого транспорта на значительном расстоянии (критерии этих понятий в зависимости от текущей мгновенной скорости БТС вводятся в ПСАУ и ПСВУ априори) от рассматриваемого БТС.

При правой девиации ТТ БТС от НОТ в момент активации АСПП скорость БТС может снижаться относительно быстро (в соответствии с апериодическим процессом первого порядка), если размер $V \ll W/2$ (см. рис. 5). Это означает, что девиация на начальном участке ТТ БТС будет незначительной относительно НОТ. ПМПП, связанный с увеличением скорости БТС, можно при этом проводить по любому из двух сценариев: быстрому или медленному.

В случае же $V \approx W/2$ БТС также должно снижать свою скорость, но вследствие вынужденного крутого правого поворота на начальном участке (в переходном процессе АСПП) – более плавно, в соответствии с апериодическим процессом второго порядка. ПМПП должен протекать по апериодическому процессу первого порядка, при этом более скоростной возврат ТТ БТС к линии НОТ позволяет избежать столкновения с правым бортом уступа или падения с уступа при противоположном расположении борта. При противоположных соотношениях V и $W/2$ системой формируется сигнал на объезд препятствия слева.

Алгоритм управления текущими траекториями беспилотного транспортного средства. Управление процессами динамического формирования ТТ БТС в автоматизированной системе производится в вейвлет-среде [4]² на основе алгоритма динамического модального управления (рис. 6). Следует отметить, что в этом алгоритме помимо принудительно-модальных процедур заложены также и процедуры реализации автономно-

спорадических переходных процессов с их обработкой в вейвлет-среде. При этом результаты обработки далее используются для формирования предстоящего ПМПП. Целью данного алгоритма является динамическое формирование прямого и обратного переходных процессов сигналов девиации ТТ БТС.

На рис. 6 приведена блок-схема алгоритма модального управления процессом формирования ТТ БТС. Здесь обозначения таковы: W-карта – формат отображений 1D-сигналов в виде распределений класса Коэна; ЭПХЧ – электропривод ходовой части; НОТ – номинальная осевая траектория; ТТ – текущая(-щие) траектория(-рии); ТТ-сигнал – траекторный сигнал, то есть сигнал, соответствующий динамике ТТ; Q_c^{-1} – обратная матрица управляемости; f_d – частота траекторного сигнала при девиации ТТ; U_{π} – текущее напряжение, подаваемое на электропривод ходовой части; БТС – беспилотное(-ные) транспортное(-ные) средство(-ва).

В блоках 1 и 2 соответственно производятся регистрация номинального режима и его многомерное отображение в виде карты Вигнера (W-карты). В блоке 3 осуществляется задание фрейма для номинального режима движения БТС. Процедура в блоке 4 отвечает за разграничение двух типов прямых переходных процессов: возникновение эффекта автономно-спорадической девиации ТТ БТС либо влево от НОТ (выход «да»), либо вправо (выход «нет»). В блоках 5, 17 производится регистрация одномерного траекторного chirp-сигнала БТС, соответствующего переходному процессу девиации ТТ относительно НОТ соответственно с падающей и возрастающей частотой. При этом в первом случае ТТ отклоняется влево относительно НОТ, во втором – вправо. В блоках 6 и 18 системой выполняются операции расчета W-карт возмущенных режимов и фиксация их отображений относительно номинальных фреймов. В процедурах блоков 7–10 для левой девиации ТТ и блока 19 для правой реализуются операции по определению параметров ВОПП, то есть постоянных T_1 и T_2 (см. рис. 6), и нисходящего обратного переходного процесса (НОПП) (постоянной T).

² SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles: ground vehicle standard. SAE International, 2016. Issued: January 2014; revised: September 2016. 30 p.

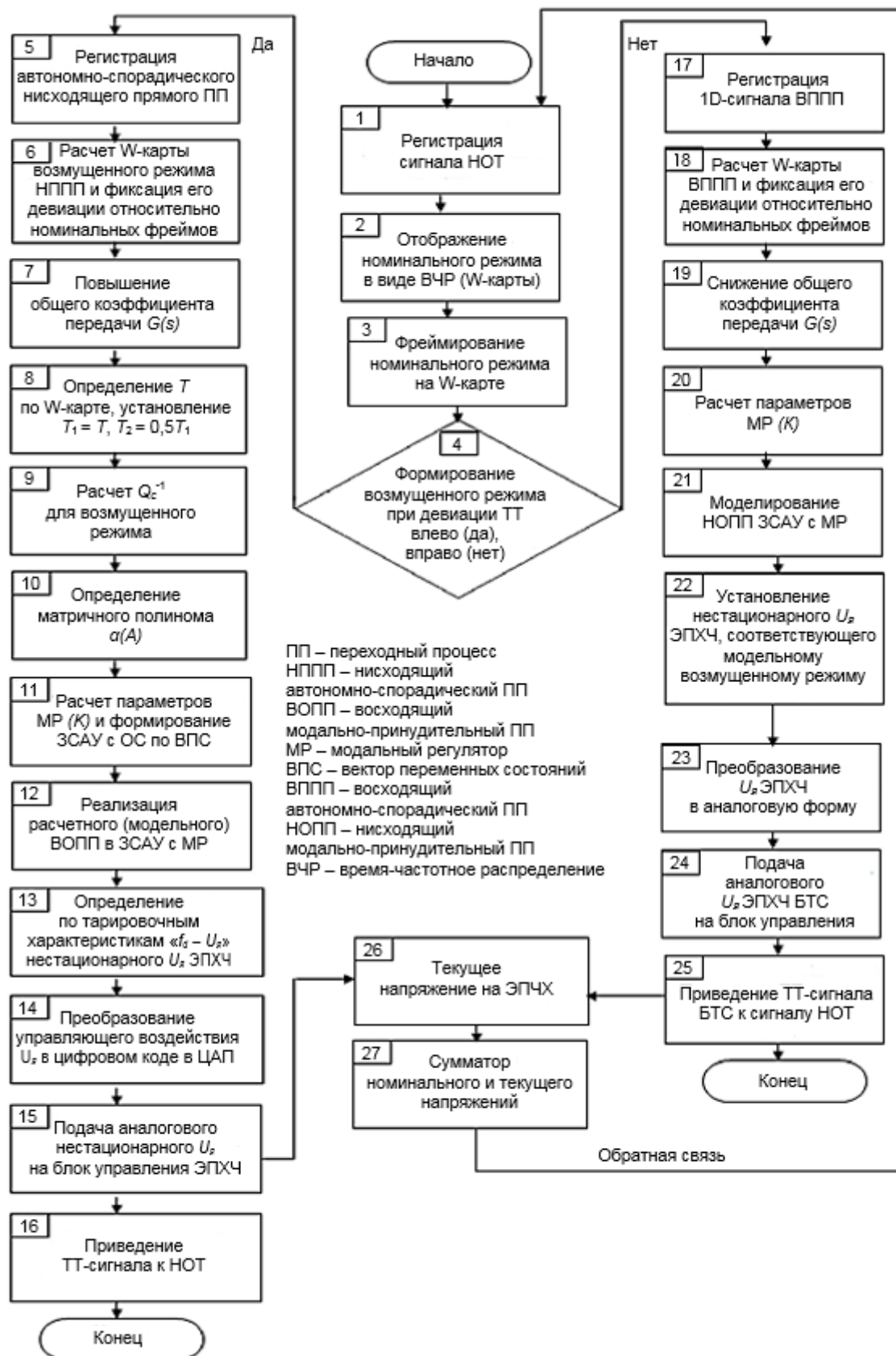


Рис. 6. Блок-схема алгоритма управления динамикой девиации текущей траектории беспилотного транспортного средства при ее отклонении влево / вправо от номинальной осевой траектории
Fig. 6. Block diagram of the control algorithm of the deviation dynamics of the unmanned vehicle current trajectory when it deviates to the left / right from the nominal axial trajectory



Блоки 11 и 20 отвечают за выполнение расчетов параметров модального регулятора (элементов матрицы K в цепи обратной связи по состоянию). В блоках 12 и 21 реализуются процессы моделирования обратных переходных процессов в замкнутой системе автономного управления с модальным регулятором. В блоках 13 и 22 выполняется определение текущего нестационарного напряжения на электроприводе ходовой части БТС. В блоках 14, 23 и 15, 24 производятся операции по преобразованию в цифро-аналоговом преобразователе цифрового сигнала напряжения в аналоговую форму и подаче напряжения электропривода ходовой части на блок управления. Функции блоков 16, 25, 26 и 27 заключаются в восстановлении НОТ для БТС.

Оценка параметров модального регулятора. Разработан алгоритм пересчета матрицы модального регулятора в виде цепочки последовательно реализуемых матричных процедур (см., например, блоки 8–12 на рис. 6 для случая девиации ТТ БТС влево относительно НОТ). При этом отметим следующее: для левой девиационной траектории восстанавливающий ВОПП происходит под действием двух увеличенных постоянных времени по двухэкспоненциальной зависимости, которые назначаются автоматизированной системой и остаются постоянными, при этом оба вещественных отрицательных полюса переходного процесса поджимаются к мнимой оси $j\omega$ S_p (это соответствует более плавному переходу из области максимальной девиации в область восстановления сигнала НОТ, а пара мнимых полюсов динамической модели ТТ БТС должна расходиться по мнимой оси и непрерывно меняться в ходе ПМПП. При этом нужно помнить, что на восстанавливающий аperiodический скалярный сигнал накладывается синусоидально подобная chirp-составляющая, отвечающая за ориентацию девиации ТТ БТС относительно НОТ.

Для правой девиационной ТТ БТС при НОПП, имеющем вид импульсной переходной характеристики аperiodического звена первого порядка, процесс идет под действием уменьшенной постоянной времени T , поскольку выйти из области максимальных девиационных значений траекторного сигнала в

сторону его номинальных значений следует значительно быстрее вследствие необходимости обеспечить безопасность перемещения БТС по маршруту. Поэтому вещественный отрицательный полюс по модулю должен вырасти и оставаться постоянным в течение всего процесса восстановления номинального режима, а пара мнимых полюсов – сближаться и оставаться варьируемыми во время переходного процесса.

Таким образом, реализация переменной составляющей ВОПП при левой восстанавливающей девиации ТТ определяется пятью полюсами (двумя мнимыми, соответствующими центрированному синусоидальному траекторному сигналу, одним нулевым и двумя вещественными отрицательными, характеризующими переходную характеристику аperiodического звена второго порядка), а НОПП при правой девиации, восстанавливающей НОТ-сигнал – тремя (двумя мнимыми, также характеризующими центрированный синусоидальный ТТ-сигнал, и одним нулевым, соответствующим импульсной переходной характеристике аperiodического звена первого порядка).

Следует отметить, что все переходные процессы в траекторных сигналах являются структурно и параметрически нестационарными, то есть протекают в среде с изменяемой структурой полюсов и с время-зависимыми мгновенными частотами в виде chirp-сигналов. Структурная нестационарность определяется введением в объект управления (то есть в сигналы, соответствующие ТТ БТС) дополнительных полюсов, а параметрическая характеризуется непрерывной варьируемостью значений мнимых сопряженных полюсов во время переходных процессов в ТТ-сигналах.

Ниже в качестве примера рассмотрена процедура реализации алгоритма модального управления процессом формирования девиационных ТТ БТС, в том числе технология принудительной локализации и релокализации полюсов разомкнутой системы автономного управления в условиях нестационарных процессов в системе «электропривод – ходовая часть БТС», в возмущенном режиме при правой восстанавливающей номинальный ТТ-



сигнал девиации (при переходном процессе типа НОПП). В данном примере используется нецентрированный траекторный сигнал, при этом рассматриваемая система имеет четвертый порядок.

Расчет параметров модального регулятора, то есть определение матрицы обратной связи K по полному вектору переменных состояния, сводится к ее расчету по формуле Аккермана [21], представляющей собой произведение трех матриц: первой – вспомогательной, второй – блочной и третьей – полиномиальной:

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot Q_c^{-1} \cdot \alpha(A),$$

где Q_c^{-1} – обратная матрица управляемости: $\alpha(A)$ – матричный полином, сформированный в соответствии с теоремой Кэйти – Хэмилтона [12] путем замены в характеристическом полиноме переменной Лапласа s на матрицу

$$\alpha(A) = \begin{bmatrix} 0 & -T^{-1}\omega^2 + 1 & -\omega^2 + 1 \\ 0 & -\omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & -\omega^2 + 1 \\ 0 & \omega^4 T^{-1} - \omega^2(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) \\ 0 & \omega^2(\omega^2 - 1)(T^{-2} + T^{-1}) & \omega^2(\omega^2 - 1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -T^{-1} + 1 \\ (-\omega^2 + 1) + (T^{-2} - T^{-1}) \\ \omega^2(T^{-1} - 1) - T^{-3} + (T^{-2} - T^{-1}) + 1 \\ \omega^2(\omega^2 - 1) - \omega^2(T^{-1} - 1) + T^{-4} - T^{-3} + (T^{-2} - T^{-1}) \end{bmatrix}.$$

По виду $\alpha(A)$ можно заметить, что в объекте управления влияние на переходный процесс имеют два мнимых сопряженных полюса (они в динамике варьируют частоту ω траекторного chirp-сигнала) и вещественный отрицательный, соответствующий параметру T ,

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] Q_c^{-1} \alpha(A) = \begin{bmatrix} 0 & (T^{-1}\omega^2 - 1) & (\omega^2 - 1) & (T^{-1} - 1) \end{bmatrix} = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4].$$

Данная матрица непрерывно пересчитывается с задаваемым временным шагом в ходе переходного процесса, чтобы обеспечить его chirp-характер.

Заключение

Рассчитываемые параметры модального регулятора позволяют задавать требуемые варьируемые полюсы замкнутой системы управления с полной обратной связью по состоянию, которые определяет автоматизиро-

ванность состояния A ; $Q_c = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$ – матрица управляемости, где A и B – матрицы состояния и управления.

Оценка управляемости разомкнутой системы автономного управления (объекта в возмущенном режиме) по критерию Калмана – Луенберга [11, 12]: так как $\text{rank } Q_c = n$ (порядок объекта), или $\det Q_c \neq 0$, то система полностью управляема, поэтому полюсы объекта могут быть размещены в любых точках s -плоскости принудительно при замыкании объекта многомерной обратной связью по состоянию в виде матрицы K .

Тогда обратная матрица управляемости Q_c^{-1} определяется как

$$Q_c^{-1} = \text{Adj}(A Q_c^T) / \det Q_c.$$

Следовательно, матричный полином имеет вид $\alpha(A) = A^4 - d_1 A^3 + d_2 A^2 - d_3 A + d_4 I$, где I – единичная матрица.

которые формируют частотную составляющую, а также определяют быстродействие процедуры компенсации отклонения траектории БТС от НОТ.

В результате получаем матрицу K модального регулятора вида

ванная система модального управления по заданному алгоритму (см. рис. 6).

Таким образом, разработанная автоматизированная система модального управления процессом девиации ТТ выполняет функции управления динамикой оперативного и безопасного траекторного перемещения БТС по карьерным маршрутам в условиях открытых горных работ, что, в свою очередь, способствует проведению производственного процесса на эффективном и безопасном уровне.

Список источников

1. Cheng H. Autonomous intelligent vehicles: theory, algorithms, and implementation. Springer-Verlag London, 2011. 154 p.

2. Autonomous control systems and vehicles: intelligent unmanned systems / eds. K. Nonami, M. Kartidjo, K.-J. Yoon, A. Budiyo. Springer Japan, 2013. 315 p.



3. Naranjo J. E., Clavijo M., Jiménez F., Gómez O., Rivera J. L., Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment // 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2016. P. 98–103. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535371>.
4. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // Journal of Advanced Transportation. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2492765>.
5. Дубинкин Д. М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6. С. 8–15. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-8-15>.
6. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–120. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>.
7. Костюк С. Г., Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Дубинкин Д. М. Мониторинг динамического состояния автономных тяжелых платформ на карьерных маршрутах горнорудных предприятий // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 4. С. 600–608. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608>.
8. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. Vol. 41. Iss. 12. P. 3397–3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>.
9. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. San Diego: Academic Press, 2001. 637 p.
10. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1985. 296 с.
11. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
12. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. Control system design. New York: Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 2001. 944 p.
13. Goswami J. C., Chan A. K. Fundamentals of wavelets: theory, algorithms and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 382 p.
14. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
15. Debnath L. Wavelet transforms and their applications. Boston: Birkhauser, 2002. 565 p.
16. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 103–112. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-103-112>.
17. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class // Time-frequency analysis: concepts and methods / eds. F. Hlawatsch, F. Auger. London: ISTE, 2008. P. 131–163.
18. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs // Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference / ed. B. Boashash. New York: Academic Press, 2016. P. 387–452.
19. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. Iss. 4. P. 252–256. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040065>.
20. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // PINSA. 2002. Vol. 68A. Iss. 1. P. 35–56.
21. Ackermann J. Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum // Regelungstechnik und Prozessdatenverarbeitung. 1972. H. 7. S. 297–300.

References

1. Cheng H. *Autonomous intelligent vehicles: theory, algorithms, and implementation*. Springer-Verlag London; 2011. 154 p.
2. Nonami K., Kartidjo M., Yoon K.-J., Budiyo A. *Autonomous control systems and vehicles: intelligent unmanned systems*. Springer Japan; 2013. 315 p.
3. Naranjo J. E., Clavijo M., Jiménez F., Gómez O., Rivera J. L., Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2016:98-103. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535371>.
4. Shadrin S. S., Varlamov O. O., Ivanov A. M. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence. *Journal of Advanced Transportation*. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2492765>.
5. Dubinkin D. M. Current state of technics and technologies in the field of autonomous control movement vehicles of coal mine caree. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2019;6:8-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-8-15>.
6. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020;8:109-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-109-120>.
7. Kostyuk S. G., Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Dubinkin D. M. Monitoring of the dynamic state of autonomous heavy platforms on the quarry routes of mining enterprises. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(4):600-608. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608>.
8. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993;41(12):3397-3415. <https://doi.org/10.1109/78.258082>.



9. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. San Diego: Academic Press; 2001. 637 p.
10. Strejc V. The state space synthesis in the discrete linear control systems. 1985. 296 p. (Russ. ed.: *Metod prostranstva sostoyanii v teorii diskretnykh lineinykh sistem upravleniya*. Moscow: Nauka; 1985. 296 p.).
11. Dorf R. C., Bishop R. H. *Modern control systems*. 2002. 832 p. (Russ. ed.: *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Moscow: Laboratoriya bazovykh znaniy; 2002. 832 p.).
12. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. *Control system design*. New York: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.; 2001. 944 p.
13. Goswami J. C., Chan A. K. *Fundamentals of wavelets: theory, algorithms and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2011. 382 p.
14. Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*. Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika; 2001. 464 p. (In Russ.).
15. Debnath L. *Wavelet transforms and their applications*. Boston: Birkhauser; 2002. 565 p.
16. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sa-dovets V. Iu., Dubinkin D. M. Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021;2:103-112. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-103-112>.
17. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class. In: Hlawatsch F., Auger F. (eds.). *Time-frequency analysis: concepts and methods*. London: ISTE; 2008. p.131–163.
18. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs. In: Boashash B. (ed.). *Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. New York: Academic Press; 2016. p.387–452.
19. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes. *Steel in Translation*. 2019;49 (4):252-256. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040065>.
20. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *PINSA*. 2002;68A(1):35-56.
21. Ackermann J. Design of linear control systems in the state space. *Tekhnika upravleniya i obrabotka dannykh protsesssa*. 1972;7:297-300. (In German).

Информация об авторах / Information about the authors



Чичерин Иван Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационных
и автоматизированных производственных систем,
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия,
chicivan@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1219-4415>.
Ivan V. Chicherin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Information
and Computer-aided Manufacturing Systems,
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, Russia,
chicivan@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1219-4415>.



Федосенков Борис Андреевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных
и автоматизированных производственных систем,
Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия,
rafwaveletsve@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3369-0514>.
Boris A. Fedosenkov,
Dr. Sc. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Information
and Computer-aided Manufacturing Systems,
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, Russia,
rafwaveletsve@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3369-0514>.

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 08.07.2021; принята к публикации 11.08.2021.

The article was submitted 02.06.2021; approved after reviewing 08.07.2021; accepted for publication 11.08.2021.