

Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы

Д.В. Афонин¹ ✉, О.Б. Кочергин¹, С.Ф. Яцун¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Актуальность. Развитие авиационной техники связано с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих перемещение воздушных судов (ВС) по аэродрому. Для осуществления наземных маневров с ВС применяют буксировочные аэродромные системы (БАС), что позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива. Также БАС применяется тогда, когда ВС теряет способность двигаться и находится на рабочей площади аэродрома или вблизи нее, что создает серьезную проблему, приводящую к закрытию аэропорта для полетов, при этом авиакомпании несут значительные потери.

Цель исследования. Повышение эффективности буксировочной аэродромной системы за счет разработки информационной системы.

Задачи. Разработка структуры роботизированной буксировочной аэродромной системы, составление структурной схемы САУ макета буксировочной платформы, оформление блок-схем логического регулятора САУ платформы.

Методы. Для решения проблемы транспортировки ВС используются методы перемещения, в которых качестве задающего воздействия, определяющего положение платформы в пространстве, был выбран уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной линии, который измеряется путём анализа изображений, поступающих с установленной на буксировщик системой технического зрения.

Результаты. В ходе научной работы была разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы. На основании данной структуры была спроектирована структурная схема САУ макета буксировочной платформы и разработана блок-схема логического регулятора САУ платформы.

Заключение. 1. Разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы, включающей мобильный буксировщик, сцепное устройство, воздушное судно, бортовую систему управления. 2. Разработан алгоритм управления позиционированием роботизированной буксировочной аэродромной системой, основанный на логической обработке сигналов оптронной матрицы. 3. Разработаны алгоритмы управления движением РБАС по заданной контрастной линии при действии внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, позволяющие обеспечить высокоточное движение РМБ.

Ключевые слова: аэродромная система; буксировщик; система управления; информационная система; воздушное судно; СТЗ.

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

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

Для цитирования: Афонин Д.В., Кочергин О.Б., Яцун С. Ф. Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 162-178. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-162-178>.

Поступила в редакцию 12.09.2022

Подписана в печать 06.10.2022

Опубликована 14.10.2022

Information System of the Robotic Towing Airfield System

Dmitrii V. Afonin ¹ ✉, Oleg B. Kochergin ¹, Sergey F. Yatsun ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Relevance. The development of aviation technology is associated with the development of new means that directly ensure the movement of aircraft (AF) at the airfield. To carry out ground maneuvers with aircraft, towing airfield systems (UAS) are used, which can significantly reduce noise and air pollution near the airport, as well as reduce the inefficient resource consumption of aircraft engines and provide significant savings in aviation fuel. UAS is also used when the aircraft loses the ability to move and is located on or near the working area of the airfield, which creates a serious problem leading to the closure of the airport for flights, while airlines incur significant losses.

Purpose of research. Improving the efficiency of the towing airfield system through the development of an information system. Objectives. Development of the structure of a robotic towing airfield system, drawing up a structural diagram of the ACS layout of the towing platform, design of block diagrams of the logical controller of the ACS platform.

Methods. The level of horizontal deviation of the platform from the contrast line was chosen as the setting influence determining the position of the platform in space, which is measured by analyzing images coming from the technical vision system installed on the tow truck.

Results. In the course of the study, the structure of a robotic towing airfield system was developed. Based on this structure, a block diagram of the ACS layout of the towing platform was designed and a block diagram of the logical controller of the ACS platform was developed.

Conclusions. 1. The structure of a robotic towing airfield system has been developed, including a mobile tow truck, a coupling device, an aircraft, and an on-board control system. 2. An algorithm for controlling the positioning of a robotic towing airfield system based on the logical processing of signals of an optocoupler matrix has been developed. 3. Algorithms have been developed for controlling the movement of the RBAS along a given contrast line under the action of external disturbing influences of a deterministic and random type, allowing for high-precision movement of the RMB.

Keywords: airfield system, tow truck, control system, information system, aircraft

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

Funding: The paper was prepared with the support of the Strategic Project «Priority-2030. Creation of robotic tools to expand the functionality of a person».

For citation: Afonin D. V., Kochergin O. B., Yatsun S. F. Information System of the Robotic Towing Airfield System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 162-178 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-162-178>.

Received 12.09.2022

Accepted 06.10.2022

Published 14.10.2022

Введение

Развитие авиационной техники связано с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих перемещение воздушных судов (ВС) по аэродрому. Для осуществления наземных маневров с ВС применяют буксировочные аэродромные системы (БАС), что позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива¹ [1-4]. Также БАС применяется тогда, когда ВС теряет способность двигаться и находится на рабочей площади аэродрома или вблизи нее, что создает серьезную проблему, приводящую к закрытию аэропорта для полетов, при этом авиакомпании несут значительные потери. Известны десятки случаев, когда буксируемое ВС сталкивалось с другими ВС и объектами инфраструктуры аэропорта. Движение буксируемого ВС должно производиться в соответствии со схемой движения самолетов и транспорта на данном аэродроме по определенным маршрутам, которые проходят по рулежным дорожкам и иногда по взлетно-посадочной полосе (ВПП) [5-12].

Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем

буксировки ВС является переход к новым технологиям на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ). Роботизированная БАС (РБАС), позволяет значительно сократить численность буксировочной бригады и перейти к беспилотным комплексам, решающим задачи доставки воздушного судна из начального положения в конечное, в автономном режиме, что позволит повысить безопасность и обеспечить максимальную скорость движения ВС по заданному маршруту [14-19]. Особое внимание должно быть уделено оценке состояния РБАС и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в среде функционирования. Создание РБАС предполагает разработку информационной системы, обеспечивающей систему управления полным набором данных, необходимых для выработки единственно правильного управления, которое обеспечивает заданные качественные показатели.

Материалы и методы

Структурная схема роботизированной БАС приведена на рис. 1. С внешней средой РБАС взаимодействует через подсистему глобальной навигации (СГН), подсистему локальной навигации (СЛН), подсистему предотвращения столкновений (СПС). Система управления включает блок планирования, обеспечивающий построение карты аэродрома и построение карты

¹ Salmerón Rodríguez J. Use of robotic systems on airport management optimization: дис. Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.

ближней зоны, построение маршрута и построение траектории обхода препятствий. Блок управления (БУ) обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, и формирует управляющие напряжения по соответствующему алгоритму. Электроприводы РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС обеспечивает эффективное торможение РБАС.

Электроприводы РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС

обеспечивает эффективное торможение РБАС. Управляемое движение РМБ в сторону переднего колеса начинается при выполнении условия $|\Delta \bar{r}_0| \leq L$, где $\bar{r}_{OD_1} - \bar{r}_{OD_2} = \Delta \bar{r}_0$ – расстояние между сцепным устройством (СУ), положение которого определяет вектор $\bar{r}_{OD_1}$ и передним колесом, положение которого задано вектором $\bar{r}_{OD_2}$; L – заданный параметр. Процесс движения РМБ завершается при $\bar{r}_{OD_1} = \bar{r}_{OD_2}$. Далее манипулятор СУ осуществляет захват переднего колеса ВС.

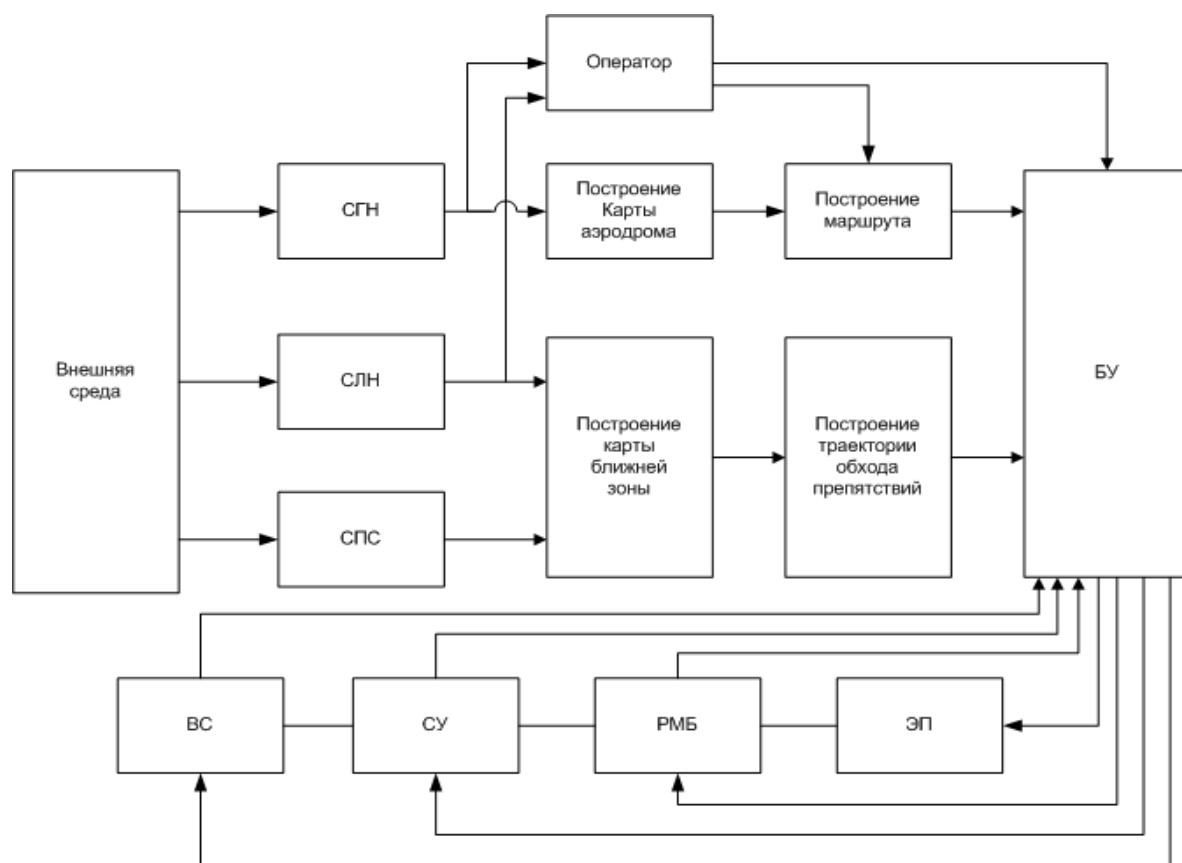


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

Fig. 1. Block diagram of a robotic towing platform

линии и координата центра масс контрастной точки, расположенной на передней стойке шасси транспортируемого самолёта. Данные параметры поступают на логический оператор, который, в соответствии с текущим режимом работы выбирает одно из этих значений в качестве управляющего и на их основе формирует управляющий вектор d , определяющий значение угловой скорости привода буксировщика.

Блок-схема логического регулятора изображена на рис. 4. Для привода левого колеса схема САУ аналогична.

На рис. 5 изображена структурная схема САУ схвата макета мобильной буксировочной платформы. В данной САУ управляющим воздействием является расстояние, получаемое с установленного на платформу дальномера. Когда оно достигает заданного значения L , буксировщик посылает управляющее напряжение U_3 на сервопривод схвата, осуществляя закрытие схвата и фиксацию передней стойки шасси самолёта. Блок-схема логического регулятора в частности и всего режима стыковки в целом, отвечающего за работу схвата, изображена на рис. 6.

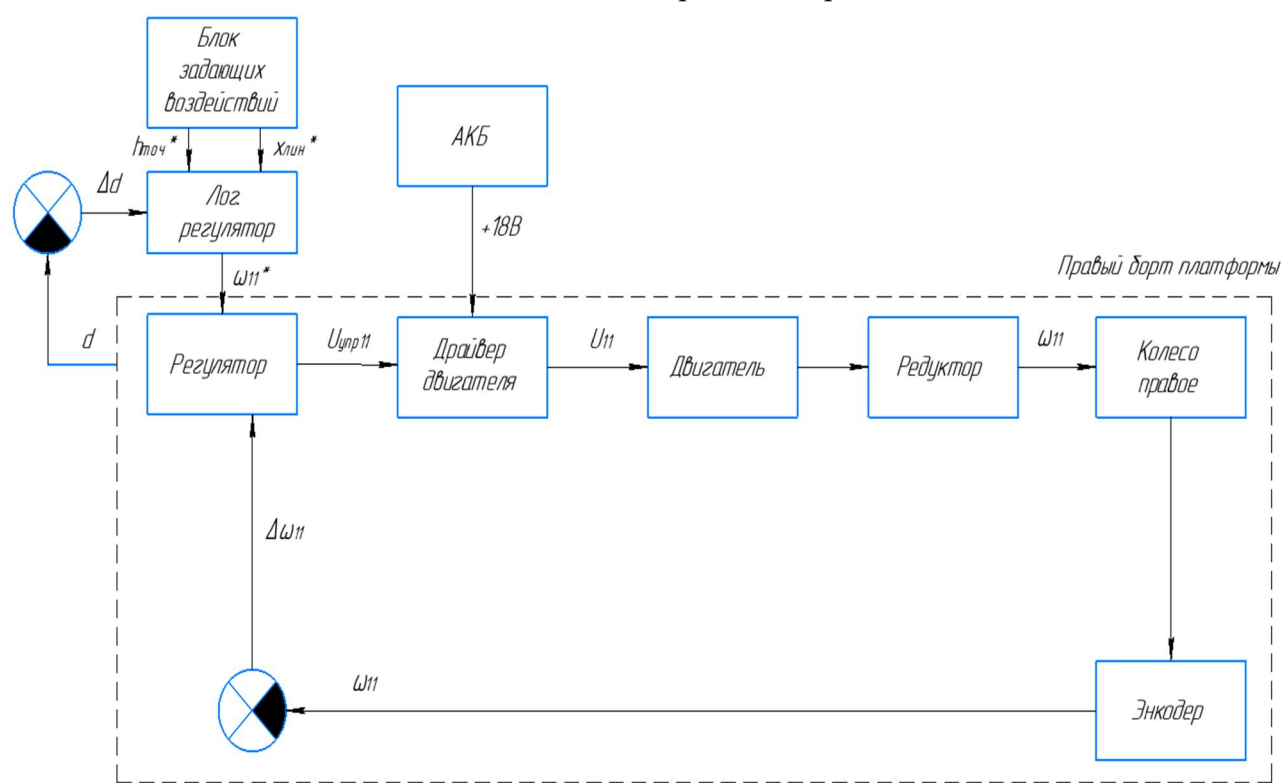


Рис. 3. Структурная схема САУ правого борта буксировщика

Fig. 3. Structural diagram of the control system of the starboard side of the towing vehicle

В том случае, если движению платформы не препятствуют посторонние объекты и буксировщик не добрался до конечной точки своего маршрута,

он осуществляет процесс движения по контрастной линии (рис. 7).

Анализируя поступающую с СТЗ информацию, система управления фор-

мирует управляющий вектор, основываясь на разности координат между центром масс контрастной линии и геометрическим центром исследуемого кадра. Схематично процесс формирования ошибки представлен на рис. 8. В первом случае центр масс контрастной линии $O(x;y)$ и геометрический центр кадра $O1(x1;y1)$ совпадают друг с другом, поэтому Δx равна нулю. Во втором

случае геометрический центр платформы находится правее центра масс контрастной линии на величину, равную Δx . Это говорит о том, что буксировщик также сместилась вправо относительно контрастной линии и необходимо посредством изменения скоростей приводов платформы осуществить её поворот.



Рис. 4. Блок-схема логического регулятора САУ

Fig. 4. Block diagram of the ACS logic controller

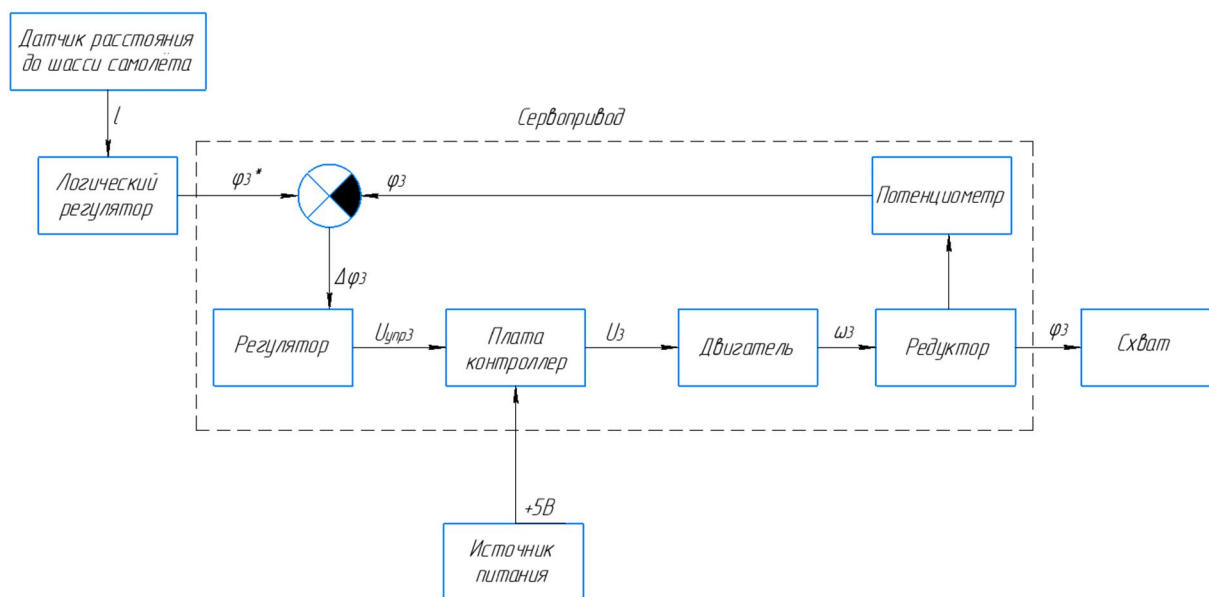


Рис. 5. Структурная схема схвата

Fig. 5. Structural diagram of the gripper

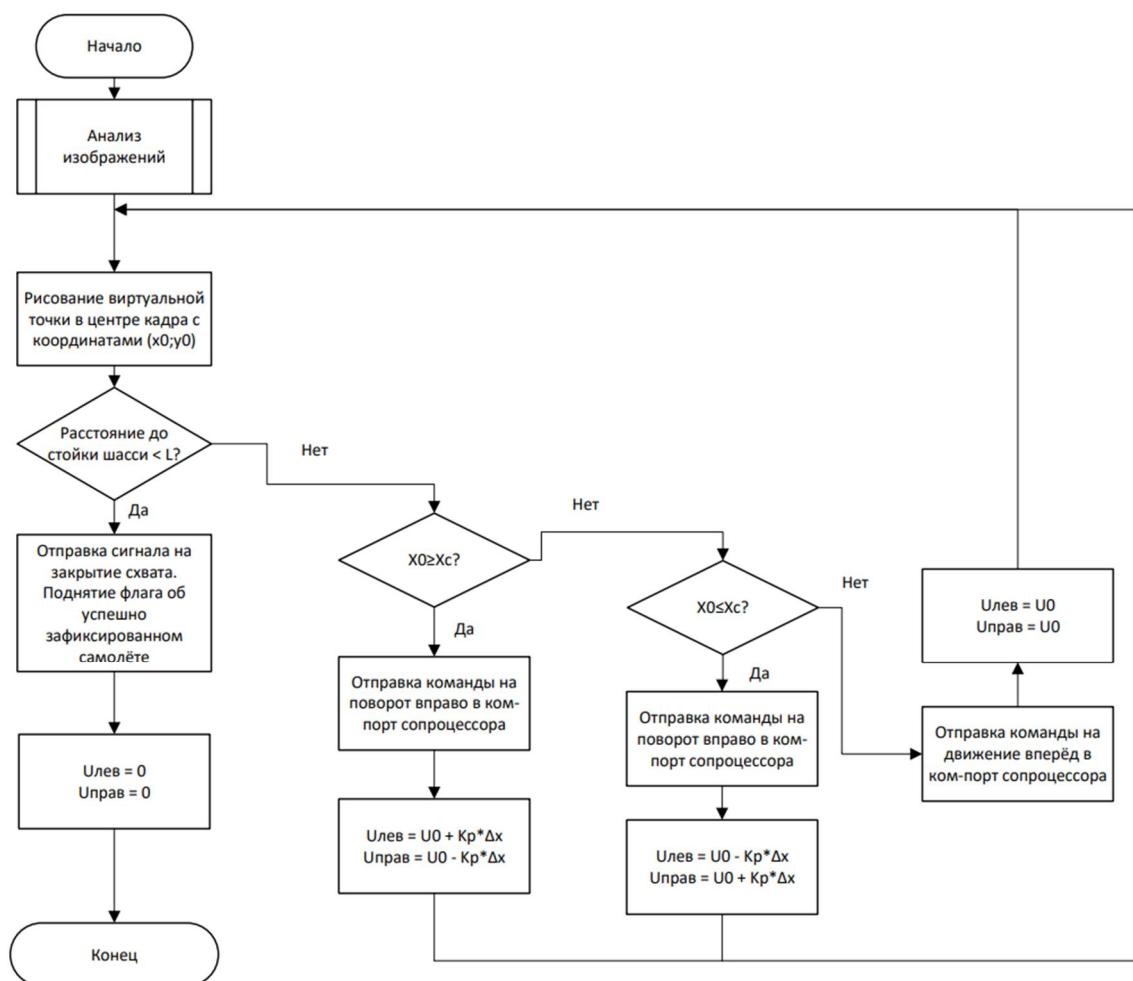


Рис. 6. Блок-схема алгоритма стыковки буксировщика и самолёта

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for docking a towing vehicle and an aircraft

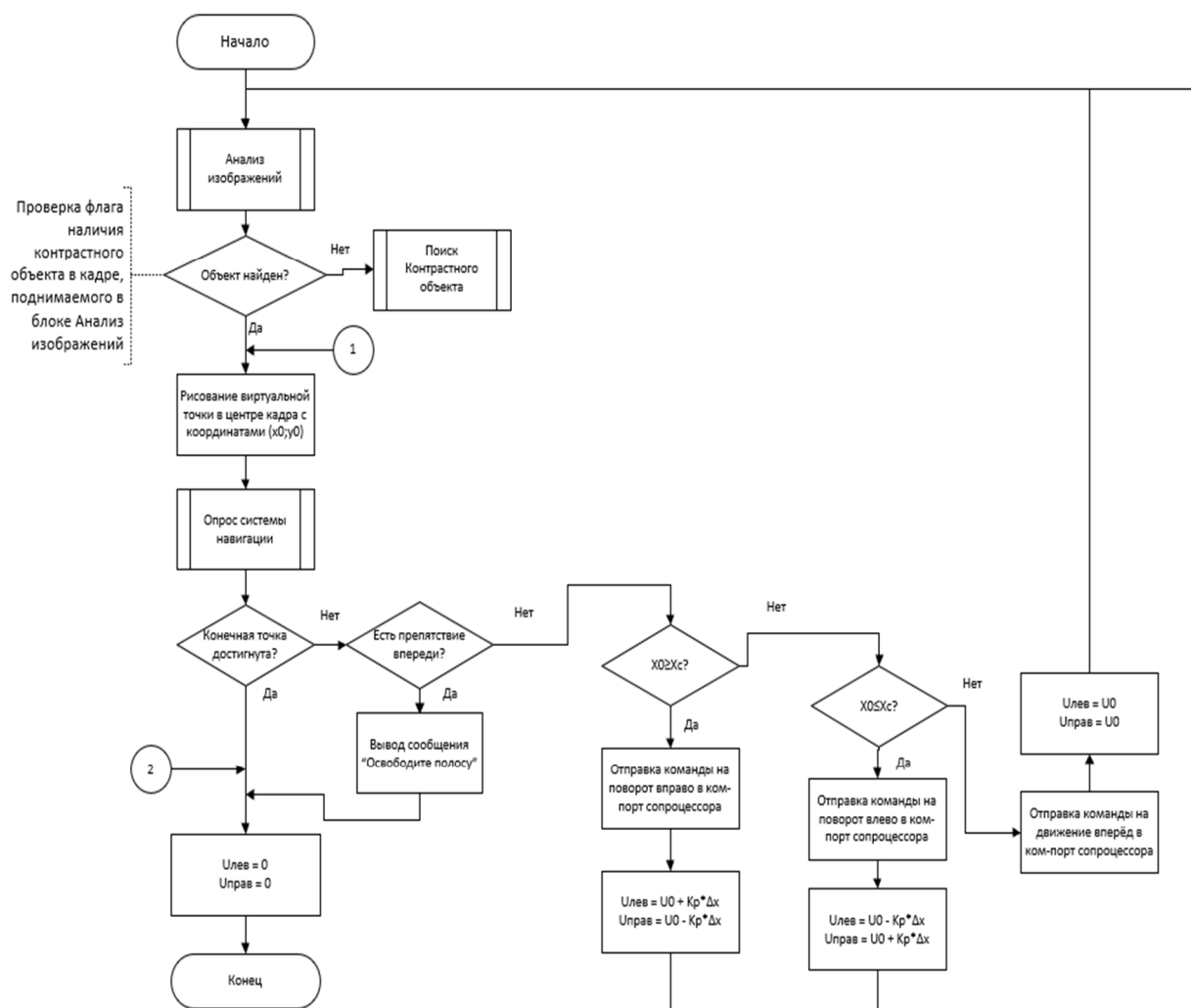


Рис. 7. Блок схема алгоритма движения платформы по линии

Fig. 7. Block diagram of the algorithm for moving the platform along the line

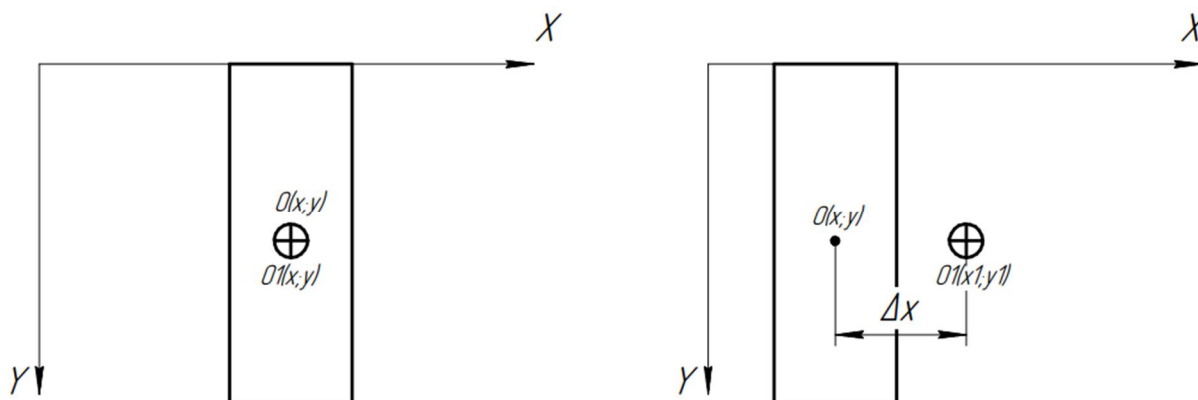


Рис. 8. Формирование ошибки системы управления

Fig. 8. Formation of an error in the control system

В случае утери платформой контрастной линии система управления платформой инициирует подпрограмму «Поиск контрастного объекта» (рис 9). После опроса датчиков платформы и измерения расстояния до препятствия производится проверка значения расстояния до объектов, окружающих буксировщик. В том случае, если значение расстояния превышает 20 см, буксировщик осуществляет поворот на месте, что достигается вращением колёс с одинаковой скоростью, но разным

направлением. Поворот осуществляется, основываясь на данных, получаемых с гироскопа. После того, как значение поворота платформы достигнет 20° , но буксировщик не найдёт контрастную линию, она поворачивает на -20° относительно своего первоначального положения. В случае, если контрастная линия была найдена в процессе исполнения подпрограммы «Поиск контрастного объекта» буксировщик возвращается к движению.

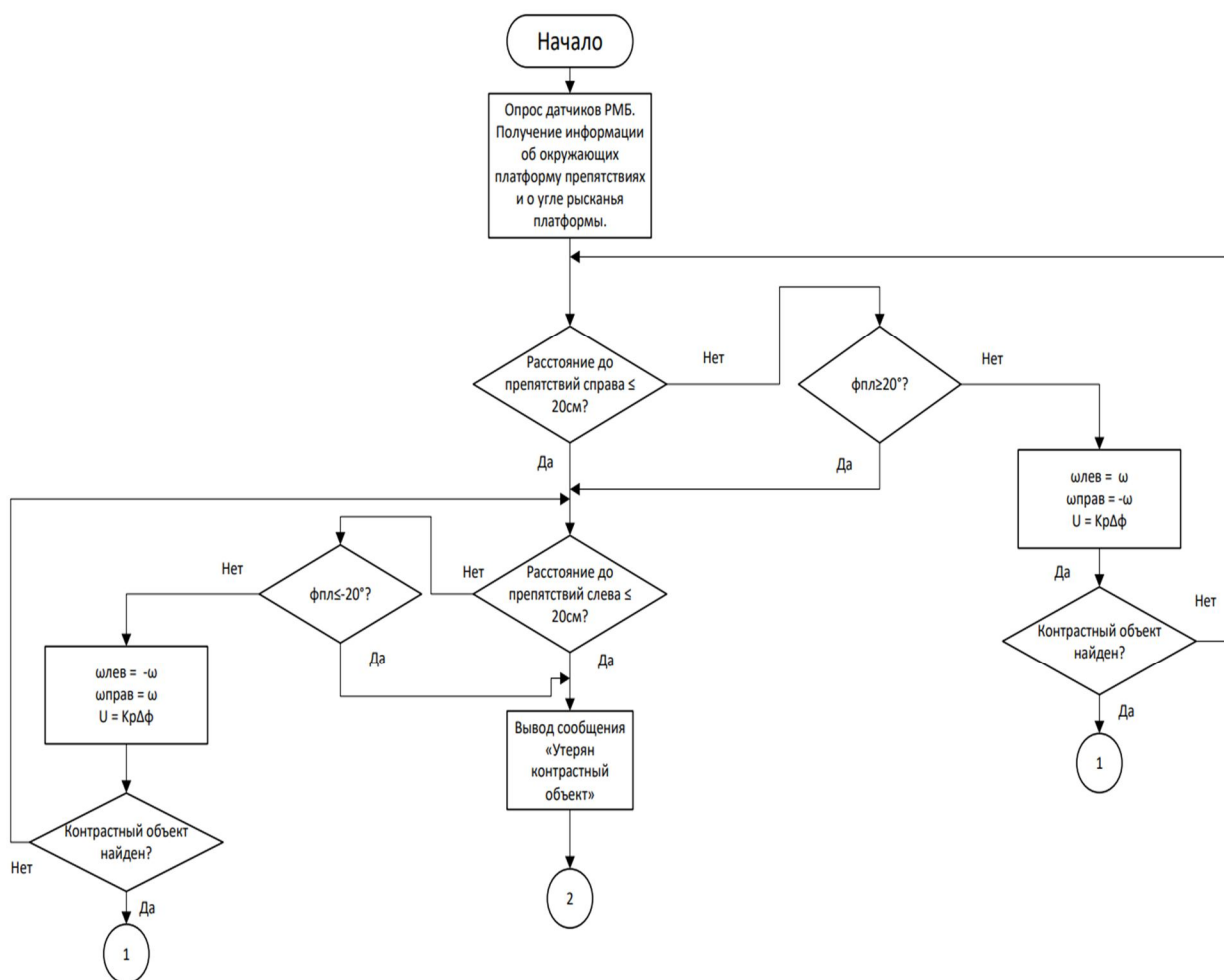


Рис. 9. Блок-схема подпрограммы «Поиск контрастного объекта»

Fig. 9. Flowchart of the subroutine "Search for a contrasting object"

Если же в процессе поиска контрастного объекта искомое не было найдено, буксировщик выводит сообщение об утере контрастного объекта и необходимости осуществить перемещение в ручном режиме.

В процессе движения буксировщик осуществляет опрос датчиков расстояния и на основании полученных с них данных принимает решение о прекращении движения. Работа блок-схемы подсистемы «Опрос системы навигации» изображена на рис. 10.

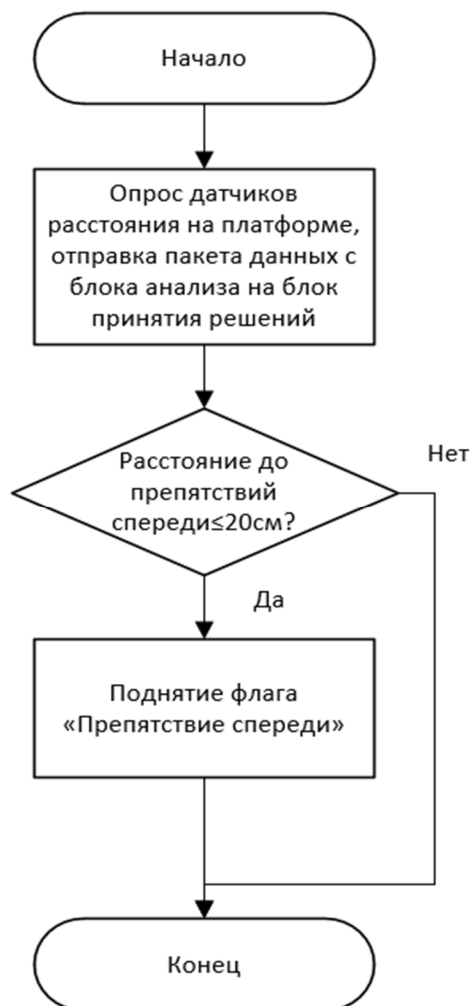


Рис. 10. Блок-схема системы «Опрос системы навигации»

Fig. 10. Block diagram of the "Navigation System Interrogation" system

В случае, если расстояние от платформы до препятствия становится меньше 20 см, буксировщик останавливается и отправляет сообщение о необходимости освободить дорогу.

После того, как буксировщик достигает стоянки самолёта или взлётной полосы, она переходит из режима следования по линии в режим стыковки. В данном режиме задающим воздействием является уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной точки, расположенной на передней стойке шасси самолёта, получаемый благодаря анализу получаемого с задней СТЗ изображения, а также значение расстояния до стойки шасси, получаемого с установленного на платформу дальномера (рис. 11). По достижению заданного значения расстояния, обозначенного на блок-схеме как L , буксировщик останавливается. До этого момента буксировщик движется вперёд по алгоритму, схожему с алгоритмом движения по контрастной линии.

Реализация режима стыковки в автоматическом порядке возможна лишь в том случае, если передняя стойка шасси самолёта расположена на линии, по которой буксировщик осуществляет своё движение.

При перемещении РБАС по кусочно-линейной траектории с применением исследуемого алгоритма, буксировщик высокоточно способен маневрировать на сложных участках пути. Результаты движения РБАС представлены на рис. 12.

Сравнивая полученные результаты с данными, представленными в работе [13], в которой рассматривалось движение буксировщика, использующего оптронную матрицу, можно сделать вывод

о том, что алгоритм, предложенный в работе, обеспечивает большую точность и меньшие энергозатраты, нежели чем аналогичный алгоритм (табл. 1).

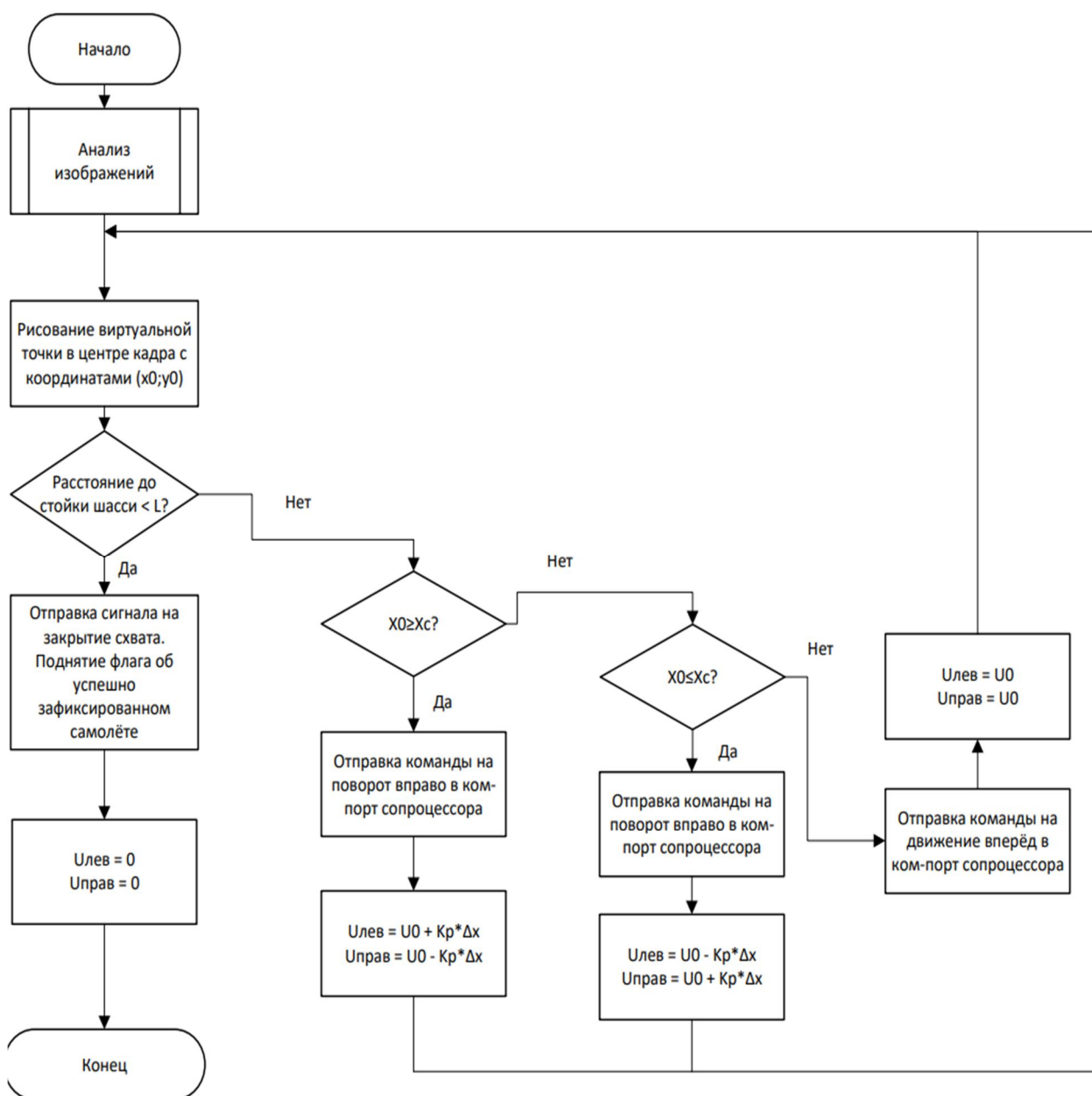


Рис. 11. Блок-схема алгоритма стыковки самолёта с передней стойкой шасси

Fig. 11. Block diagram of the aircraft docking algorithm with the front landing gear

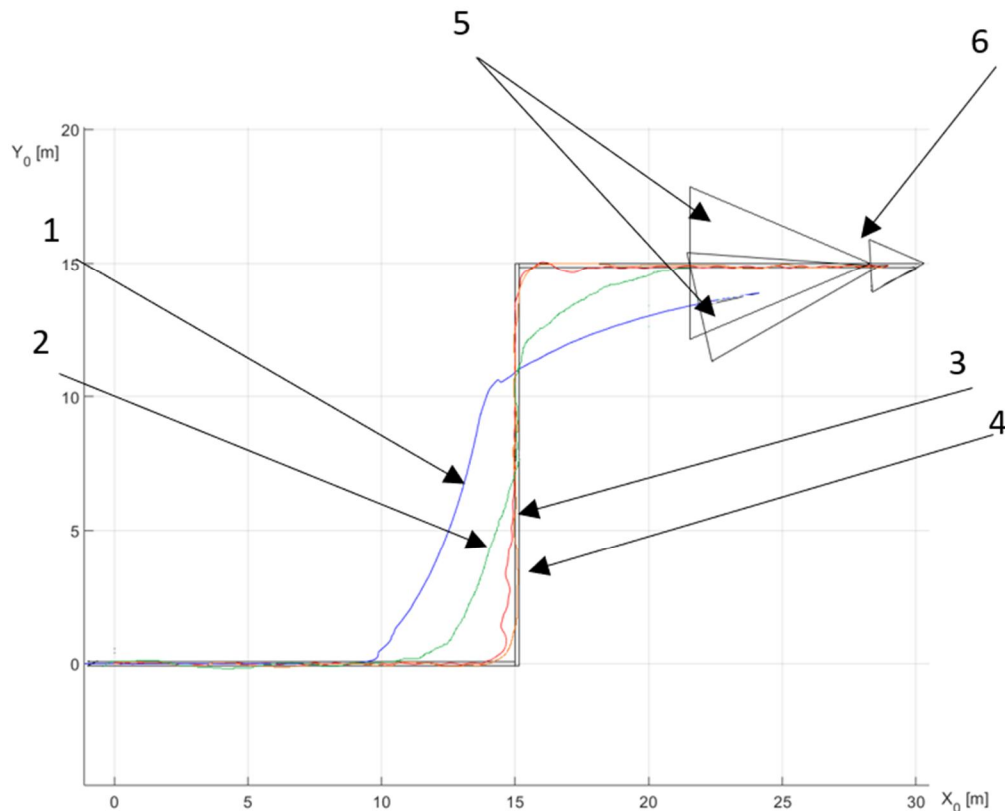


Рис. 12. Траектория движения по алгоритму с использованием СТЗ: **1** – траектория движения ВС при перемещении по алгоритму с использованием оптронной матрицы; **2** – траектория движения ВС при перемещении по алгоритму с использованием СТЗ; **3** – траектория движения буксировщика при перемещении по алгоритму с использованием оптронной матрицы; **4** – траектория движения буксировщика при перемещении по алгоритму с использованием СТЗ; **5** – ВС; **6** – буксировщик

Fig. 12. Movement trajectory according to the algorithm using VS: **1** – Aircraft movement trajectory when moving according to the algorithm using the optocoupler matrix; **2** – Aircraft movement trajectory when moving according to the algorithm using the VS; **3** – Towing vehicle movement trajectory when moving according to the algorithm using the optocoupler matrix; **4** – Towing vehicle movement trajectory when moving according to the algorithm using STZ; **5** – aircraft; **6** - towing vehicle

Таблица 1. Сравнение результатов работы алгоритмов

Table 1. Comparison of the results of the algorithms

Тип управления / Type of control	Комбинированное управле- ние с использованием оп- тронной матрицы / Combined control with the use of an optocoupler matrix	Управление с использо- ванием СТЗ / Management using STZ
Критерий / Criteria		
Среднеквадратичная ошибка	12.67	7,44
Среднеквадратичные энер- гозатраты	$1.885 \cdot 10^9$	$1,247 \cdot 10^9$

Выводы

1. Разработана структура роботизированной буксировочной аэродромной системы, включающей мобильный буксировщик, сцепное устройство, воздушное судно, бортовую систему управления.

2. Разработан алгоритм управления позиционированием роботизированной буксировочной аэродромной системой, основанный на логической обработке сигналов оптронной матрицы.

3. Разработаны алгоритмы управления движением РБАС по заданной контрастной линии при действии внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, позволяющие обеспечить высокоточное движение РМБ.

4. Проведён сравнительный анализ системы управления с СТЗ и системы управления с оптронной матрицей. Алгоритм СТЗ показал себя как более точный метод для осуществления перемещения буксировщика.

Список литературы

1. Казанцева П. И., Шевцова Н. В. Современные проблемы гражданской авиации России // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 3. №. 13. С. 458-459.

2. Maulana R. R., Wibowo S. S. Design and Manufacture of Remote Control Towing Tug for Cessna 172 Aircraft: Structural Analysis // Seminar Nasional Industri dan Teknologi, 2021. P. 525-532.

3. Baaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, AIAA Aviation, 2019 // Forum. 2019. P. 2932.

4. Роботизированная система для наземного транспортирования воздушных судов / А. В. Великанов, Д. Е. Дьяков, Л. А. Великанова, Н. А. Дьякова // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. №37. С. 42-52.

5. Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft // Frontiers in Robotics and Electromechanics. 2023, Springer. P. 327-339.

6. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В. Афонин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т.22, №2(77). С. 34-43.

7. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot / N. T. Binh, N. A. Tung, D. P. Nam, N. H. Quang // International Journal of Control, Automation and Systems. 2019, Т. 17. С. 465-473.

8. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs / G., Sirigu M. Cassaro, M. Battipede, P. Gili // WSEAS Transactions on Electronics. 2017. №8. P.27-40.

9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics

10. Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control // *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS 2017*. 15(3). P.222-227.
11. Adaptive predictive control of a differential drive robot tuned with reinforcement learning / P. T. Jardine, M. Kogan, S. N. Givigi, S. Yousefi // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2019. 33(2). P.410-423.
12. Shih C. L., Lin L. C. Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application // *Robotics*. 2017. 6(3). P. 17.
13. Афонин Д.В., Печурин А.С., Яцун С.Ф. Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022; 26(3): 63-80. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>
14. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. IEEE, 2016. P. 480-483.
15. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. T. 139. P. 284-293.
16. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment // *IEEE Access*. 2019. T. 7. P. 82337-82348.
17. Saenz A. et al. Velocity control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2021. T. 19. №. 2. P. 1089-1102.
18. Ефремов К.С., Шестаков В.А. Исследование базовых маневров движения многозвенных колесных роботов // *Выставка инноваций-2020 (весенняя сессия)*. 2020. С. 69.
19. Афонин Д.В., Печурин А.С., Яцун С.Ф. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной буксировочной системы воздушных судов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 2. С. 173-183.

References

1. Kazantseva P. I., Shevtsova N. V. Sovremennye problemy grazhdanskoi aviatsii Rossii. [Modern problems of civil aviation in Russia]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2017, vol. 3, no. 13, pp. 458-459.
2. Maulana R. R., Wibowo S. S. Design and Manufacture of Remote Control Towing Tug for Cessna 172 Aircraft: Structural Analysis. 2021, pp. 525-532.
3. Baaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, *AIAA Aviation*, 2019. *Forum*, 2019, 2932 p.

4. Velikanov A.V., Dyakov D. E., Velikanova L. A., Dyakova N. A. Robotizirovannaya sistema dlya nazemnogo transportirovaniya vozdushnykh sudov [Robotic system for ground transportation of aircraft. *Nauchnyi vestnik GosNII GA* = *Scientific Bulletin of GosNII GA*, 2021, no.37, pp. 42-52.
5. Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun, S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft]. *Frontiers in Robotics and Electromechanics*, 2023, Springer, pp. 327-339.
6. Yatsun S. F., Bartenev V. V., Politov E. N., Afonin D. V. Modelirovanie dvizheniya robota-tyagacha dlya transportirovki samoletov po aerodromu [Simulation of the movement of a tractor robot for transporting aircraft at the airfield]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no.2(77), pp. 34-43.
7. Binh N. T., Tung N. A., Nam D. P., Quang N. H. An adaptive backstepping trajectory tracking control of a tractor trailer wheeled mobile robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, vol. 17, pp. 465-473.
8. Sirigu G., Cassaro M., Battipede M., Gili P. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs. *WSEAS Transactions on Electronics*, 2017, 8, pp. 27-40.
9. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"* ER (ZR) 2019, 2020, Kursk, Russia, 2019, pp. 397-409. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_32
10. Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control. *Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS*, 2017, no.15(3), pp.222-227.
11. Jardine P. T., Kogan M., Givigi S. N., Yousefi S. Adaptive predictive control of a differential drive robot tuned with reinforcement learning. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2019, no.33(2), p.410-423.
12. Shih C. L., Lin L. C. Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application. *Robotics*, 2017, no.6(3), 17 p.
13. Afonin V. D., Pechurin S. A., Yatsun F. S. Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 63-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>.
14. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, IEEE, 2016, pp. 480-483.
15. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 139, pp. 284-293.

16. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82337-82348.
17. Saenz A. et al. Velocity control of an omnidirectional wheeled mobile robot using computed voltage control with visual feedback: Experimental results. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 1089-1102.
18. Efremov K.S., Shestakov V.A. Issledovanie bazovykh manevrov dvizheniya mnogozvennykh kolesnykh robotov [Investigation of basic maneuvers of movement of multi-link wheeled robots]. *Vystavka innovatsii-2020 (vesenniyaya sessiya)* [Innovation Exhibition-2020 (spring session)]. 2020, 69 p.
19. Afonin D.V., Pechurin A.S., Yatsun S.F. Modelirovanie avtonomnogo krivolineinogo dvizheniya robotizirovannoi buksirovochnoi sistemy vozdushnykh sudov [Modeling of autonomous curvilinear motion of a robotic towing system of aircraft]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2022, no. 2, pp. 173-183.

Информация об авторах / Information about the Authors

Афонин Дмитрий Вячеславович, аспирант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Dmitrii V. Afonin, Post-Graduate Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Кочергин Олег Борисович, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: o-kochergin@bk.ru

Oleg B. Kochergin, Student, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: o-kochergin@bk.ru

Яцун Сергей Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>, ResearcherID G-3891-2017