

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-63-80>

Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолёта с помощью сигналов оптронной матрицы

Д. В. Афонин¹, А. С. Печурин¹, 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

Серьёзная загруженность аэропортов транспортно-авиационной и грузовой авиацией создает проблему для наземной логистики, серьёзно усложняя работу буксировочной аэродромной системы и персонала, что влечёт за собой издержки, связанные с задержкой поставок или простоя оборудования. Выйти из подобной ситуации позволит применение средств автоматического перемещения воздушных судов, способных круглосуточно и быстро буксировать самолёты по аэродрому, следуя оптимальной траектории.

Цель исследования. Создание математической модели и алгоритма управления автономным совместным движением колёсного авиационного тягача и воздушного судна, где управление основано на сигналах оптронной матрицы.

Методы. Достижение поставленной цели потребовало решения задач: описания динамической модели связанных между собой упругим элементом колёсных тел; создание модели обратной связи, основанной на группе оптопар, детектирующих контрастную линию; описание логических условий, позволяющих определить положение объекта относительно контрастной линии. Для описания динамики колёсной платформы использовались уравнения Лагранжевой динамики, а также численные методы математического моделирования. В качестве инструмента для оценки положения системы относительно контрастной линии рассматривается оптронная матрица.

Результаты. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать движение системы и раскрыть взаимодействие элементов системы. Разработан адаптивный алгоритм управления движением системы на основе обратных связей дискретного типа. Рассмотрен пример управления системой при движении по прямой с прохождением поворотов под углом 90°. Предложена комбинированная система торможения, при которой формируются распределённые тормозные усилия, как на воздушном судне, так и буксировщике.

Заключение. В результате проведенного математического моделирования было установлено, что система колёсных тел, связанная силой упругости, способна совершать управляемое движение вдоль прямой и при прохождении крутых поворотов, опираясь на показания оптронной матрицы; приведены соответствующие графики.

Ключевые слова: авиационный робот-буксировщик; математическое моделирование системы колёсных тел; оптико-электронная матрица; система управления авиационным колёсным буксиром.

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., 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>.

Поступила в редакцию 23.08.2022

Подписана в печать 14.09.2022

Опубликована 30.09.2022

Simulation of the Joint Movement of a Robotic-Towing Vehicle and an Aircraft Using Signals from an Optocoupler Matrix

Dmitrii V. Afonin ¹, Alexander S. Pechurin ¹, Sergei F. Yatsun ¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Actuality. The heavy workload of airports with transport and cargo aviation creates a problem the land logistics, that seriously complicates the work of the airfield towing system and personnel working processes. That entails expenses associated with delayed deliveries or equipment downtime. The usage of the automatic aircraft movement systems, which are capable of towing aircraft round the clock and quickly along the airfield, following the optimal trajectory allows to avoid such situations.

Purpose of research. Creation of the mathematical model and the control algorithm for the autonomous joint movement of a wheeled aircraft towing vehicle and an aircraft, where the control is based on the signals of an optocoupler array.

Methods. Achieving this goal required solving the following problems: describing of a dynamic model of wheeled bodies interconnected by an elastic element; creation of a feedback model based on a group of optocouplers detecting a contrast line; description of the logical conditions that allow determining the position of the object relative to the contrast line. To describe the dynamics of the wheeled platform, the equations of Lagrangian dynamics, as well as the numerical methods of mathematical modeling, were used. An optocoupler array is considered as a tool for estimating the position of the system relative to the contrast line.

Results. A mathematical model, which explores the system movement and reveals the interaction of the system elements has been developed. An adaptive algorithm based on the discrete type feedback for the system managing is developed. An example of the control system when moving in a straight line with the passage of turns at an angle of 90 degrees is considered. A combined braking system in which the distributed brake efforts both on a aircraft and the tower are formed is proposed.

Conclusion. As a result of the mathematical modeling, it was found that the system of wheeled bodies, bound by the force of elasticity, is able to perform controlled movements along a straight line and when passing sharp turns, based on the readings of the optocoupler matrix; corresponding graphs are shown.

Keywords: aircraft tug robot; mathematical modeling of the system of wheeled bodies; optoelectronic matrix; aircraft wheeled tug control system.

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

Funding: The study was carried out with the support of the Strategic Project "Priority-2030. Creation of robotic tools to expand human functionality".

For citation: 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>.

Received 23.08.2022

Accepted 14.09.2022

Published 30.09.2022

Введение

Развитие авиационной техники связано не только с созданием и модернизацией самолетов, но и с разработкой новых средств, непосредственно обеспечивающих полеты. Постоянный рост авиаперевозок, а также увеличение количества самолетов создает проблему для логистики современных аэропортов. Для осуществления наземных маневров с воздушными судами (ВС) применяют буксировочную аэродромную систему (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 [1, 2]. В то же время, буксировка ВС является трудоемким и небезопасным процессом, требующим привлечения высококвалифицированных специалистов. Эффективность БАС определяется слаженностью действий членов бригады, которые следят за выдерживанием безопасных расстояний между элементами конструкции ВС и другими ВС, а также элементами инфраструктуры аэропорта, с целью исключения повреждения воздушного судна. Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем буксировки ВС, является переход к новым технологиям буксировки ВС на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ). Роботизи-

рованная БАС (РБАС), позволяет значительно сократить численность буксировочной бригады, повысить безопасность и обеспечить максимальную скорость движения ВС. В развитых странах мира разрабатываются новые виды БАС, способные заменить стандартные аэродромные тягачи, управляемые человеком. Например, компания TNA Aviation Technologies для перемещения пассажирских самолетов с максимальной взлетной массой от 9 до 60 т предлагает использовать буксировщик-робот Tugmaxxe. Компания WheelTug, предлагает использовать вместо аэродромного тягача специальное моторизированное колесо, установленное на передней стойке шасси самолета, что позволяет ВС самостоятельно перемещаться по территории аэропорта. Для создания таких систем необходимо разработать математические модели объекта управления (РБАС) и среды функционирования, которые адекватны реальным физическим процессам. Особое внимание должно быть уделено оценке вектора состояния и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в условиях возможной параметрической неопределенности.

Материалы и методы

РБАС рассматривается как человеко-машинная система [3], включающая оператора, человеко-машинный интер-

фейс, роботизированный мобильный буксировщик (РМБ), модуль захвата переднего колеса (СУ), воздушного судна (ВС), систему предупреждения столкновений (СПС), блок управления (БУ) (рис.1). Эффективность системы определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы. Оператор, являясь лицом принимающим решение (ЛПР), на основании анализа информации о состоянии окружающей среды, формирует задание для движения РМБ и ВС в виде набора точек, расположенных в пространстве аэродрома в соответствии с выбранной стратегией, блок планирования определяет параметры траектории. СПС состоит из дальномеров, системы технического зрения (СТЗ1), (СТЗ2), навигация РБАС осуществляется с помощью датчиков, установленных на РМБ (датчик отклонения (ДО), одометр, GPS, лидар), которые позволяют определять реальное положение РМБ и вычислять отклонение реального положения от заданного [4]. БУ формирует управляющие напряжения, поступающие на электроприводы РМБ, и тормозную систему ВС.

Рассмотрим сценарии функционирования РБАС при выполнении задач передвижения ВС.

1. Дистанционное управление, при котором, оператор осуществляет постоянный контроль движения РБАС, а РМБ выполняет заданные оператором, управляемые движения.

2. Комбинированный режим, при котором периодически в определенные моменты времени оператор осуществляет контроль и управление РМБ, а, в остальном, оператор не контролирует положение РМБ.

3. Автономное управление, при котором оператор не контролирует положение РМБ, который осуществляет автономное управляемое движение по заданной траектории.

Роботизированный мобильный буксировщик (рис. 2) представляет собой колёсную платформу [5,6], построенную по схеме робота с дифференциальным приводом – движение которого основано на двух независимых ведущих колесах, размещенных по обе стороны корпуса робота.

РМБ (рис. 2) состоит из корпуса 1, ведущего колеса левого 2, ведущего колеса правого 3, поворотного колеса 4, оптической матрицы 5, электроприводов 6 и 7, дальмеров 8, одометра 9, бортового вычислителя 10, GPS 11, модуль захвата переднего колеса 12, СТЗ13.

Перемещение модуля захвата переднего колеса (СУ) 12 осуществляется с помощью электроприводов ведущих колес РМБ, при этом СТЗ 13 и дальмеры 8 обеспечивают контроль за положением и ориентацией РМБ относительно переднего колеса ВС. Управление движением РМБ в этом режиме производится автоматически по специальному алгоритму, схема которого приведена на рис. 3.

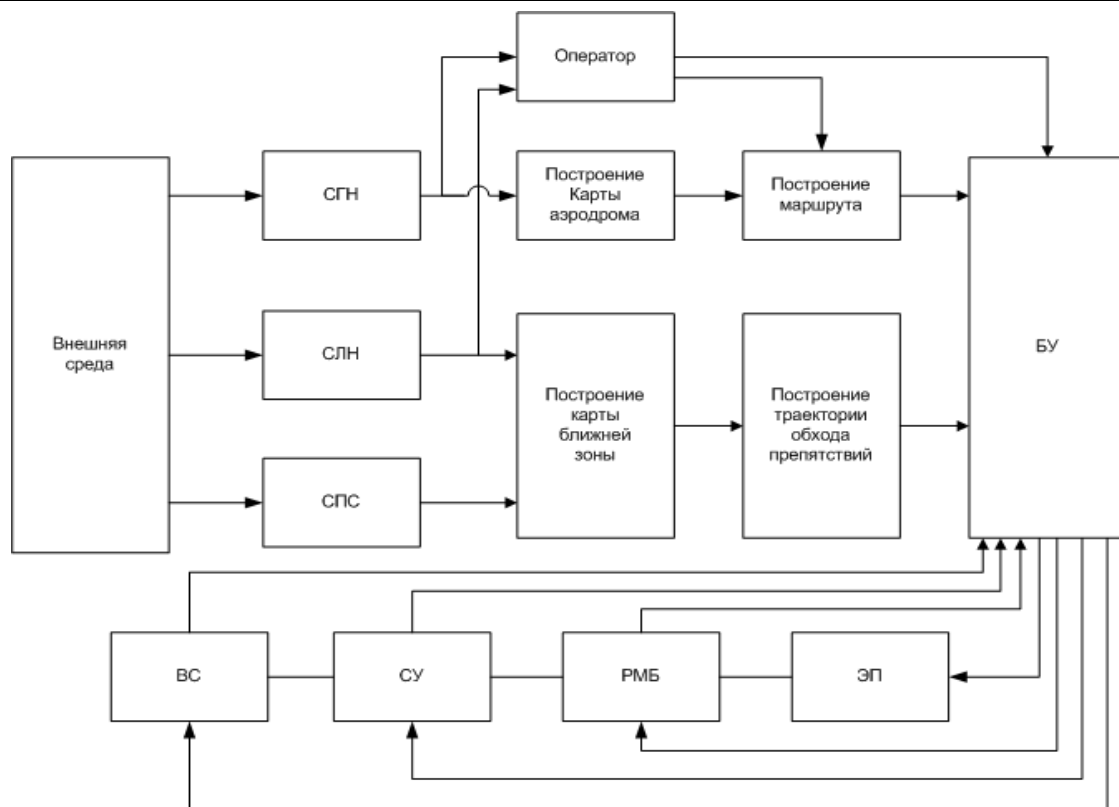


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

Fig. 1. Block diagram of a robotic ATS (Aircraft Towing System)

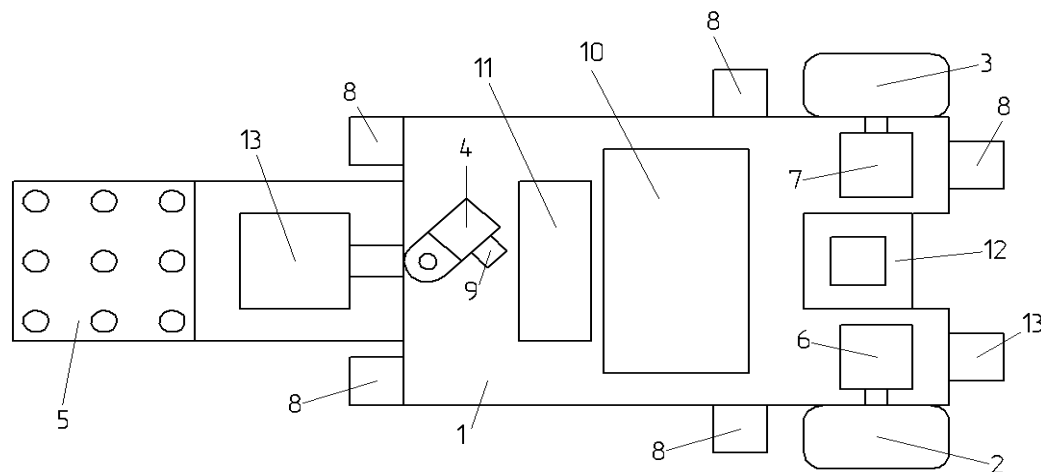


Рис. 2. Структурная схема РМБ

Fig. 2. Structural scheme RMTV (Robotic Mobile Towing Vehicle)

Математическое моделирование

Разработана математическая модель РБАС, схема которой приведена на рис. 4. РБАС состоит из двух секций: ВС и РМБ, которые соединены между

собой шарниром и представляют собой трехколесные мобильные платформы. Движение происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Секция РМБ обозначена $A_1B_1C_1$, а секция с ВС, соответственно $A_2B_2C_2$.



Рис. 3. Алгоритм сцепки

Fig. 3. Hitch algorithm

Точка D_2 определяет положение переднего колеса ВС на платформе РМБ и принадлежит как РМБ, так и ВС. На рис. 4 обозначены основные геометрические и кинематические конструктивные параметры: ω_{11}, ω_{12} – угловая скорость соответственно левого и правого бортовых колес РМБ; ω_{21}, ω_{22} – угловая скорость соответственно левого и правого бортовых колес ВС; ϕ_1 – угол поворота платформы РМБ, отсчитываемый от оси Ox ; ϕ_2 – угол поворота ВС, отсчитываемый от оси Ox .

Математическая модель РБАС [7-12], позволяющая определить зависимость координат центра масс ВС $C_2 = (X_{C_2}, Y_{C_2})$ от управляющих сил F_{11}, F_{12} , основывается на уравнениях динамики.

Система дифференциальных уравнений движения РМБ в системе координат ⁽¹⁾ имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{V}_{O_1}^{(1)} &= \frac{BR_R + BR_L + F_{11} + F_{12} - P_{21x}^{(1)} + m_{C_1} \cdot |O_1 C_1| \cdot \dot{\phi}_1^2 - \mu_{V_{O_1}} \cdot V_{O_1}^{(1)}}{m_1 + \frac{2 \cdot J_{W_1}}{r_{W_1}^2}} \\ \ddot{\phi}_1 &= \frac{|A_1 O_1| \cdot (BR_R + F_{11} - F_{12} - BR_L) - P_{21y}^{(1)} \cdot |O_1 D_1| - m_{C_1} \cdot |O_1 C_1| \cdot \dot{\phi}_1 \cdot V_{O_1}^{(1)} - \mu_{\dot{\phi}_1} \cdot \dot{\phi}_1}{J_1 + \frac{|A_1 O_1|^2}{r_{W_1}^2} \cdot J_{W_1}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Угловая и линейная скорость движения РМБ находятся с помощью численного метода интегрирования и представлены уравнениями (2) и (3) соответственно:

$$V_{O_i}^{(1)} = V_{O_{i-1}}^{(1)} + \dot{V}_{O_i}^{(1)} \cdot dt; \quad (2)$$

$$\dot{\phi}_i = \dot{\phi}_{i-1} + \ddot{\phi}_i \cdot dt. \quad (3)$$

Переход из локальной системы координат РМБ в глобальную описывается уравнениями:

$$\bar{V}_{O_1}^{(0)} = T_{10} \cdot [V_{O_1}^{(1)} \quad 0]^T; \quad (4)$$

$$\bar{r}_{D_1}^{(0)} = \bar{S}_1^{(0)} + T_{10} \cdot [|O_1 D_1| \quad 0]^T; \quad (5)$$

$$\bar{r}_{C_1}^{(0)} = \bar{S}_1^{(0)} + T_{10} \cdot [|O_1 C_1| \quad 0]^T, \quad (6)$$

где $T_{10} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{bmatrix}$ – матрица поворота РМБ вокруг оси, а $\bar{S}_{i_1}^{(0)} = \bar{S}_{i-1}^{(0)} + \bar{V}_{O_{i_1}}^{(0)} \cdot dt$.

Система дифференциальных уравнений движения ВС в системе координат $^{(2)}$ имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{V}_{O_2}^{(2)} = \frac{P_{12x}^{(2)} + m_{C_2} \cdot |O_2 C_2| \cdot \dot{\varphi}_2^2 - \mu_{V_{O_2}} \cdot V_{O_2}^{(2)}}{m_2 + \frac{2 \cdot J_{W_2}}{r_{W_2}^2}} \\ \ddot{\varphi}_2 = \frac{|A_2 O_2| \cdot (PBR_R - PBR_L) P_{12y}^{(2)} \cdot |O_2 D_2| - m_{C_2} \cdot |O_2 C_2| \cdot \dot{\varphi}_2 \cdot V_{O_2}^{(2)} - \mu_{\dot{\varphi}_2} \cdot \dot{\varphi}_2}{J_2 + \frac{|A_2 O_2|^2}{r_{W_2}^2} \cdot J_{W_2}} \end{cases} \quad (7)$$

Переход из локальной системы координат ВС в глобальную описывается с помощью уравнений:

$$\bar{V}_{O_2}^{(0)} = T_{20} \cdot \begin{bmatrix} V_{O_2}^{(2)} & 0 \end{bmatrix}^T; \quad (8)$$

$$\bar{r}_{D_2}^{(0)} = \bar{S}_2^{(0)} + T_{20} \cdot \begin{bmatrix} |O_2 D_2| & 0 \end{bmatrix}^T; \quad (9)$$

$$\bar{r}_{C_1}^{(0)} = \bar{S}_2^{(0)} + T_{20} \cdot \begin{bmatrix} |O_2 C_2| & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$

где $T_{20} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) \end{bmatrix}$ – матрица

поворота ВС вокруг оси.

Сила $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ является связующим элементом РМБ и ВС, т.е. во время управляемого движения РМБ происходит растяжение или сжатие упругого элемента, что, как следствие, и порождает силу $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$, которая в свою очередь приводит к движению ВС.

Определение значения силы $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ и её угла поворота α происходит в соответствии уравнениями:

$$\begin{bmatrix} P_{21x}^{(0)} \\ P_{21y}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_X & 0 \\ 0 & C_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{D_1} - X_{D_2} \\ Y_{D_1} - Y_{D_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_X & 0 \\ 0 & \mu_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d(D_{1x} - D_{2x})}{dt} \\ \frac{d(D_{1y} - D_{2y})}{dt} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_{D_1} - Y_{D_2}}{X_{D_1} - X_{D_2}}\right), \quad (12)$$

где $X_{D_1}; Y_{D_1}$ – координаты точки D_1 , принадлежащей РМБ; $X_{D_2}; Y_{D_2}$ – координаты точки D_2 , принадлежащей ВС; C_X, C_Y – коэффициенты упругости; μ_X, μ_Y – коэффициенты вязкости.

Переход силы $\bar{P}_{21} = -\bar{P}_{12}$ из глобальной системы координат в локальные системы РМБ и ВС происходит с помощью уравнений:

$$\bar{P}_{12}^{(0)} = \bar{P}_{21}^{(0)} \quad (13)$$

$$\bar{P}_{21}^{(1)} = T_{10}^{-1} \cdot \bar{P}_{21}^{(0)} \quad (14)$$

$$\bar{P}_{12}^{(1)} = T_{20}^{-1} \cdot \bar{P}_{12}^{(0)}. \quad (15)$$

Схема движения ВС и РМБ по заданной траектории в виде отрезка прямой показана на рис. 4. $X_0 O Y_0$ – неподвижная система координат, ось $O X_0$ параллельна контрастной линии; $X_1 C_1 Y_1$ – подвижная система координат, связанная с РМБ; $X_2 C_2 Y_2$ – подвижная система координат, связанная с ВС; $X_M M Y_M$ – подвижная система координат, связанная с оптронной матрицей.

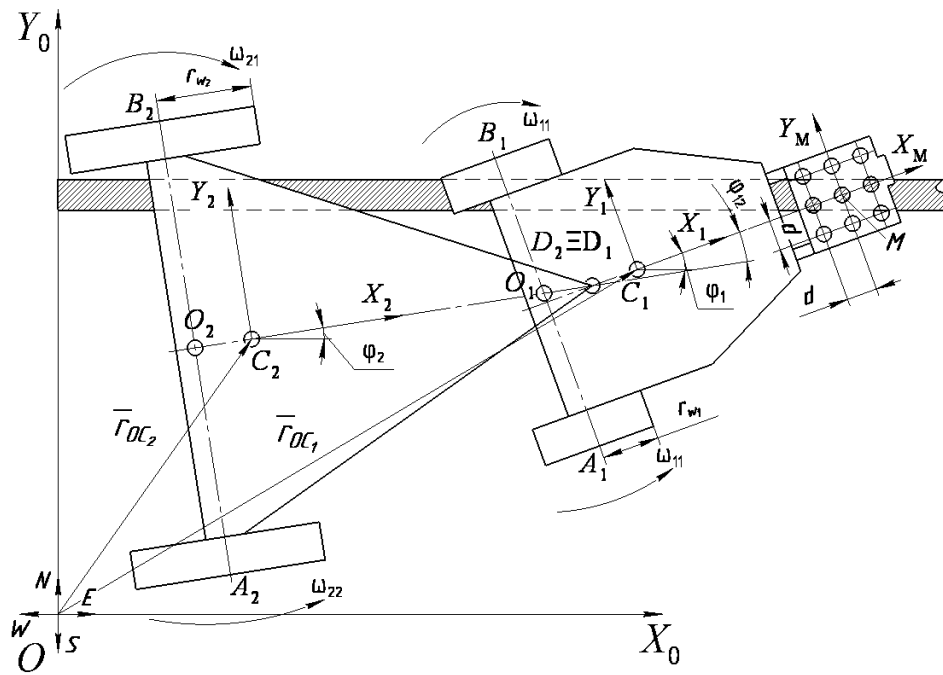


Рис. 4. Схема совместного движения РМБ и ВС

Fig. 4. Scheme of joint movement RMTV and aircraft

Система управления

Системой управления РБАС решается задача минимизации отклонения

траектории движения от заданной оператором. Алгоритм работы [13-17] роботизированного буксировщика представлен на рис. 5.

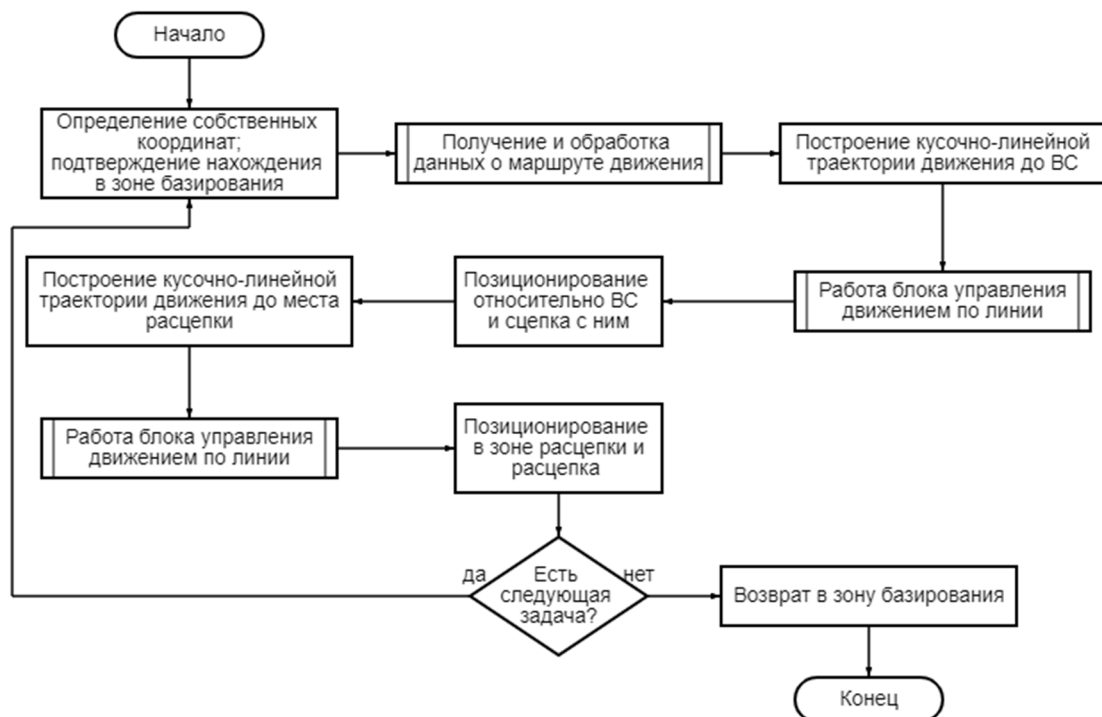


Рис. 5. Общий алгоритм работы РМБ

Fig. 5. General algorithm of RMTV operation

Для контроля за положением РБАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется оптронная матрица (ОМ) (рис. 6), что позволяет оценивать отклонение реального положения РБАС от заданного с точностью, определяемой расстоянием между оптопарами [18-19]. Принято, что отраженным от контрастной линии сигналам присваивается 1, в противном случае 0.

Желаемое положение РБАС задается подвижной точкой M^* в соответствии с уравнениями [20-21]: при движении вдоль оси X_0O ;

$$\bar{M}^* = [M_x^*, M_y^*]^T = \left[\sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j, H \right]^T; \quad (16)$$

при движении вдоль оси OY_0

$$\bar{M}^* = [M_x^*, M_y^*]^T = \left[L, \sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j \right]^T. \quad (17)$$

Реальное положение ОМ определяет точка M (рис. 6 б)). Величину ошибки (отклонения центра ОМ от желаемого положения) определим по формуле

$$\bar{e} = \bar{M}^* - \bar{M}, \quad \bar{e} = \begin{bmatrix} M_x^* - M_x \\ M_y^* - M_y \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Выходные сигналы оптронной матрицы представим в виде матрицы M

$$M = [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}; C_{21} \ C_{22} \ C_{23}; C_{31} \ C_{32} \ C_{33}].$$

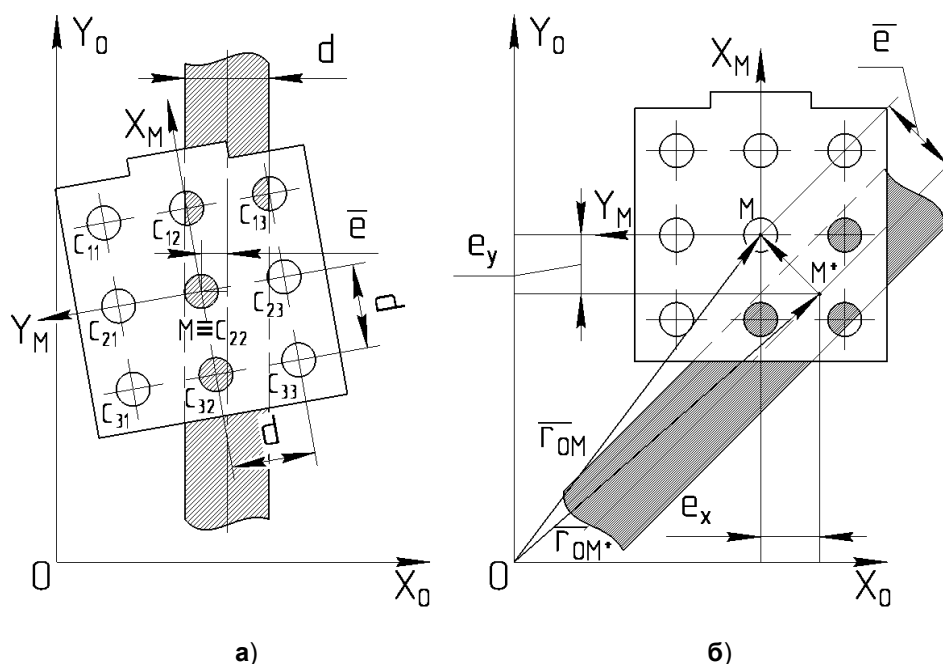


Рис. 6. Схемы определения положения ОМ над КЛ: **а** – при допустимом отклонении, **б** – при недопустимом отклонении

Fig. 6. Position detection schemes optocoupler matrix (OM) above contrast line (CL): **a** – with an acceptable difference; **b** – with an unacceptable difference

Различные позиции ОМ при движении РМБ относительно КЛ представ-

лены на рис. 7. В случае движения ОМ внутри интервала (рис. 7 а)), матрица

выходных значений светодиодов имеет вид $M=[010;010;010]$. Если оптронная матрица имеет вид $M=[001;010;100]$ и $M=[000;111;000]$ (рис. 7 б), в)), то аппарат повернут на угол $\varphi_1 \approx +45^\circ$ и $\varphi_1 \approx +90^\circ$ относительно линии, что свидетельствует о необходимости корректировки положения.

Особого внимания требуют случаи, представленные на рис. 7 г) и 7 д), поскольку угол поворота относительно линии равен $90^\circ \leq \varphi_1 \leq 180^\circ$, они обу-

словлены реакцией на возмущение или дестабилизирующие воздействия со стороны ВС.

Поскольку в случаях г) и д) (см. рис. 7) выходные значения матриц одинаковы со случаями а), б) (см. рис. 7), необходимо описание программного инструмента, позволяющего верно интерпретировать текущее состояние матрицы. В качестве подобного инструмента предлагается использовать сравнение состояний матриц на текущей и предыдущей итерациях.

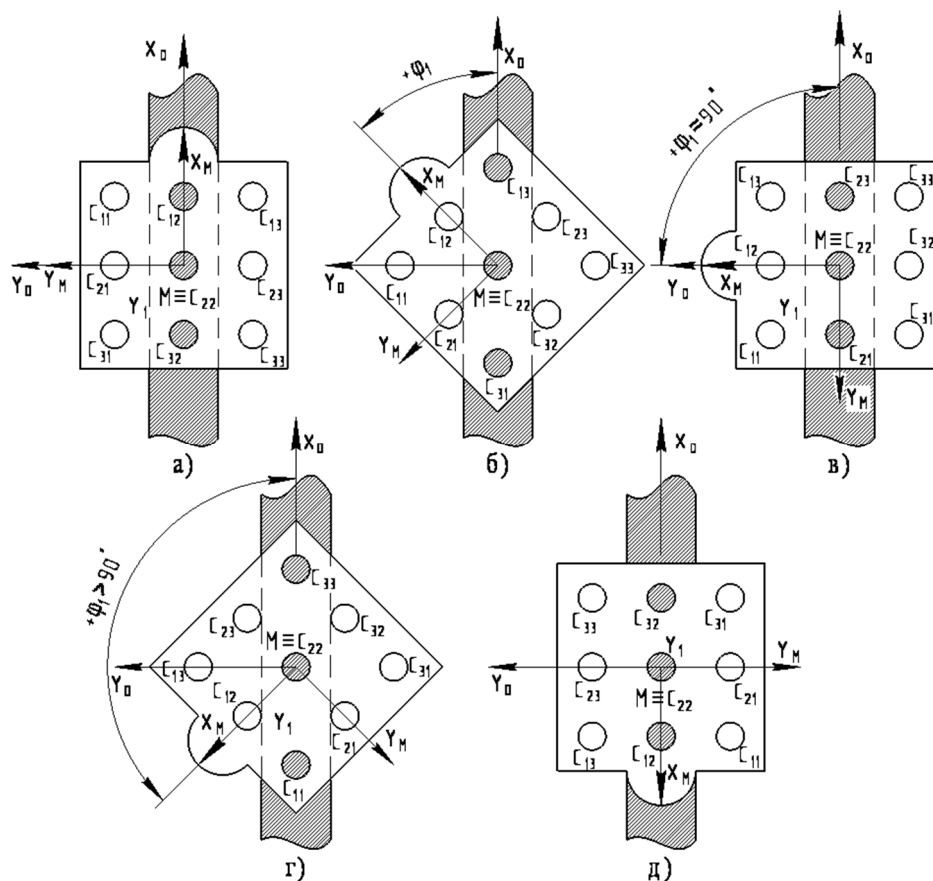


Рис. 7. Схемы определения положения ОМ над КЛ

Fig. 7. Schemes for determining the position of the OM over the CL

Силы, создаваемые колёсами, рассчитываются исходя из показаний оп-

тронной матрицы и логических условий, представленных ниже.

Управляющие напряжения [22-24] высчитываются исходя из:

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} U_{R_w} \\ U_{L_w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{c_1} & 0 \\ 0 & c_{c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ U_0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$U_0 = K_p \cdot (V_c^* - V_c) + K_I \cdot (\int V_c^* - V_c \cdot dt) + K_D \cdot ((d(V_c^* - V_c)) / dt)$, C_{c_1}, C_{c_2} – корректирующие коэффициенты, зависящие от состояния оптронной матрицы М. Коэффициенты C_{c_1}, C_{c_2} зависят от скорости движения и состояния М.

Условия перехода в режим корректировки движения:

Если $C_{22} = 1$ и $C_{12} = 1$ и $C_{32} = 1$, то корректировка положения не требуется и $C_{c_1} = 0, C_{c_2} = 0$;

Если $M \neq [010, 010, 010]$, то требуется корректировка положения и тогда C_{c_1} и $C_{c_2} \in [0, 0.1, \dots, 1]$;

Если $|\bar{e}| \rightarrow 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}$, то C_{c_1} и $C_{c_2} \rightarrow 1$.

Точность положения ОМ относительно КЛ определяется параметром d . Если выполнено условие $O_0 O_1 < |d|$, то считается, что погрешность отсутствует. Ориентация ОМ определяется углом φ_1 .

Оценка интервала ошибки по показанию элементов оптронной матрицы:

Если $C_{22} = 1$, то $|\bar{e}| \in [0; 0.5d]$;

Если $C_{22} \neq 1$ и ($C_{21} = 1$ или $C_{23} = 1$), то $|\bar{e}| \in [0; 1.5d]$;

Если $C_{22} \neq 1$ и ($C_{11} = 1$ или $C_{13} = 1$ или $C_{31} = 1$ или $C_{33} = 1$), то

$$|\bar{e}| \in [0.5 \cdot d; 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}].$$

Результаты и их обсуждение

Представленные результаты моделирования были достигнуты при следующих массогабаритных характеристиках:

$m_{c_1} = 2000$ кг – масса РМБ без колёс,

$m_{w_1} = 200$ кг – масса колеса РМБ,

$m_1 = 2400$ кг – общая масса РМБ,

$r_{w_1} = 0.4$ м – радиус колеса РМБ,

$J_{w_1} = 0.5 \cdot (m_{w_1} \cdot r_{w_1}^2)$ кг·м² – момент инерции колеса РМБ,

$$J_1 = J_{c_1} + m_{c_1} \cdot |O_1 C_1|^2 +$$

$$+ 2 \cdot m_{w_1} \cdot J_{w_1} = 5636.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

общий момент инерции РМБ,

$m_{c_2} = 22000$ кг – масса ВС без колёс,

$m_{w_2} = 500$ кг – масса колеса ВС,

$m_2 = 23000$ кг – общая масса ВС,

$r_{w_2} = 0.45$ м – радиус колеса ВС,

$J_{w_2} = 0.5 \cdot (m_{w_2} \cdot r_{w_2}^2)$ кг·м² – момент инерции колеса ВС,

$J_2 = J_{c_2} + m_{c_2} \cdot |O_2 C_2|^2 + 2 \cdot m_{w_2} \cdot J_{w_2} = 659930$ кг·м² общий момент инерции ВС.

На рис. 8 - 11 приведены результаты математического моделирования управляемого движения РБАС и ВС вдоль контрастной линии.

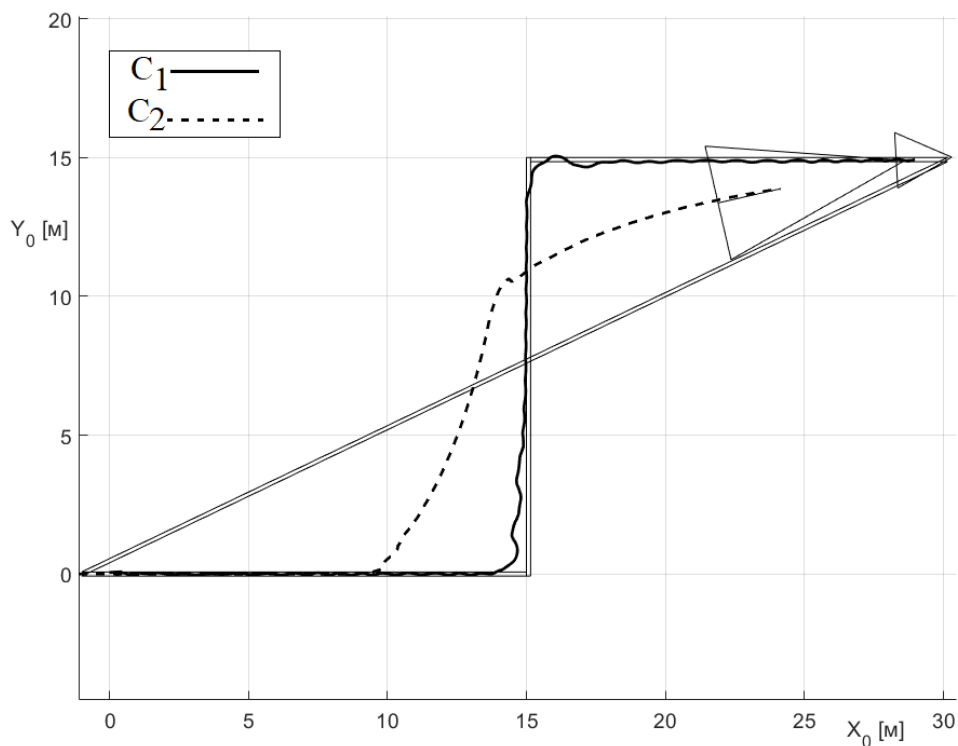


Рис. 8. Результат совместного управляемого движения РБАС

Fig. 8. The result of joint controlled movement robotic towing aircraft system (RTAS)

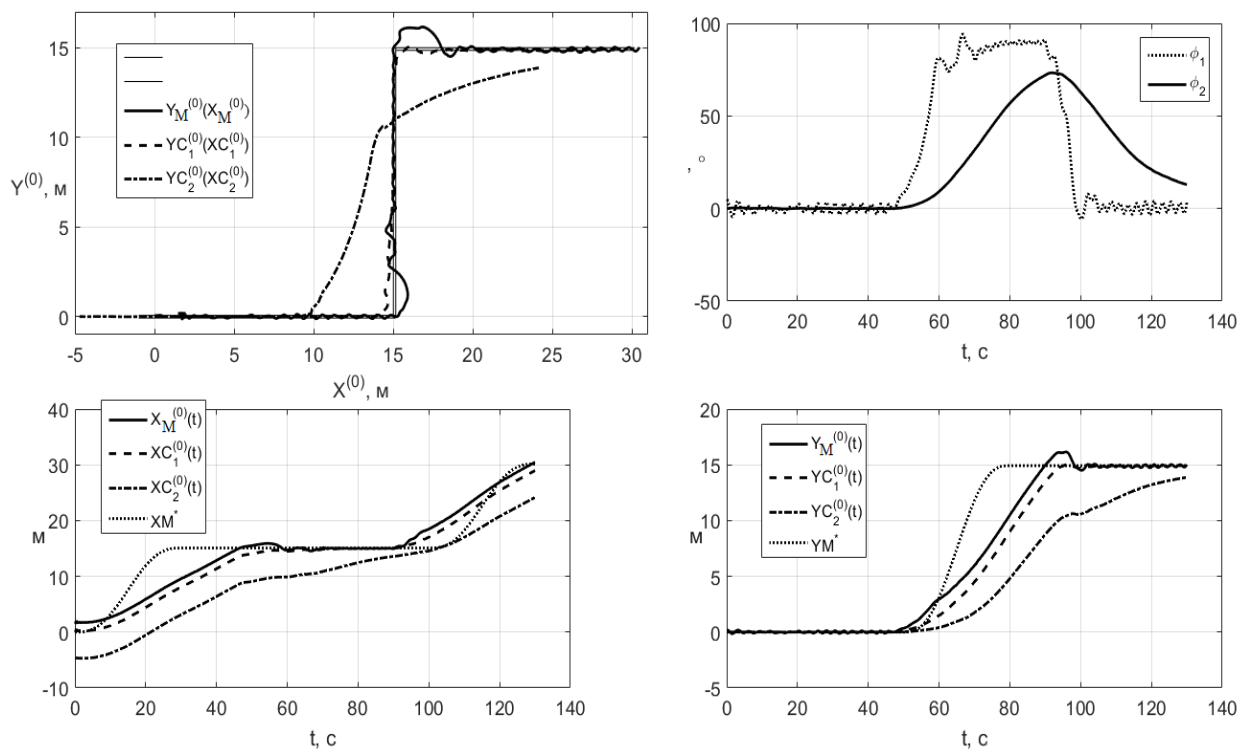


Рис. 9. Результаты моделирования совместного управляемого движения РБАС

Fig. 9. Simulation results of joint controlled motion RTAS

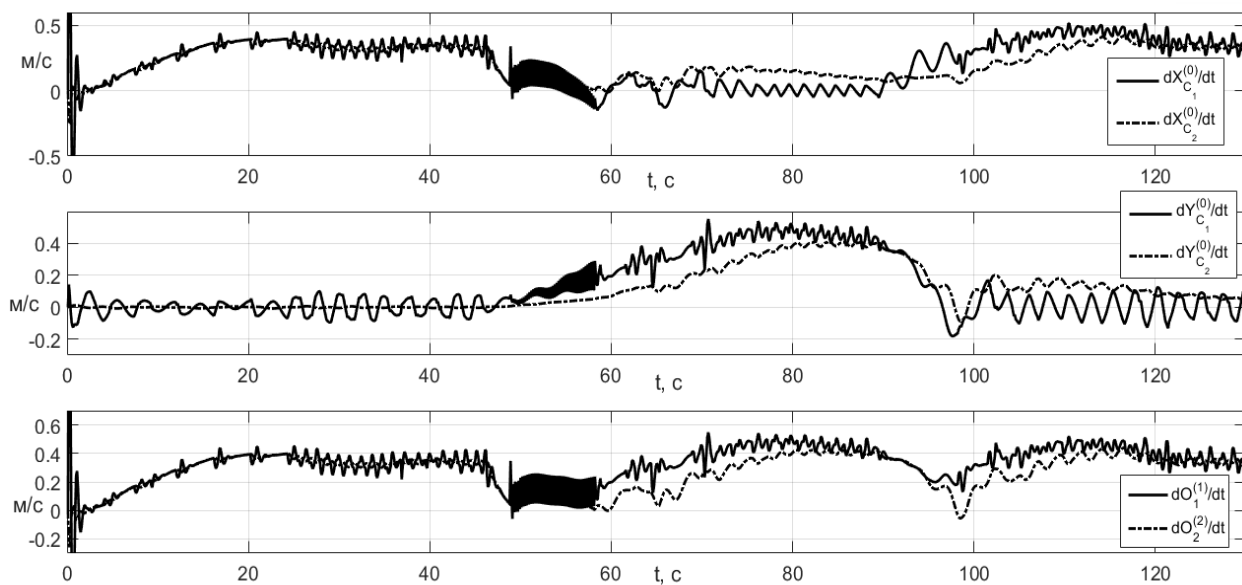


Рис. 10. Графики изменения скоростей РМБ и ВС

Fig. 10. Graphs of speeds changes RMTV and aircraft

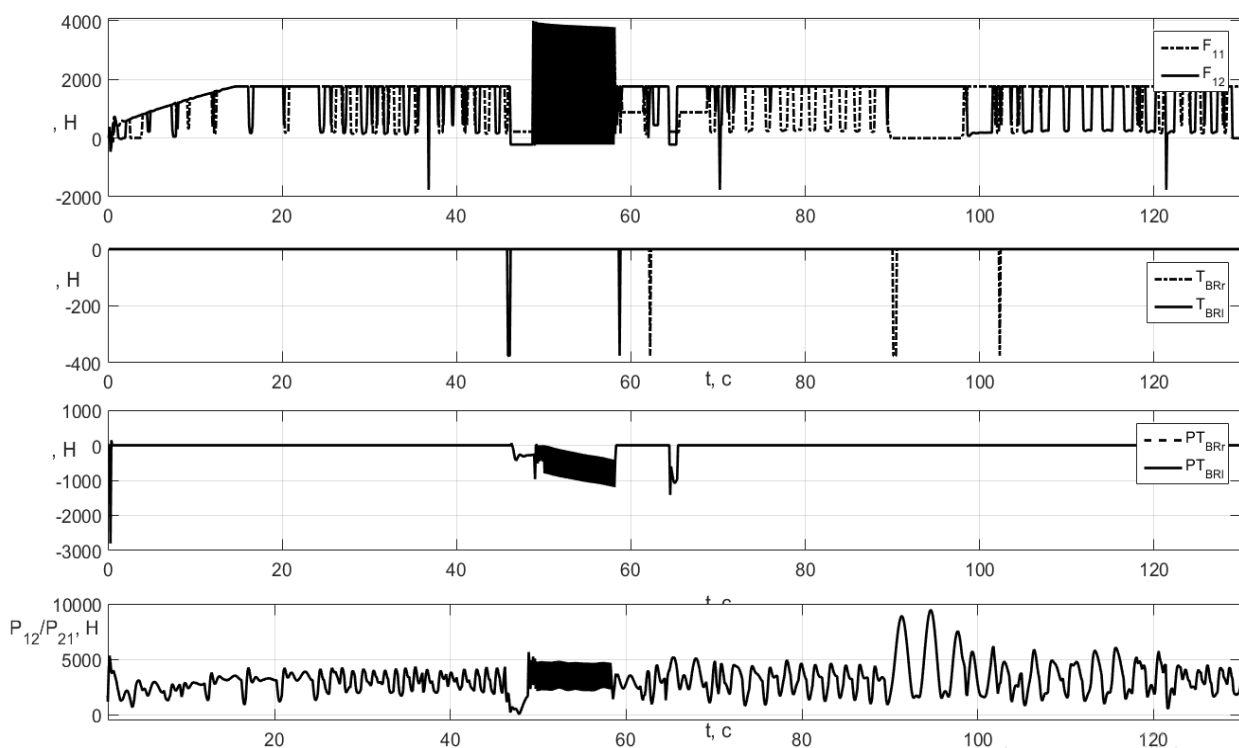


Рис. 11. Графики изменения: F_{11} , F_{12} – силы, создаваемые колёсами РМБ; T_{BRr} , T_{BRI} – тормозные усилия, создаваемые РМБ, PT_{BRr} , PT_{BRI} – тормозные усилия, создаваемые ВС

Fig. 11. Graphs of changes: F_{11} , F_{12} – forces generated by the wheels RMTV; T_{BRr} , T_{BRI} – braking force generated by RMTV; PT_{BRr} , PT_{BRI} – braking force generated by aircraft

Результаты моделирования демонстрируют, что система способна совершать управляемое движение, однако из-за больших значений массы и инерции на скоростях, превышающих 0.5 м/с, достигает критического рассогласования или теряет устойчивость. Также при заданном способе контроля траектория ВС имеет серьёзное рассогласование в состоянии поворота, что в дальнейшем ставит задачу разработки дополнительных систем контроля положения и дополнения алгоритмов управления.

Переработка алгоритмов работы тормозной системы, расширение логических ветвлений блока управления, увеличение размерности оптронной матрицы, а также использование нейронной сети позволит качественно улучшить точность движения по траектории.

Выводы

1. Разработан метод управления позиционированием роботизированной бук-

сировочной аэродромной системой, основанный на логической обработке сигналов оптронной матрицы, состоящей из оптических датчиков.

2. Предложена структурная схема аппарата - буксировщика, а также описан метод сцепки буксира и воздушного судна через связующий упругий элемент.

3. Приведены алгоритм и логика работы блока управления, а также синтез многоканального регулятора системы управления буксировщиком ВС.

4. Разработана математическая модель и проведено моделирование управляемого движения колёсной системы в режиме прохождения крутых поворотов.

5. Представлены результаты моделирования совместного движения, демонстрирующие работоспособность предложенного метода управления. Однако актуальной задачей является улучшение системы контроля самолёта для повышения качества движения.

Список литературы

1. Shi A. et al. Multi-robot Task Allocation for Airfield Pavement Detection Tasks // 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). IEEE, 2021. P. 62-67.
2. Chernomorskiy A. I., Lelkov K. S., Kuris E. D. On one way to improve the accuracy of navigation system for ground wheeled robot used in aircraft parking // Smart Science. 2020. Vol. 8. №. 4. P. 219-226.
3. Афонин Д.В., Политов Е.Н., Тимофеев Е.А. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых (13-14 декабря 2017 года): в 5 т. / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2017. Т. 5. С. 14-18.
4. de Vries T.J.A., van Heteren C., Huttenhuis L. Modelling and control of a fast moving, highly maneuverable wheelchair // Proceedings of the International Bio mechatronics Workshop 1999.6: 110-115.

5. Szczęśniak G. et al. Analysis of the chassis design for a highly mobile wheeled platform // *Journal of Measurement in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 4. №. 2. P. 52-57.
6. Kundu A. S. et al. Design and performance evaluation of 4 wheeled omni wheelchair with reduced slip and vibration // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 105. P. 289-295.
7. Martynenko Yu.G. Motion Control of Mobile Wheeled Robots // *Fundamental and Applied Mathematics*. 2005. № 8. P. 29-80.
8. Dhaouadi R., Hatab A. A. Dynamic modeling of mobile robots with differential drive using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework // *Advances in Robotics & Automation*. 2013. Vol. 2. №. 2. P. 1-7.
9. Liang Z., Yuan J. Modeling and optimisation of high-efficiency differential-drive complementary metal-oxide-semiconductor rectifier for ultra-high-frequency radio-frequency energy harvesters // *IET Power Electronics*. 2019. Vol. 12. №. 3. P. 588-597.
10. Martins F. N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots // *Journal of intelligent & robotic systems*. 2017. Vol.. 85. №. 2. P. 277-292.
11. Seegmiller N., Kelly A. High-fidelity yet fast dynamic models of wheeled mobile robots // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol.. 32. № 3. P. 614-625.
12. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling the dynamics of a wheeled mobile robot with mechanic wheels using Lagrange equations of the second kind // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol.. 22. №. 1.
13. Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 82337-82348.
14. Saenz A. et al. Speed 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. №. 2. P. 1089-1102.
15. Никишин Б., Шорин В.С., Лисицкий Д.Л. Построение алгоритмов функционирования системы ориентации и навигации транспортных роботов // *Труды Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства управления, контроля и измерения»*. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 183-184.
16. Бартенев В.В., Яцун С.Ф. Анализ методов управления движением мобильных колесных роботов по заданной траектории // *Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных трудов международной конференции*. Курск, 2012. С. 144-152.
17. Bartenev V. V. Dynamics of controlled motion of a mobile robot with two independent driving wheels: Ph. Southwestern State University. 2010.
18. Rafi R. H. et al. Design & implementation of a line following robot for irrigation based application // *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. IEEE, 2016. С. 480-483.

19. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments // *Robotics research*. Springer, Cham, 2016. P. 649-666.
20. 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. C. 284-293.
21. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калиниченко, Л. Н. Кравчук. М.: Наука, 2001. С. 26-91, 275-294, 158.
22. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix // *Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2010. P. 279-284.
23. Feng L., Koren Y., Borenstein J. A model-reference adaptive motion controller for a differential-drive mobile robot // *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994. P. 3091-3096.
24. Dhaouadi R, Sleiman M. Development of a modular mobile robot platform for motion-control education // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2011. 5: 35-45.

References

1. Shi A. et al. Multi-robot Task Allocation for Airfield Pavement Detection Tasks. *6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*. IEEE, 2021, pp. 62-67.
2. Chernomorskiy A. I., Lelkov K. S., Kuris E. D. On one way to improve the accuracy of navigation system for ground wheeled robot used in aircraft parking. *Smart Science*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 219-226.
3. Afonin D.V., Politov E.N., Timofeev E.A. Razrabotka robota-tyagacha dlya transportirovki samoletov po aerodromu [Development of a tractor robot for transporting aircraft around the airfield]. *Nauka molodykh - budushchee Rossii. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh* = [Science of the young - the future of Russia. Collection of scientific articles of the 2nd International scientific conference of promising developments of young scientists]. Kursk, 2017, vol. 5. pp. 14-18.
4. de Vries TJA, van Heteren C, Huttenhuis L. Modeling and control of a fast moving, highly maneuverable wheelchair. *Proceedings of the International Bio mechatronics Workshop*, 1999, 6: 110-115.
5. Szczęśniak G. et al. Analysis of the chassis design for a highly mobile wheeled platform. *Journal of Measurement in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 52-57.
6. Kundu A. S. et al. Design and performance evaluation of 4 wheeled omni wheelchair with reduced slip and vibration. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 105, pp. 289-295.

7. Martynenko Yu.G. Motion Control of Mobile Wheeled Robots. *Fundamental and Applied Mathematics*, 2005, no. 8, pp. 29-80.
8. Dhaouadi R., Hatab A. A. Dynamic modeling of mobile robots with differential drive using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 1-7.
9. Liang Z., Yuan J. Modeling and optimisation of high-efficiency differential-drive complementary metal-oxide-semiconductor rectifier for ultra-high-frequency radio-frequency energy harvesters. *IET Power Electronics*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 588-597.
10. Martins F. N., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots. *Journal of intelligent & robotic systems*, 2017, vol. 85, no. 2, pp. 277-292.
11. Seegmiller N., Kelly A. High-fidelity yet fast dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, vol. 32, no. 3, pp. 614-625.
12. Hendzel Z., Rykała Ł. Modeling the dynamics of a wheeled mobile robot with mechanic wheels using Lagrange equations of the second kind. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 22, no. 1.
13. 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.
14. Saenz A. et al. Speed 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.
15. Nikishin V.B., Shorin V.S., Lissitzky D.L. Postroenie algoritmov funktsionirovaniya sistemy orientatsii i navigatsii transportnykh robotov [Construction of algorithms for the functioning of the system of orientation and navigation of transport robots]. *Trudy Rossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnicheskie i programmnye sredstva upravleniya, kontrolya i izmereniya"* [Proceedings of the Russian Conference with International Participation "Technical and Software Management, Control and Measurement"]. Moscow, IPU RAN Publ., 2010, pp. 183-184.
16. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Analiz metodov upravleniya dvizheniem mobil'nykh kolesnykh robotov po zadannoi traektorii [Analysis of methods for controlling the movement of mobile wheeled robots along a given trajectory]. *Upravlyaemye vibratsionnye tekhnologii i mashiny. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi konferentsii* [Controlled vibration technologies and machines. Collection of scientific papers of an international conference]. Kursk, 2012, pp. 144-152.
17. Bartenev V. V. Dynamics of controlled motion of a mobile robot with two independent driving wheels: Ph. Southwestern State University, 2010.
18. 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.

19. Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. *Robotics research. Springer*, Cham, 2016, pp. 649-666.
20. Wang H. et al. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematic constraints based on high-order polynomial curve. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 139, pp. 284-293.
21. Gradetsky V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlyae-moe dvizhenie mobil'nykh robotov po proizvol'no orientirovannym v prostranstve poverkhnostyam* [Controlled motion of mobile robots on surfaces arbitrarily oriented in space]. Moscow, Nauka Publ., 2001, pp. 26-91, 275-294, 158.
22. Bartenev V.V., Yatsun S.F. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix. *Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation - Central Scientific & Research Institute Elektropribor Publ., 2010, pp. 279-284.
23. Feng L., Koren Y., Borenstein J. A model-reference adaptive motion controller for a differential-drive mobile robot. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1994, pp. 3091-3096.
24. Dhaouadi R., Sleiman M. Development of a modular mobile robot platform for motion-control education. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2011, 5: 35-45.

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

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

Alexander S. Pechurin, Post-Graduate Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.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