

Управление движением роботизированной двухзвенной колесной системы по заданной траектории

Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун

Аннотация—В работе рассмотрен подход к построению комбинированной системы управления позиционированием роботизированной буксировочной авиационной системой, который основывается на суперпозиции эталонных и корректирующих управляющих воздействий. Эталонные управляющие воздействия находятся путём расчёта крутящих моментов ведущих колёс роботизированного мобильного буксировщика из его динамической модели движения, в которую заложены требуемые характеристики движения системы. Корректирующие управляющие воздействия генерируются после обработки сигналов, поступающих от оптронной матрицы при движении по контрастной линии. Предложены структурные схемы устройства роботизированного буксировщика, системы управления, разработана расчетная схема роботизированной буксировочной авиационной, представлена математическая модель движения двухзвенной колёсной системы тел. Проведено математическое моделирование движения системы по заданной траектории для различных режимов управления, что позволило произвести сравнительную оценку качества буксировки в каждом из режимов управления согласно разработанному интегральному критерию. Предложен и описан метод противодействия скольжению ведущих колёс буксировщика при совместном движении по заданному закону, основанный на переносе части нормальной реакции. Приведены сопутствующие схемы, описан принцип работы системы управления, проведено математическое моделирование и представлены его результаты.

Ключевые слова— аэродромный буксировщик, система управления аэродромным буксировщиком, комбинированное управление, математическое моделирование, управление нормальной реакцией.

I. ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост авиаперевозок требует развития и модернизации не только воздушных судов (ВС), но и

Статья получена 7 марта 2023.

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

Д. В. Афонин, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, РФ (e-mail: teormeh@inbox.ru)

А. С. Печурин, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, РФ (e-mail: alexander.pechurin@yandex.ru)

С. Ф. Яцун, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, 305040, РФ (e-mail: teormeh@inbox.ru)

новых средств, непосредственно обеспечивающих полеты [1], поскольку увеличения числа ВС создает проблемы для логистики современных аэропортов. Буксировка ВС является трудоемким и небезопасным процессом, требующим привлечения до шести высококвалифицированных специалистов. Эффективность буксировки 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 повреждений [2]. Поэтому для осуществления наземных маневров с воздушными судами применяют буксировочную аэродромную систему (БАС, Airport's Tow System).

Одним из путей повышения безопасности и быстродействия систем буксировки ВС, является переход к новым технологиям на основе применения роботизированных мобильных буксировщиков (РМБ, Robotic Mobile Towing Vehicle) [3-5], позволяющим значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива.

Роботизированная БАС (РБАС, Robotic ATS), позволяет значительно сократить численность буксировочной бригады или перейти к беспилотным комплексам, решающим задачи автономной доставки ВС из текущего положения в заданное, что позволит повысить безопасность движения ВС при максимальных скоростях буксировки. Создание таких систем, требует разработки математических моделей и алгоритмов управления РБАС и среды функционирования, которые адекватны реальным физическим процессам. Особое внимание должно быть уделено оценке состояния РБАС и алгоритмам управления, обеспечивающим требуемые динамические качества системы с одновременным обеспечением стабильности в условиях возможной параметрической неопределенности.

В рамках настоящей работы предлагается оригинальная структурная схема роботизированной буксировочной аэродромной системы, схема оснащения роботизированного мобильного буксировщика, архитектура управления, а также предложена математическая модель, позволяющая оценить качество

управления.

II. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РБАС

Оператор, на основании анализа информации о состоянии окружающей среды, формирует задание для движения РМБ и ВС в соответствии с выбранной стратегией. Также оператор обрабатывает информацию, поступающую с приборов, установленных на борту РМБ и ВС, обеспечивая контроль за реальным положением объекта и имеет возможность в экстренных ситуациях изменять параметры движения РБАС.

На основании этого была разработана структура РБАС [6] (рис. 1) для осуществления наземных маневров с воздушными судами в автономном режиме, которая включает оператора, подсистемы РМБ, ВС, модуль сопряжения (СУ), осуществляющий захват переднего колеса ВС, управляемые электроприводы (ЭП), информационную систему. Система управления включает блок планирования, который состоит из четырех блоков: построения карты аэродрома; построения маршрута; построения карты ближней зоны; построения карты обхода препятствий и определяет параметры траектории и закон движения по ней. Блок управления (БУ) обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, определяющих реальное положение ВС и РМБ а также силы взаимодействия СУ и формирует управляющие напряжения по соответствующему алгоритму. ЭП РМБ под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС, обеспечивает эффективное торможение РБАС.

Таким образом, РБАС можно рассматривать как беспилотный комплекс, решающий задачи доставки воздушного судна из начального положения в конечное, в автономном режиме при контроле со стороны оператора.

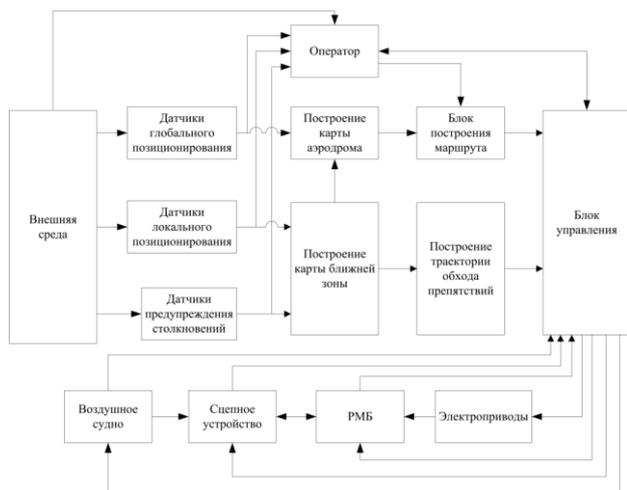


Рис. 1. Структурная схема роботизированной БАС

III. СХЕМА И ОПИСАНИЕ РМБ

Подсистема РМБ (рис. 2), представляет собой роботизированную колёсную платформу с дифференциальным приводом, управление движением которой происходит с помощью двух независимых

ведущих колес [7,8]. Датчики, установленные на РМБ (оптронная матрица (ОМ), одомер, дальномеры, система технического зрения (СТЗ1, СТЗ2), GPS, лидар), позволяют определять реальное положение РМБ, а ОМ определяет отклонение реального положения от контрастной линии и формирует вспомогательные управляющие напряжения, поступающие на электроприводы РМБ. В структуре РБАС предусмотрена возможность управления электроприводами тормоза ВС со стороны блока управления и оператора. Бортовая система управления должна предоставить всю необходимую информацию о характере движения. Максимальный эффект достигается в том случае, когда оператор, РМБ, СУ и ВС образуют интегрированную человеко-машинную систему (ЧМС), эффективность работы которой определяется степенью согласованности (синхронности) работы элементов этой системы. Перемещение модуля сопряжения и захвата переднего колеса (СУ) 12 осуществляется с помощью электроприводов ведущих колес РМБ, при этом СТЗ 13 и дальномеры 8 обеспечивают контроль за положением и ориентацией РМБ относительно переднего колеса ВС.

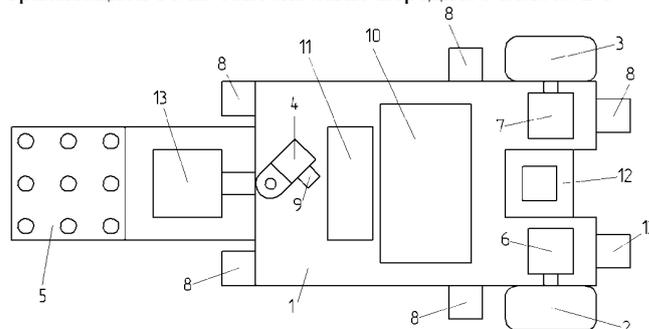


Рис. 2. Структурная схема подсистемы РМБ: корпус 1, левое приводное колесо 2, правое приводное колесо 3, рояльное колесо 4, оптронная матрица 5, электроприводы 6,7, дальномеры 8, одомер 9, бортовой вычислитель 10, GPS-модуль 11, модуль захвата переднего колеса самолёта 12, система технического зрения 13

IV. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РБАС

Разработана математическая модель РБАС, схема которой приведена на рисунке 3. Здесь обозначены основные геометрические и кинематические конструктивные параметры: ω_{11}, ω_{12} – угловая скорость соответственно левого и правого ведущих колес РМБ; ω_{21}, ω_{22} – угловая скорость соответственно левого и правого колес ВС; φ_1 – угол поворота РМБ, отсчитываемый от оси Ox_0 ; φ_2 – угол поворота ВС, отсчитываемый от оси Ox_0 . РБАС состоит из двух секций: ВС и РМБ, которые соединены между собой упругим элементом и представляют собой трехколенные мобильные платформы. Движение происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Секция РМБ обозначена A_1B_1M , а секция с ВС, соответственно $A_2B_2D_2$. Точка D_2 определяет положение переднего колеса ВС на платформе РМБ и принадлежит как РМБ, так и ВС. X_0OY_0 – неподвижная система координат; $X_1C_1Y_1$ – подвижная система

координат, связанная с заданной точкой РМБ. $X_2C_2Y_2$ - подвижная система координат, связанная с ВС; X_MMY_M - подвижная система координат, связанная с оптронной матрицей (ОМ).

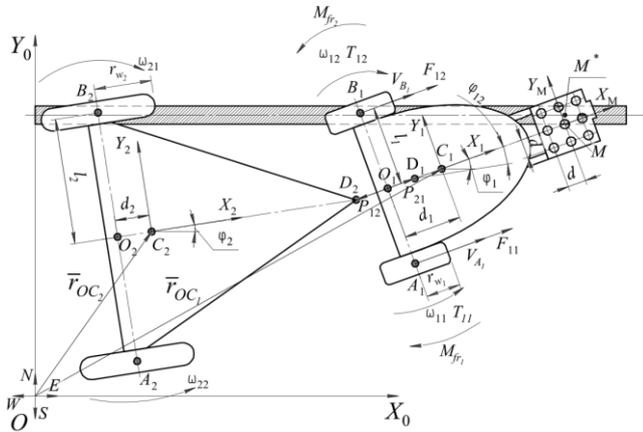


Рис. 3. Схема совместного движения подсистем РМБ и ВС

Сила, возникающая при взаимодействии РМБ и ВС, действует со стороны ВС на РМБ и обозначена \bar{P}_{21} , а со стороны РМБ на ВС, соответственно, \bar{P}_{12} . Очевидно, что модули этих сил равны $P_{21}=P_{12}$.

Будем считать, что при взаимодействии подсистем РМБ и ВС возникает сила, модуль которой будем определять по формуле:

$$P_{21} = C \cdot \sqrt{(D_{1X} - D_{2X})^2 + (D_{1Y} - D_{2Y})^2}. \quad (1)$$

Где D_{1X}, D_{1Y} - координаты точки D_1 , принадлежащей РМБ; D_{2X}, D_{2Y} - координаты точки D_2 , принадлежащей ВС. Параметр C определяется физико-механическими свойствами модуля сопряжения и переднего колеса ВС.

Направление вектора \bar{P}_{21} определяется углом α , величину которого найдем по формуле:

$$\tan \alpha = D_{1Y} - D_{2Y} / D_{1X} - D_{2X}. \quad (2)$$

Будем считать, что сила взаимодействия между подсистемами ВС и РМБ \bar{P}_{21} относится к внешним возмущениям по отношению к РМБ. Кроме этого на РМБ действуют различные факторы, приводящие к появлению дополнительных возмущающих сил. Для оценки и учета этих воздействий предлагается ввести функцию $\bar{W} = \bar{P}_{21} + \bar{W}_B$.

Систему дифференциальных уравнений описывающих движение РМБ с учетом и внешних возмущений \bar{W} представим в форме:

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{\Omega}_1 \\ \frac{d\varphi_1}{dt} \\ \frac{d\varphi_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 & m_1 a \Omega_1 & \frac{nc}{r} & \frac{nc}{r} \\ m_1 a \Omega_1 & -\mu_2 & \frac{ncl}{r} & -\frac{ncl}{r} \\ -\frac{nc}{r} & \frac{ncl}{r} & -R & 0 \\ -\frac{nc}{r} & \frac{ncl}{r} & 0 & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{f1} + M_{f2} \\ M_{f1} - M_{f2} \\ J \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W \\ M_c(W) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

где: $m = m_1 + 2m_k + 2 \frac{J_y}{r^2}$, $J = J_1 + (m_1 + 2m_k)a^2 + 2 \frac{J_y}{r^2} l^2$, U_1, U_2

- управляющие напряжения.

В векторной форме уравнение (11) представим в виде:

$$\dot{\bar{X}}_1 = \Phi_1(\bar{X}_1) + B_1 \bar{U}_1 + \bar{W}_1; \bar{X}_1 = (V_1, \Omega_1, \varphi_1, \varphi_2)^T. \quad (4)$$

Аналогично, запишем уравнение движения для ВС:

$$\dot{\bar{X}}_2 = \Phi_2(\bar{X}_2) + B_2 \cdot 0 + \bar{W}_2; \bar{X}_2 = (V_1, \Omega_1, 0, 0)^T. \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений (4) и (5) позволяет изучать управляемое движение РБАС по заданной траектории с учетом взаимодействия подсистем РМБ и ВС и внешних возмущений \bar{W}_1 и \bar{W}_2 .

V. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РБАС

Эталонный закон движения разработан на основе метода планирования допустимых траекторий движения [9-11]. Зависимость координаты от времени

представлена в виде: $x(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i$; значения скорости

вычисляются из: $\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i t^{i-1}$ и

ускорения $\ddot{x}(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i(i-1)t^{i-2}$. Постоянные a_i

определяются из граничных условий: $t=0$; $x(0)=x_0$; $\dot{x}(0) = 0$; $\ddot{x}(0) = 0$ и, при $t=T$; $x(T)=x_k$; $\dot{x}(T) = 0$; $\ddot{x}(T) = 0$.

Аналогично задаются эталонные угловая координата Φ_1 , угловая скорость $\dot{\Phi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\Phi}_1$. Далее, разработана система управления РМБ. Структурная схема предлагаемой беспилотной адаптивной самонастраивающейся системы (БАСНС) управления движением РБАС представлена на рисунке 4. Основными элементами БАСНС являются блок планирования (БП), блок интервала (БИ), эталонная модель (ЭМ), регулятор, блок настройки (БН), адаптивный регулятор (АР), объект управления (ОУ), информационная система (ИС) РБАС.

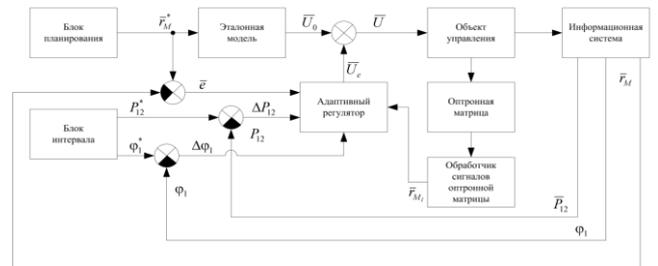


Рис. 4. Структурная схема адаптивной системы управления РБАС

Математическая эталонная модель, позволяет определить эталонное управляющее напряжение на основе дифференциальных уравнений динамики РМБ. Эталонная модель в составе БАСНС используется для задания эталона желаемого поведения, выбранного оператором на основе априорной информации о граничных условиях, выходных и входных воздействиях.

Архитектура системы управления выполнена на основе принципа суперпозиции управляющих

воздействий [12-15]:

$$\bar{U} = \bar{U}_0 + \bar{U}_e, \quad (6)$$

где \bar{U}_0 - управляющие воздействия, полученные по эталонной модели (15); \bar{U}_e - корректирующее управление, вычисляемое по отклонению реальной траектории от заданной. Эталонная модель представлена в виде:

$$\begin{cases} F_{11} + F_{12} = (m_1 + \frac{2 \cdot J_{W_1}}{r_{W_1}^2}) \cdot \ddot{x}(t) - m_{C_1} \cdot |O_1 C_1| \cdot \dot{\varphi}_1^2 + \mu_{v_0} \cdot \dot{x}(t) \\ F_{11} - F_{12} = \frac{(J_1 + \frac{|A_1 O_1|^2}{r_{W_1}^2} J_{W_1}) \cdot \ddot{\varphi}_1(t) + m_{C_1} \cdot |O_1 C_1| \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot \dot{x}(t) + \mu_{\varphi_0} \cdot \dot{\varphi}_1(t)}{|A_1 O_1|} \end{cases} \quad (7)$$

Определив из (15) F_{11} , F_{12} можно рассчитать желаемые законы изменения токов правого и левого приводов ведущих колес $i_1(t)$, $i_2(t)$.

$$i_1 = F_{11} r / n c_M; i_2 = F_{12} r / n c_M, \quad (8)$$

где n , c_M - передаточное отношение привода и постоянная момента электродвигателя. Далее, с учетом (16) определяются эталонные управляющие напряжения:

$$\bar{U}_0 = (U_1, U_2)^T. \quad (9)$$

Для корректировки внешних и параметрических возмущений вводятся корректирующие напряжения $\bar{U}_e = (u_1, u_2)^T$, которые определяются по формуле:

$$\bar{U}_e = k \bar{e} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \cdot \bar{e}. \quad (10)$$

Параметры матрицы регулятора k в номинальном режиме определяются методом линейно квадратичной оптимизации по критерию:

$$K = \int_0^T (\bar{e} Q \bar{e}^T + \bar{U}_e R \bar{U}_e^T) dt. \quad (11)$$

Здесь Q , R - положительно определенные матрицы коэффициентов размерностью 2x2. Если диапазон изменений выходных переменных значителен и происходит нарушение ограничений: $P_{121} < P_{12} < P_{122}$, $\varphi_{11} < \varphi_1 < \varphi_{12}$, то регулятор корректирующего контура подстраивается так, чтобы поведение реальной системы минимально отличалось от модели (прямая адаптация).

Алгоритм работы системы управления роботизированного буксировщика представлен на рисунке 5 [16,17].

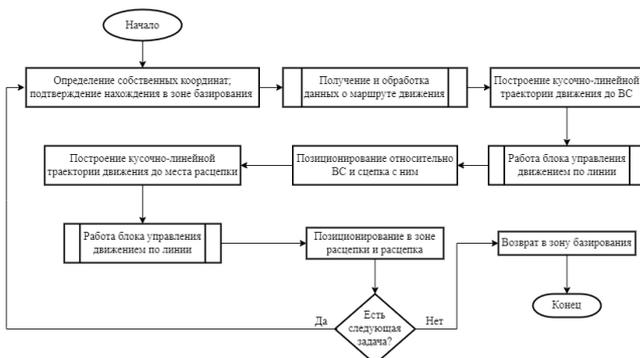


Рис. 5. Алгоритм работы системы управления роботизированного буксировщика

Исходя из выбранной стратегии управления РБАС выделим три основных режима управления: режим программного управления по эталонной модели; режим траекторного управления по отклонению от заданной траектории; режим комбинированного управления.

Сравнение этих стратегий проводится с использованием метода наименьших квадратов (МНК) оценки качества процесса управления с использованием среднеквадратичной ошибки:

$$K_1 = \frac{1}{T} \int_0^T e^T Q e dt, K_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{U}^T N \bar{U} dt. \quad (12, 13)$$

Оценить энергозатраты на управление движением РБАС позволяет критерий (13), где:

$\bar{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4)^T$ - управляющие напряжения, Q, N - положительно определенные матрицы.

Для контроля за положением РБАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется оптронная матрица (рис. 3) [18,19], которая позволяет оценивать отклонение реального положения РМБ от заданного с точностью, определяемой параметром d . Для ОМ с размером 3x3 выходные значения сигналов светодиодов датчиков формируют матрицу: $M = (C_{11}, C_{12}, C_{13}; C_{21}, C_{22}, C_{23}; C_{31}, C_{32}, C_{33})$.

Принято, что отраженным от контрастной линии сигналам, присваивается 0, в противном случае 1. Если выполнено условие $e < |d|$, то считается, что погрешность

отсутствует. Ориентация ОМ определяется углом φ_1 . На рисунке 3 представлено положение ОМ для случая движения внутри интервала $e < |d|$. В этом случае, матрица выходных сигналов светодиодов (МВСС) имеет вид - $M = (101; 101; 101)$. Если РМБ отклонился от контрастной линии, то МВСС представим в виде: $M = (111; 110; 100)$ (рис. 6), и происходит управление движением за счет корректирующих напряжений (10).

Оценка интервала ошибки по показаниям элементов оптронной матрицы происходит исходя из геометрических условий: если: $C_{22} = 0$, то $|\bar{e}| \in [0; 0.5 \cdot d]$;

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

если: $C_{22} \neq 0$ и $(C_{11} = 0$ или $C_{13} = 0$ или $C_{31} = 0$ или $C_{33} = 0)$, то $|\bar{e}| \in [0.5 \cdot d; 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}]$.

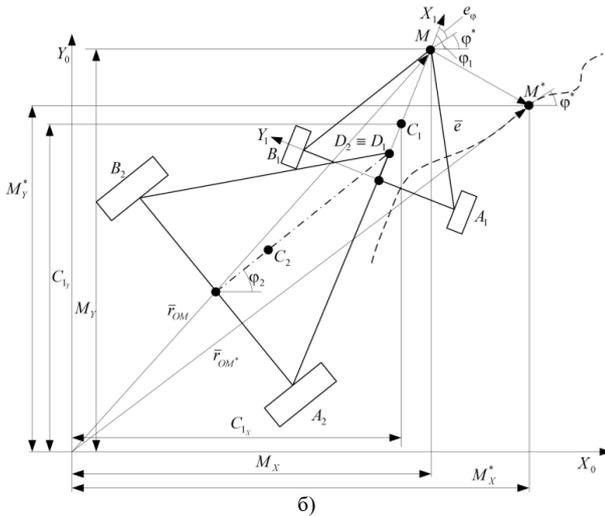
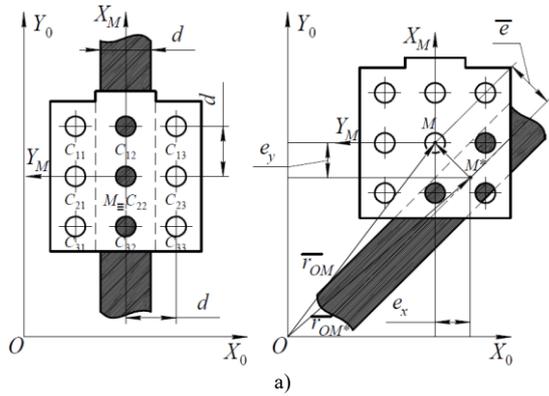


Рис. 6. Схемы а) положения ОМ над КЛ; б) отклонения ВС и РМБ от заданной КЛ

Переход в режим корректирующего движения происходит когда выполняется следующие условия: Если $M \neq (101, 101, 101)$ или $|\vec{e}| \rightarrow 0.5 \cdot d + d \cdot \sqrt{2}$. Если $C_{12}=0$ и $C_{22}=0$ и $C_{32}=0$, то корректировка положения не требуется.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основании вышеизложенного были проведены исследования разработанного алгоритма управления РБАС. Движение происходило из начальной точки ($t = 0$ с) в конечную при ($t = 30$ с) по прямолинейному отрезку траектории при действии прямоугольного возмущающего импульса (рис.7). Действие возмущающего импульса начинается при $t_1=15$ с, а время действия импульса 0.5 с. Желаемая траектория движения по осям OX_0 и OY_0 показана на рисунке 8, также на нём приведены реальные законы движения по оси OX_0 и OY_0 отклонение реальных координат от заданных e_x, e_y . Сравнивая максимальные значения ошибок e_x, e_y , при различных стратегиях управления можно сделать вывод, что корректирующее управление обеспечивает максимальные отклонения e_x, e_y по оси OX_0 до 1 м и OY_0 до 0.25 м, а комбинированное управление позволяет уменьшить максимальные отклонения e_x, e_y по оси OX_0 до 0.25 м и OY_0 до 0.2 м и тем самым значительно повысить точность движения РБАС по заданной траектории. На рисунке 9 представлены

графики изменения управляющих сил, полученных методом декомпозиции управляющих воздействий при комбинированном управлении.

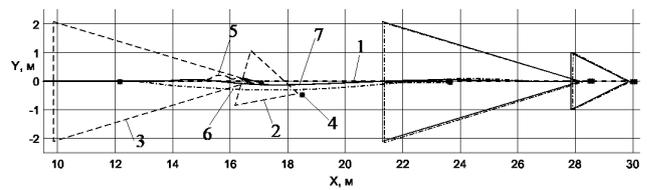


Рис. 7. Кадр из анимации движения РБАС по заданной траектории при различных типах управления: 1 – желаемая траектория движения; 2 – РМБ; 3 – ВС; 4 – точка М; 5 – траектория движения точки О при эталонном управлении; 6 – траектория движения точки О при корректируемом управлении; 7 – траектория движения точки О при комбинированном управлении

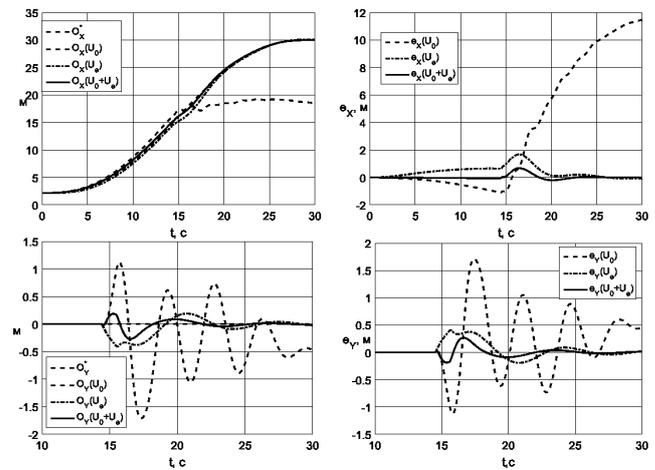


Рис. 8. Графики изменения: желаемых и реальных законов движения по осям OX_0 и OY_0 ; отклонение реальных координат от заданных e_x, e_y , при: эталонном (пунктир); корректирующем (пунктир точка) и комбинированном (сплошная) управлении

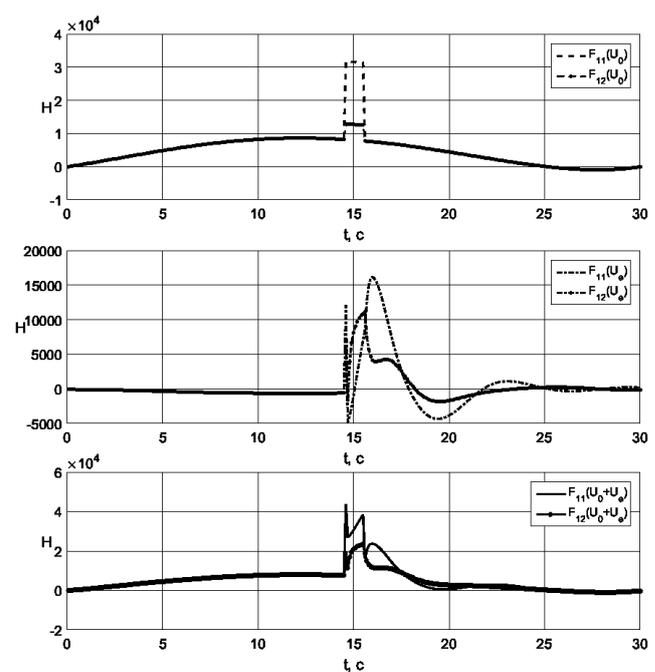


Рис. 9. Графики изменения управляющих сил колёс РМБ при комбинированном типе управления

С помощью корректирующего управления РБАС

может передвигаться по сложным траекториям. Результаты подобного движения представлены на рисунках 10 -11.

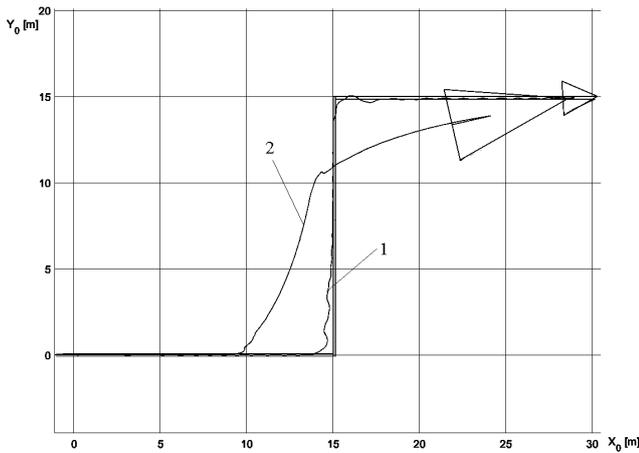


Рис. 10. Кадр из анимации совместного движения системы: 1 – траектория движения центра масс РМБ, 2 – траектория движения центра масс ВС

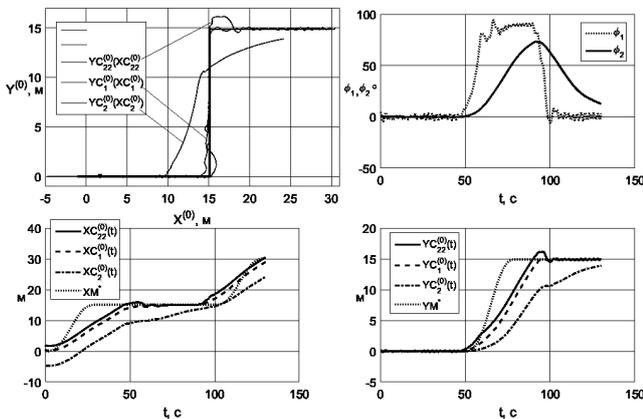


Рис. 11. Кинематические характеристики движения системы

Из данных сравнительной таблицы 1 видно, что наилучшее качество управления обеспечивается при комбинированной стратегии управления.

Сравнительная таблица стратегий управлений

Таблица 1

Критерий \ Тип управления	Эталонная модель $\vec{v} = \vec{v}_0$	Корректирующее управление $\vec{v} = \vec{v}_s$	Комбинированное управление $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_s$
Среднеквадратичная ошибка K_1	723.9	378.8	12.67
Среднеквадратичные энергозатраты K_2	$1.749 \cdot 10^9$	$2.413 \cdot 10^9$	$1.885 \cdot 10^9$

VII. КОНТРОЛЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ДОРОЖЕЙ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ РЕАКЦИЕЙ

При буксировке ВС важным является постоянство сцепления ведущих колёс РМБ с поверхностью, проверка сцепных свойств колёс проверяется выполнением условия $\omega_w \cdot r_w = \dot{X}_w$. Добиться выполнения этого условия предлагается с помощью управления нормальной реакцией ведущих колёс РМБ.

Предлагаемый метод основан на переносе части нормальной реакции с ВС на РМБ путём подъёма носового колеса ВС специального механизма (рис. 12).

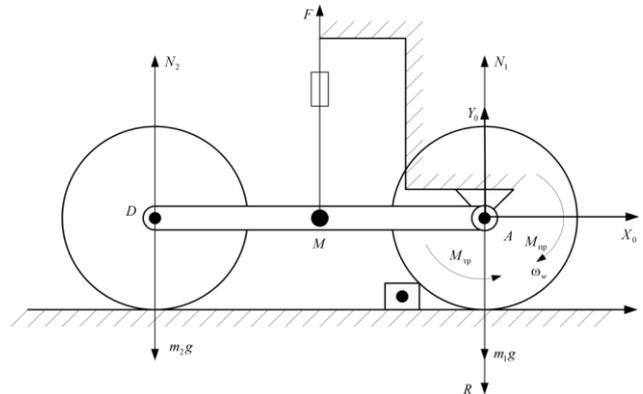


Рис. 12. Расчётная схема модели системы с управляемой нормальной реакцией

В случае отсутствия проскальзывания $\omega_w \cdot r_w = \dot{X}_w$, т.е. $F_{цл} < F_{цл}^{max}$ дифференциальные уравнения движения имеют вид:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{X}_w = F_{цл} - F_{соп} \\ J_w \cdot \dot{\omega}_w = M_{пр} - F_{цл} \cdot r_w - N_1 \cdot \delta \end{cases} \quad (14)$$

В упрощённом виде сила сцепления описывается уравнением:

$$F_{цл} = N_1 \cdot \mu(\lambda) = N_1 \cdot \mu \left(\frac{\omega_w \cdot r_w - \dot{X}_w}{|\omega_w| \cdot r_w} \right), \quad (15)$$

где: λ - коэффициент скольжения колеса.

Коэффициент сцепления зависит от скольжения колеса, а также характеристик дорожного полотна и описывается «магической формулой»:

$$\mu = D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot \lambda) - E \cdot (B \cdot \lambda - \arctan(B \cdot \lambda))) \quad (16)$$

В случае наличия проскальзывания $\omega_w \cdot r_w \neq \dot{X}_w$ т.е.

$F_{цл} \geq F_{цл}^{max}$ движение описывается уравнениями:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{X}_w = M_{пр} \cdot r_w - F_{пр} \\ J_w \cdot \dot{\omega}_w = M_{пр} - M_{тр} \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, сила сцепления $F_{цл}$ зависит от нормальной реакции N_1 , характеристик колеса и дорожного полотна $\mu(\lambda)$, а также значения управляющего момента $M_{пр}$. Поскольку система управления не способна изменить качество дорожного полотна и характеристики покрышки, то доступными инструментами воздействия остаются крутящий момент и нормальная реакция колеса.

На рисунке 13 представлена структурная схема САУ, компенсирующей пробуксовку ведущих колёс РМБ с помощью изменения нормальных реакций ВС и РМБ путём подъёма колеса ВС вспомогательным приводом.

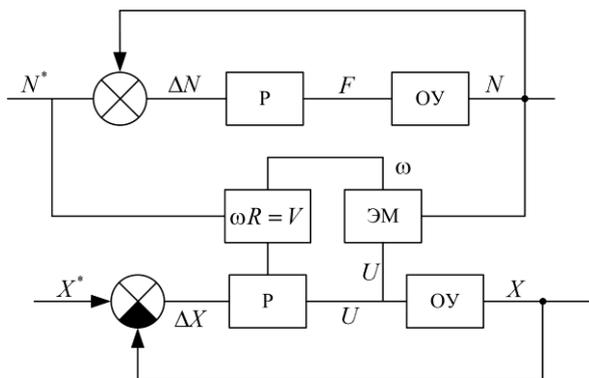


Рис. 13. Структурная схема САУ, компенсирующей пробуксовку колёс РМБ

Если $\omega_{11} \cdot r_{w1} \neq V_{A1} \vee \omega_{12} \neq V_{B1} \cdot r_{w1}$, то захватное устройство, с помощью генерируемой вспомогательным приводом силы F , приподнимает колесо ВС, тем самым перенося часть нормальной реакции с ВС на ведущие колёса РМБ, улучшая таким образом их сцепные свойства.

Распределение нормальных реакций в таком случае описывается исходя из следующим уравнениями:

$$N_1 = (m_1 \cdot g) + \frac{F \cdot |AM|}{|AD|}; N_2 = (m_2 \cdot g) - \frac{F \cdot |AM|}{|AD|}, \quad (18,19)$$

где: $F = f(N_1^* = N_1 + \delta N)$.

Основываясь на изложенном выше было проведено математическое моделирование управляемого движения нагруженного колеса с изменяемой нормальной реакцией, результаты которого представлены на рисунках 14-16.

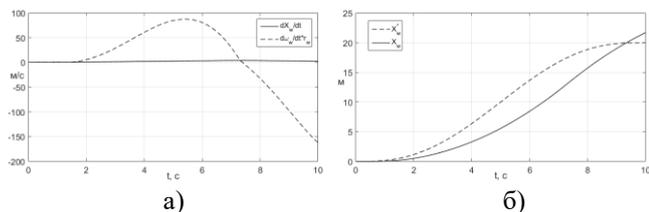


Рис. 14. Графики изменения: а)линейной и окружной скоростей колеса ; б) желаемого и действительного положения колеса

Как видно из рисунка 16, при буксировке ВС массой 14 тонн, для отработки заданной траектории регулятором был рассчитан крутящий момент превышающий сцепные свойства, что привело к скольжению и ошибке позиционирования. Применение инструмента управлением нормальной реакцией позволило существенно уменьшить пробуксовку колеса и повысить точность движения (рис. 16)

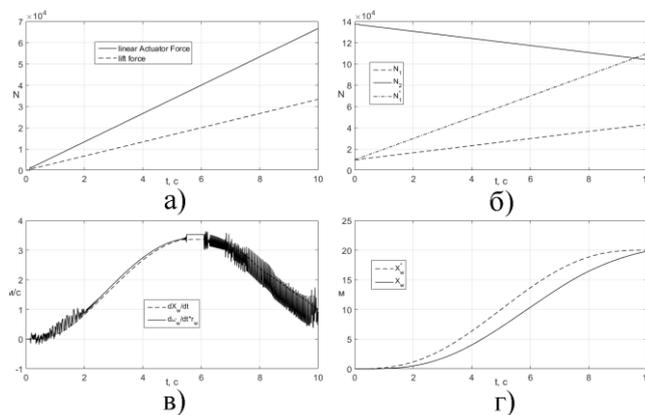


Рис. 15. Графики изменения: а) силы вспомогательного привода; б) нормальных реакций ВС и РМБ; в) линейной и окружной скоростей колеса ; г) желаемого и действительного положения колеса

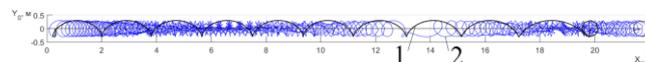


Рис. 16. Графики движения колеса: без контроля проскальзывания(красный) с контролем проскальзывания (синий)

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена структурная схема и система управления роботизированным колесным роботом для эффективной буксировки воздушных судов по аэродрому. Предлагаемый способ движения, обеспечивается комбинированием генерируемых управляющих напряжений, зависящих от эталонной модели движения и сигналов оптронной матрицы.

Для выявления качественных показателей эффективности буксировки была разработана математическая модель устройства, позволяющая оценить качество процесса управления, потребление энергии, а также значения крутящих моментов на колесах, влияющих на динамику движения буксировочной системы. Результаты моделирования работы системы противодействия скольжению подтвердили работоспособность предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Salmerón Rodríguez J. Use of robotic systems on airport management optimization: дис. – Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
 [2] Казанцева П. И., Шевцова Н. В. Современные проблемы гражданской авиации России. Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2017, Т. 3, №. 13, с. 458-459.
 [3] 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, с. 525-532.
 [4] Baaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, AIAA Aviation, 2019, Forum. 2019, с. 2932.
 [5] Великанов А. В., Дьяков Д. Е., Великанова Л. А., Дьякова Н. А. Роботизированная система для наземного транспортирования воздушных судов. Научный вестник ГосНИИ ГА, 2021, №37, с. 42-52.
 [6] Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun, S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft. In "Frontiers in Robotics and Electromechanics", 2022, Springer, (pp. 327-339).
 [7] Яцун С. Ф., Баргенов В. В., Политов Е. Н., Афонин Д. В. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому. Известия Юго-Западного государственного университета, 2018, №22(2), с. 34-43.
 [8] 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, Т. 17, с. 465-473.

- [9] Sirigu G., Cassaro M., Battipede M., Gili, P. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs. WSEAS Transactions on Electronics, 2017, 8, с.27-40.
- [10] Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments //Robotics research. – Springer, Cham, 2016. – С. 649-666.
- [11] 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. – Т. 139. – С. 284-293.
- [12] Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot. In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” ER (ZR) 2019, 2020, Kursk, Russia, 17-20 April 2019 (pp. 397-409). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_32
- [13] Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control. Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS, 2017, 15(3), с.222-227.
- [14] 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, 33(2), с.410-423.
- [15] 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), 17.
- [16] Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 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. – Т. 19. – №. 2. – С. 1089-1102.
- [18] Бартенев В. В. Динамика управляемого движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами : дис. – Юго-Западный государственный университет, 2010.
- [19] 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 (ICIT). – IEEE, 2016. – С. 480-483.

Сотрудник военного учебно-научного центра военно-воздушных сил Воронежской Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. В 2021 году окончил аспирантуру Юго – Западного государственного университета по специальности «Роботы. Мехатроника и робототехнические системы». Является автором более 20 научных публикаций и 2 патентов на изобретения. Область научных интересов – математическое моделирование, системы управления автономными роботами, роботизированные буксировщики воздушных судов.

Печурин Александр Сергеевич

Аспирант, инженер кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета. В 2020 году окончил Юго – Западный государственный университет по специальности «Мехатроника и робототехника». В 2022 году защитил диплом магистра по специальности «Мехатроника и робототехника». Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов – математическое моделирование, мобильные роботы. orcid.org/0000-0002-1615-7817

Яцун Сергей Федорович

Профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники Юго-западного государственного университета, Заслуженный деятель науки Российской Федерации. В 1975 году окончил Днепропетровский горный институт по специальности "Горные машины и комплексы". В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций и 200 патентов на изобретения. Область научных интересов - вибрационные машины и технологии, динамика и прочность машин, теория автоматического управления, мехатроника, робототехника. orcid.org/0000-0002-7420-0772

Motion control of a robotic two-link wheel system along a given trajectory

D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun

Abstract- The paper considers an approach to building a combined positioning control system for a robotic aircraft towing system, which is based on the superposition of reference and corrective control actions. The reference control actions are found by calculating the torques of the driving wheels of the robotic mobile tugger from its dynamic motion model, in which the required motion characteristics of the system are embedded. The corrective control actions are generated after processing the signals from the optronic matrix when moving along the contrasting line. The structural diagrams of the device of robotic tugboat, control system, the computational scheme of robotic tugboat, the mathematical model of the two-link body-wheeled system motion are proposed. The mathematical modeling of the system's motion along the given trajectory for different control modes is performed, which allowed to make a comparative evaluation of the quality of towing in each of the control modes according to the developed integral criterion. A method of counteracting the slip of the leading wheels of the towing vehicle when moving together according to a given law, based on the transfer of part of the normal reaction, is proposed and described. The accompanying diagrams are given, the principle of control system operation is described, mathematical modeling is carried out and its results are presented.

Key words - airfield tug, airfield tug control system, combined control, mathematical modeling, normal response control.

REFERENCES

- [1] Salmerón Rodríguez J. Use of robotic systems on airport management optimization: дис. – Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
- [2] Kazantseva P. I., Shevtsova N. V. Modern problems of civil aviation of Russia. Actual problems of aviation and cosmonautics, 2017, Vol. 3, No. 13, c. 458-459.
- [3] 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, c. 525-532.
- [4] Baaren E., Roling P. C. Design of a zero emission aircraft towing system, AIAA Aviation, 2019, Forum. 2019, c. 2932.
- [5] Velikanov A. V., Dyakov D. E., Velikanova L. A., Dyakova N. A. Robotic system for ground transportation of aircraft. Scientific Bulletin of GosNII GA, 2021, № 37, p. 42-52.
- [6] Afonin D. V., Pechurin A. S., Yatsun, S. F. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft. In "Frontiers in Robotics and Electromechanics", 2022, Springer, (pp. 327-339).
- [7] Yatsun S. F., Bartenev V. V., Politov E. N., Afonin D. V. Modeling of robot-tractor motion for airplane transportation on the airfield. Proceedings of Southwestern State University, 2018, No. 22(2), pp. 34-43.
- [8] 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, T. 17, c. 465-473.
- [9] Sirigu G., Cassaro M., Battipede M., Gili, P. A route selection problem applied to auto-piloted aircraft tugs. WSEAS Transactions on Electronics, 2017, 8, c.27-40.
- [10] Richter C., Bry A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments //Robotics research. – Springer, Cham, 2016. – C. 649-666.
- [11] 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. – C. 284-293.
- [12] Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot. In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER (ZR) 2019, 2020, Kursk, Russia, 17-20 April 2019 (pp. 397-409). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_32
- [13] Simon J. Autonomous wheeled mobile robot control. Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS, 2017, 15(3), c.222-227.
- [14] 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, 33(2), c.410-423.
- [15] 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), 17.
- [16] Iwendi C. et al. Robust navigational control of a two-wheeled self-balancing robot in a sensed environment //IEEE Access. – 2019. – T. 7. – C. 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. – C. 1089-1102.
- [18] Bartenev V. V. Dynamics of controlled motion of a mobile robot with two independent driving wheels : Ph. - Southwestern State University, 2010.
- [19] 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 (ICCI). – IEEE, 2016. – C. 480-483.