

42. Syropoulos A. Theory of Fuzzy Computation. Springer, 2014, 170 p.
43. Mendel J. et al. Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications – Wiley, 2014, 376 p.
44. Bede B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Springer, 2013, 400 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Е.И. Минаков.

Бархоткин Вячеслав Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ». Научно-исследовательский институт вычислительных средств и систем управления; e-mail: bva@miee.ru; 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, 5; тел.: 84997312279; д.т.н.; профессор; директор.

Петров Владимир Федорович – e-mail: pv7315@yandex.ru; тел.: +79161445379; к.т.н.; заместитель директора.

Кочетков Михаил Петрович – e-mail: kmp@miee.ru; тел.: 84997208770; кафедра «Вычислительная техника»; к.т.н.; доцент.

Barhotkin Vyacheslav Aleksandrovich – National Research University of Electronic Technology. Research Institute of Computing means and Control Systems; e-mail: bva@miee.ru; bld. 5, pas. 4806, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia; phone: 84997312279; dr. of eng. sc.; professor; director.

Petrov Vladimir Fedorovich – e-mail: pv7315@yandex.ru; phone: +79161445379; cand. of eng. sc.; deputy director.

Kochetkov Mikhail Petrovich – e-mail: kmp@miee.ru; phone: 84997208770; chair “Computer Engineering”; e-mail: kmp@miee.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.513.66

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.А. Крухмалев

ПОЗИЦИОННО-ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ С ТОЧЕЧНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ*

Исследуется позиционно-траекторная система управления с неустойчивыми режимами при решении задачи обхода препятствий в неопределенной трехмерной среде. Во введении представлен обзор систем управления на базе позиционно-траекторного закона управления, в том числе с обходом препятствий. Математическая модель подвижного объекта представлена уравнениями кинематики и динамики абсолютно твердого тела. Рассматривается трехмерное движение объекта вдоль траекторий, состоящих из прямых линий. Синтезируется базовый позиционно-траекторный регулятор, обеспечивающий движение вдоль прямолинейной траектории с постоянной скоростью. Обход препятствия осуществляется посредством введения неустойчивого режима в некоторой окрестности препятствия. Представлена структура системы позиционно-траекторного управления с неустойчивыми режимами. Неустойчивость вводится через зависимость параметров эталонного уравнения от расстояния до препятствия. При этом косвенно учитываются ограничения на углы рысканья и тангажа подвижного объекта. Приводятся результаты численного моделирования системы управления подвижного объекта в среде с неподвижными препятствиями с использованием неустойчивых режимов. Проводится исследование способов организации неустойчивого движения при приближении к препятствию. Рассмотрены варианты действительных одинаковых и кратных корней, а также комплексных корней. Проведено исследование влияния погрешностей на систему управ-

* Работа поддержана грантом Российского научного фонда (грант 14-19-01533), выполняемым ЮФУ.

ления. Оценка эффективности производится по минимальному расстоянию до препятствия и длине пройденного пути. Даются рекомендации по выбору корней эталонного уравнения замкнутой системы позиционно-траекторного управления с неустойчивыми режимами движения. Также в линейном случае дается оценка расстояния до препятствия, определяющего момент включения неустойчивого режима.

Позиционно-траекторное управление; неустойчивые режимы; обход препятствий; трехмерное движение.

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.A. Krukhmalev

POSITION-TRAJECTORY CONTROL OF VEHICLE IN 3D WITH POINT OBSTACLES

Research of the trajectory of the position-trajectory control system with unstable regimes for obstacle avoidance in an uncertain three-dimensional environment is conducted in this paper. Introduction provides with an overview of control systems based on position-trajectory control law, including obstacle avoidance. A mathematical model of the vehicle is represented by the equations of kinematics and dynamics of rigid bodies. 3d motion of the vehicle motion along the line-wise trajectory is considered. Synthesis of basic position-control controller, providing motion along a straight trajectory at a constant speed is described. Obstacle avoidance is performed by introducing an unstable regime near obstacles. The structure of the system of position-trajectory control system with unstable regimes is presented. Instability is introduced through the dependence of the parameters of the referent equation of the distance to the obstacle. Constraints for yaw and pitch angles of the vehicle are considered indirectly. Simulation results for vehicle control system for stationary obstacles with unstable regimes are presented. A study for ways of implementation of unstable motion near an obstacle is conducted. The options of the equal real and multiple roots and complex roots are considered. The influence of errors on the control system is described. Feasibility estimation is made by the minimum distance to the obstacle and the length of the distance traveled. Recommendations on the choice of the roots of the equation of the closed system of the reference position-trajectory control with unstable motion modes. Also, in the linear case, assessment of the distance to the obstacle, which determines the moment when an unstable regime switching on is provided.

Position-trajectory control; unstable motion; obstacle avoidance; 3-dimentional motion.

Введение. Сегодня одной из ключевых проблем развития мобильных робототехнических комплексов является обеспечение их автономного функционирования в средах с препятствиями. В работах [1–3] предложен метод обхода препятствий, использующий неустойчивые режимы движения. Данный подход, базирующийся на методе позиционно-траекторного управления подвижными объектами [3–5], обеспечивает формирование в области препятствий репеллеров, которые трансформируют траекторию движения. В работах [1, 2] дается решение задачи обхода точечного препятствия подвижным объектом на плоскости. В [3] представлен теоретический анализ позиционно-траекторных систем с неустойчивыми режимами. В [6] рассмотрены алгоритмы обхода на плоскости препятствий сложной формы. Показано, что для некоторых видов препятствий, позиционно-траекторный регулятор с неустойчивыми режимами может попадать в локальные минимумы функции ошибки. Для решения указанной проблемы предложено ряд модификаций алгоритма управления, которые позволяют подвижному объекту перемещаться на плоской среде со сложными препятствиями, не используя картографирования местности. В частности предложена процедура агрегирования близко расположенных препятствий, разработан алгоритм виртуальной целевой точки и рассмотрены способы выхода из локальных минимумов с привлечением аппарата нечеткой логики.

В работе [7] проведен анализ различных методов планирования траекторий на плоскости. По результатам анализа 16 методов отмечена высокая эффективность использования метода позиционно-траекторного управления с неустойчивыми режимами для обхода препятствий.

Позиционно-траекторный алгоритм управления с неустойчивыми режимами для трехмерного пространства. Общая процедура синтеза позиционно-траекторного регулятора с неустойчивыми режимами для трехмерного пространства представлена в [3]. Однако, при применении указанной процедуры для различных подвижных объектов требуется учитывать ряд ограничений, накладываемых на режимы их движения. К ним, в частности, относятся ограничения по углу тангажа, связанные с максимально допустимыми скоростями изменения высоты.

Рассмотрим модель подвижного объекта (ПО) на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [3, 8, 9]

$$\begin{aligned}\dot{y} &= R(y)x, \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d),\end{aligned}\quad (1)$$

где $y = [r_0 \quad \Theta]^T$ – вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат; $x = [V \quad \omega]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат;

$$R(y) = \begin{bmatrix} A & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A_\omega \end{bmatrix},$$

A, A_ω – матрицы кинематики; M – матрица инерционных параметров; F_u – вектор управляющих сил и моментов; F_d – вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект.

В данной работе рассматривается движение ПО, задаваемого линейными формами внешних координат

$$\Psi_{TP} = A_1 r_0 + A_2 \Theta + A_3, \quad (2)$$

$$\Psi_{CK} = A_4 V + A_5, \quad (3)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} -\psi^0 \\ -k_y y^0 \\ \gamma^0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_5 = \begin{bmatrix} -V_x^0 \\ -V_y^0 \\ V_z^0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\psi^0 = \begin{cases} \arctan(k) - \frac{\pi}{2L} |ky_1 - y_3|, & \forall |ky_1 - y_3| \leq L, \\ \arctan(k) - \frac{\pi}{2L}, & \forall |ky_1 - y_3| > L, \end{cases} \quad (6)$$

где y^0, γ^0 и V_x^0, V_y^0, V_z^0 – постоянные числа; k – коэффициент, описывающий прямолинейную траекторию в горизонтальной плоскости; L – параметр регулятора, определяющий угол рысканья (если расстояние до заданной траектории больше этой величины, то ПО двигается к ней по кратчайшему пути); k_y – коэффициент, связывающих угол тангажа и ошибку по высоте.

Требования к переходным процессам при движении ПО к желаемому состоянию, описываемому выражениями (2), (3), задаются уравнениями [1–4]:

$$\ddot{\Psi}_{TP} + T_1 \dot{\Psi}_{TP} + T_2 \Psi_{TP} = 0, \quad (7)$$

$$\dot{\Psi}_{CK} + T_3 \Psi_{CK} = 0. \quad (8)$$

Алгоритм управления, синтезированный по уравнениям (1)–(8) в соответствии с методом позиционно-траекторного управления [3–5, 10], имеет вид

$$F_u = -F_d - \hat{F}_v - M \begin{bmatrix} A_4 & 0_{3 \times 3} \\ A_1 A & A_2 A_\omega \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_3 \Psi_{CK} \\ A_1 \dot{A}V + A_2 \dot{A}_\omega \omega + T_2 \Psi_{TP} + T_1 (A_1 AV + A_2 A_\omega \omega) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где \hat{F}_v – вектор оценок возмущений, вычисляемый в соответствии с [11, 12].

Структура системы позиционно-траекторного управления представлена на рис. 1. Пояснения процесса обхода препятствия с использованием неустойчивых режимов даны на рис. 2.

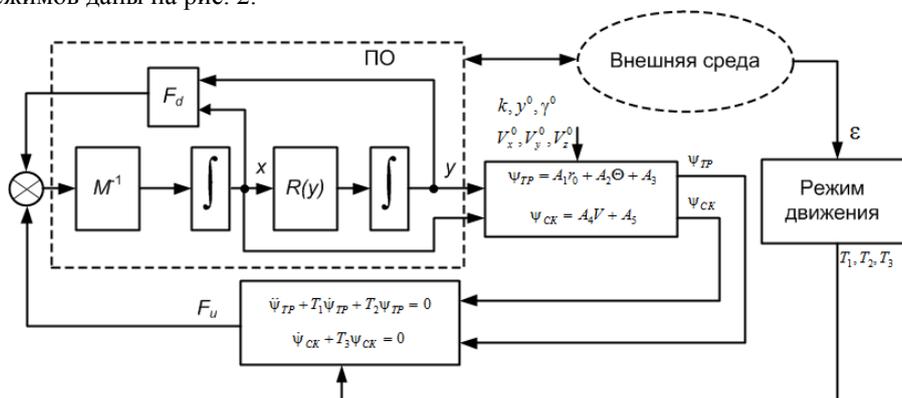


Рис. 1. Структура системы позиционно-траекторного управления с неустойчивыми режимами

Структура, представленная на рис. 1, отличается блоком, определяющим режим движения, который в зависимости от расстояния до препятствия, формирует коэффициенты T_1, T_2, T_3 .

Алгоритмы определения матриц T_1, T_2, T_3 , обеспечивающие переход системы управления (1)–(9) в неустойчивый режим при приближении к препятствию, имеют вид:

$$T_1 = \begin{bmatrix} a_{01} (1 - r_1^2 / \varepsilon^2) & 0 & 0 \\ 0 & a_{01} (1 - r_1^2 / \varepsilon^2) & 0 \\ 0 & 0 & a_{01} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0.25 T_1(1,1)^2 \text{sign}(T_1(1,1)) & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 T_1(2,2)^2 \text{sign}(T_1(2,2)) & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 T_1(3,3)^2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} a_{03} & 0 & 0 \\ 0 & a_{03} & 0 \\ 0 & 0 & a_{03} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \sqrt{(y_1 - y_{1p})^2 + (y_2 - y_{2p})^2 + (y_3 - y_{3p})^2}, & \forall (|\vartheta| < \vartheta^{\max}) \wedge (|\psi - \psi^0| < \Delta\psi^{\max}), \\ A_\varepsilon r_1 \end{cases}, \tag{13}$$

где a_{01}, a_{03} – постоянные числа, определяющие корни характеристического уравнения системы (7), (8) вдали от препятствия; ε – текущее расстояние до точечного препятствия; r_1 – расстояние, определяющее переход в неустойчивый режим движения; y_{1p}, y_{2p}, y_{3p} – координаты точечного препятствия; $\vartheta^{\max}, \Delta\psi^{\max}$ – углы тангажа и рысканья, при которых осуществляется переход в устойчивый режим; A_ε – достаточно большое постоянное число, обеспечивающее выход из неустойчивого режима движения.

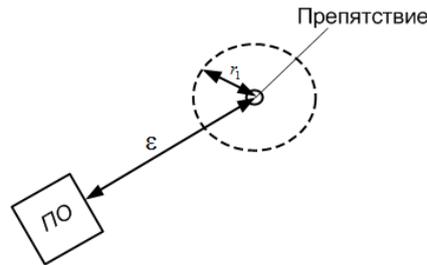
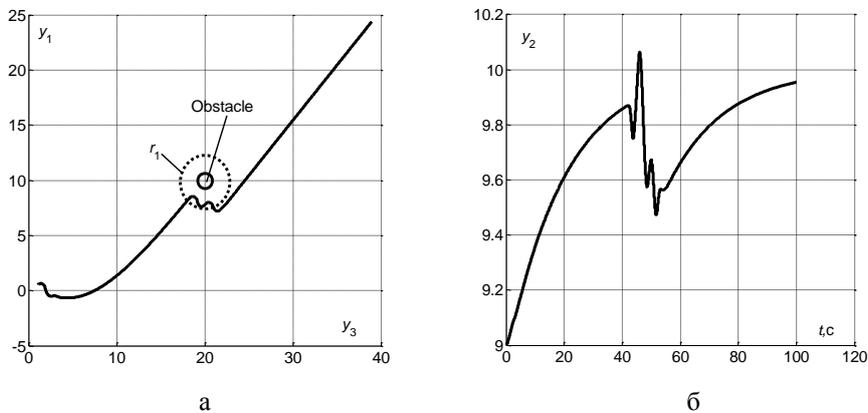


Рис. 2. Формирование области неустойчивого движения

Матрица T_2 выбрана таким образом, чтобы корни характеристического уравнения (7) были кратными и действительными. Так как неустойчивые режимы приводят к плохой обусловленности алгоритмов управления, значения матрицы $T_1 > -10$ ограничиваются снизу. Выражения (10)–(13) обеспечивают переход в неустойчивый режим движения при условии $\varepsilon < r_1$. При этом косвенно, через условие (13), учтены ограничения на угол тангажа и величину отклонения угла рысканья от желаемого значения.

На рис. 3 представлены результаты моделирования уравнений (1)–(13).



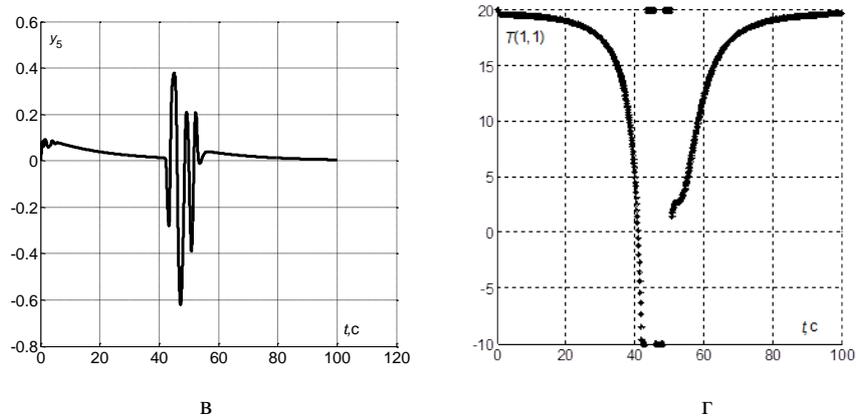


Рис. 3. Результаты моделирования: а – траектория в горизонтальной плоскости; б – высота y_2 ; в – угол тангажа y_3 ; г – коэффициент $T_1(1,1)$

Моделирование проводилось при следующих параметрах и характеристиках системы управления:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & -\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + & \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma + \\ & + \sin \psi \sin \gamma & + \sin \psi \cos \gamma \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & \cos \psi \sin \gamma + & \cos \psi \cos \gamma - \\ & + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma & -\sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix},$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\operatorname{tg} \vartheta \cos \gamma & \operatorname{tg} \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix},$$

$$k = 1; a_{10} = 10; a_{30} = 10; k_y = 0.1; y^0 = 10; V_x^0 = 0.5; V_y^0 = 0; V_z^0 = 0;$$

$$L = 10; r_1 = 3; y_{1p} = 10; y_{2p} = 10; y_{3p} = 20; A_e = 30; \vartheta^{\max} = 0.1;$$

$$\Delta \psi^{\max} = 1; M = \operatorname{diag}(1, 1, 1, 10, 100, 100);$$

$$F_d = \begin{bmatrix} -0.5c_x \rho s V^T V & 0.5c_y \rho s V^T V & 0.5c_z \rho s V^T V & -y_T m g \sin \gamma & 0 & -y_T m g \sin \vartheta \end{bmatrix}^T;$$

$$\rho = 1.2; s = 2; c_x = 0.01; c_y = 0.05; c_z = 0.05; y_T = 0.5.$$

Базовый алгоритм управления синтезирован таким образом, что маневры осуществляются в горизонтальной плоскости, а высота при маневрах поддерживается постоянной. Такая настройка возможна при диагональных матрицах T_1, T_2, T_3 , обеспечивающих декомпозицию каналов управления отдельными переменными.

Как видно из рис. 3, ПО дважды входит в зону, определяемую параметром r_1 . В этой связи данный параметр выбирается больше некоторого расстояния, определяющего безопасный обход препятствия. В общем случае, параметр r_1 зависит от скорости и может быть оценен по выражению

$$r_1 > r_{ob} + \alpha V_{ПО}, \quad (14)$$

где r_{ob} – безопасное расстояние до препятствия; $V_{ПО}$ – скорость ПО; α – коэффициент, определяемый инерционностью подвижного объекта. Для линейных систем он может быть равным $\alpha = (3 \div 5)T$, где T – постоянная времени.

Отметим, что обход препятствия фактически осуществляется в горизонтальной плоскости, однако обеспечение неустойчивого режима по каналу тангажа позволяет уменьшить колебательные движения ПО. На рис. 4 для сравнения приведена траектория и коэффициент $T_1(1,1)$ при организации неустойчивого режима только по каналу управления рысканьем.

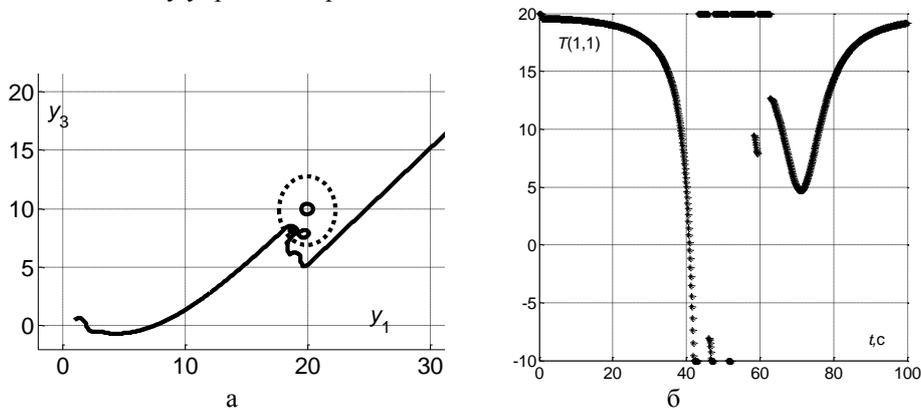


Рис. 4. Моделирование при неустойчивом режиме в канале рысканья:
а – траектория в горизонтальной плоскости; б – коэффициент $T_1(1,1)$.

На рис. 4 наблюдается переход системы управления в неустойчивый режим движения трижды.

Влияние типов бифуркации на систему управления. Представляет отдельный интерес анализ влияния различных типов бифуркаций на функционирование системы управления. В данном разделе исследуются способы обеспечения неустойчивых режимов в случае: а) два одинаковых действительных корня изменяются, принимая положительные значения; б) один из двух одинаковых действительных корня изменяется, принимая положительные значения; в) два комплексно сопряженных корня изменяются так, что их действительные части принимают положительные значения, а мнимые части остаются неизменными.

Чтобы проанализировать типы бифуркации, представим характеристическое уравнение системы (7) в виде

$$s^2 + T_1 s + T_2 = (s + s_1)(s + s_1) = s^2 + (s_1 + s_2)s + s_1 s_2, \quad (15)$$

Будем изменять корни уравнения (15) в соответствии с выражением

$$s_1 = s_2 = a_{01} (1 - r_1^2 / \varepsilon^2), \quad T_1 = s_1 + s_2, \quad T_2 = s_1 s_2. \quad (16)$$

Для оценки качества обхода препятствия введем два показателя [7, 13]:

– показатель безопасности ПБ S_m – это минимальное расстояние между подвижным объектом и препятствием вдоль всей траектории. Этот показатель определяет максимальный риск в течение всего движения

– длина траектории движения ДТ P_L – длина всей траектории, пройденной подвижным объектом от начальной точки до цели.

Интегральный показатель качества предлагается рассчитывать с помощью ниже приведенной формулы [7]:

$$K_I = k_S S_m^* + k_P P_L^*, \quad (17)$$

где k_S, k_P – весовые коэффициенты; S_m^*, P_L^* – нормированные значения введенных частных показателей качества.

Результаты моделирования систем управления рассматриваемого подвижного объекта с различными способами обеспечения неустойчивых режимов сведены в табл. 1 и на рис. 5–7.

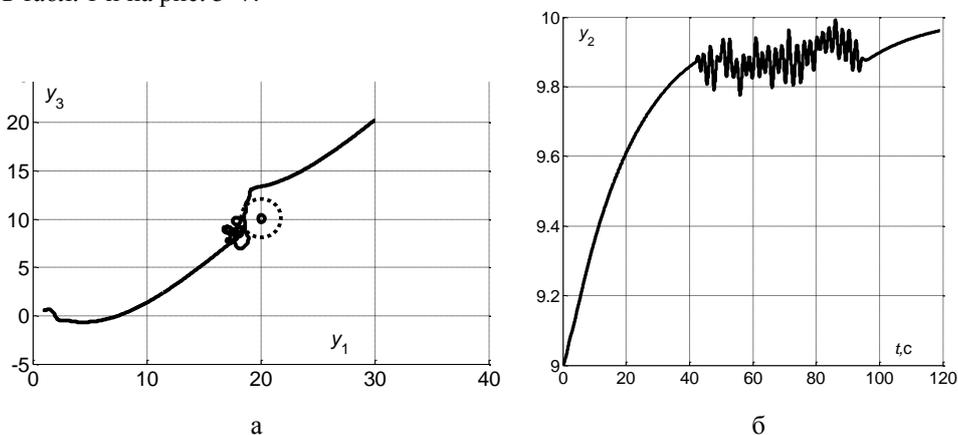


Рис. 5. Моделирование варианта с двумя действительными неустойчивыми корнями: а – траектория в горизонтальной плоскости; б – высота

В табл. 1 представлены ненормированные значения показателей качества. При этом в качестве численных значений, характеризующих длину траектории, взята обратная ей величина. В этом случае оба частных показателя должны достигать максимума, поэтому интегральный показатель вычисляется суммированием в соответствии с выражением (17).

Таблица 1

Ненормированные показатели качества

Вариант	ДТ, 1/м	ПБ, м
а)	1/82,64	1,43
б)	1/51,7	1,89
в)	1/76,8	1,62

По значениям частных показателей выделяются следующие максимальные значения: показатель безопасности 1.43 (вариант б); длина траектории 51.7 (вариант б). Далее, используя максимальные значения частных показателей, проведем их нормирование. В результате, при $k_S = k_P = 0.5$, получаем значения нормированных показателей и интегрального показателя, вычисленного в соответствии с выражением (7) и представленные в табл. 2.

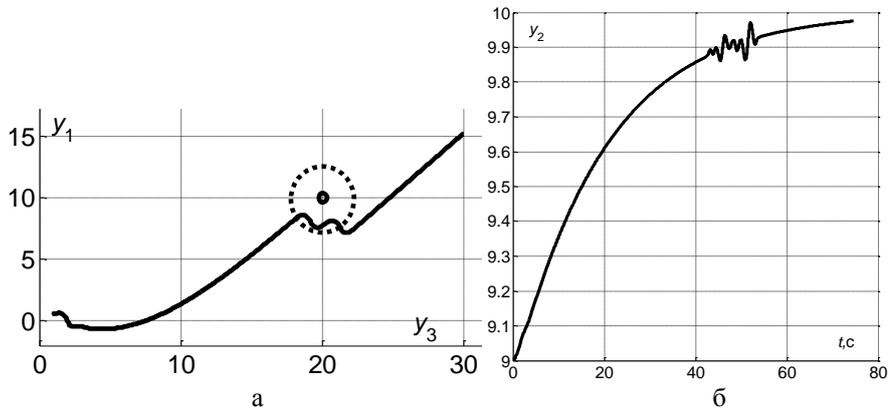


Рис. 6. Моделирование варианта с одним действительным неустойчивым корнем:
а – траектория в горизонтальной плоскости; б – высота

Из табл. 2 можно сделать вывод, что наиболее эффективным по критерию (17) является неустойчивый режим, обеспечиваемый при изменении одного действительного корня. При этом второй корень замкнутой системы остается неизменным. Введение колебательной составляющей в систему с неустойчивыми режимами или введение двух неустойчивых корней нецелесообразно, так как возникают колебания, которые в совокупности с инерционностью объекта приводит к снижению эффективности обхода препятствий. Численные исследования показали, что интегральный показатель качества значительно уменьшается при увеличении абсолютного значения мнимой части корней характеристического уравнения.

Таблица 2

Нормированные показатели качества

Вариант	P_L^*	S_m^*	K_I
б)	1.0	1.0	1.0
в)	0.674	0.857	0.766
а)	0.625	0.757	0.691

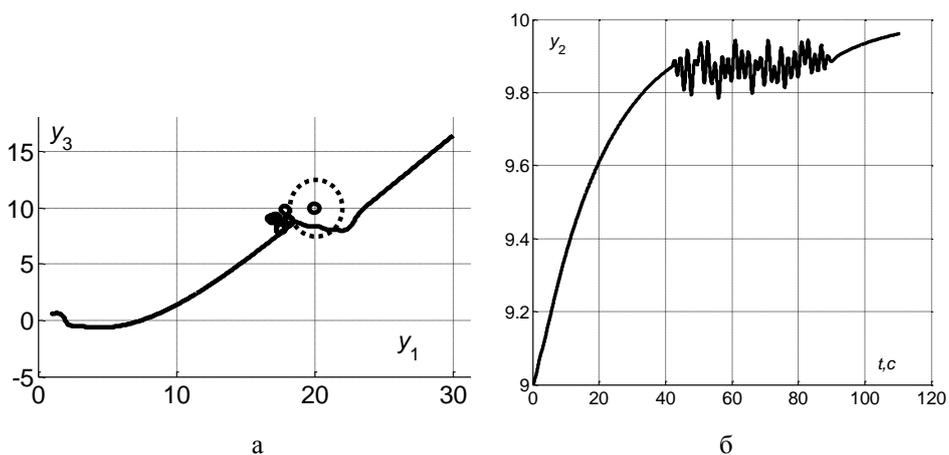


Рис. 7. Моделирование варианта с комплексно-сопряженными корнями:
а – траектория в горизонтальной плоскости; б – высота

Отметим, что в неустойчивые режимы организуются относительно траекторных многообразий, скоростные многообразия остаются устойчивыми.

Также можно отметить, что более высокое качество обхода препятствия в варианте б), когда неустойчивым делается только один корень, может быть связан с меньшей вычислительной жесткостью решаемой задачи.

Исследование влияния погрешностей на систему управления. Аналитическое исследование влияния погрешностей измерения расстояния на систему управления затруднено в силу того, что известные методы ориентированы на линейные системы в установившихся или устойчивых режимах. Численные исследования показывают, что помехи в канале измерения расстояния до препятствия слабо (в пределах 3 %) влияют на пройденное подвижным объектом расстояние. Зависимость показателя безопасности от погрешностей датчика расстояния до препятствия при синусоидальных помехах различной частоты и случайной помехи с типа «белый шум» с равномерным законом распределения представлена в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость показателя безопасности от погрешности измерения расстояния до препятствия

$\varepsilon_d, \text{ м}$	0	1	2	3	4	5	6
$S_m^*, \text{ м, rand}$	1.85	1.72	1.58	1.56	1.62	1.02	0.08
$S_m^*, \text{ м, 70 Гц}$	1.85	1.65	1.43	1.15	1.04	0.1	0.03
$S_m^*, \text{ м, 50 Гц}$	1.85	1.65	1.4	1.25	1.12	0.27	0.03
$S_m^*, \text{ м, 30 Гц}$	1.85	1.66	1.44	1.28	1.16	0.32	0.03
$S_m^*, \text{ м, 10 Гц}$	1.85	1.71	1.57	1.4	1.26	0.52	0.01

Из табл. 3 следует, что с ростом погрешности измерения расстояния до препятствия показатель безопасности снижается. Когда измерительная погрешность превышает величину r_1 , система управления не реагирует на появление препятствия.

Отметим, что алгоритм (9) представляет собой адаптивное позиционно-траекторное управление с наблюдателем возмущений. В связи с тем, что в непрямых адаптивных системах алгоритм оценивания возмущений синтезируется независимо от базового алгоритма управления, то адаптивные свойства такой системы зависят только от алгоритма оценивания. Численные исследования показывают, что наличие неустойчивых режимов слабо влияют на свойства непрямого адаптивного управления с оцениванием возмущений.

Заключение. Полученные в статье результаты могут быть использованы при проектировании систем управления автономных подвижных объектов, функционирующих в трехмерных средах, например, системах управления дирижаблями, автономными необитаемыми подводными аппаратами, воздушными комплексами с БЛА. Применение неустойчивых режимов позволяет функционировать подвижному объекту, используя только информацию о расстоянии до препятствий, не прибегая к картографированию. Это снижает требования сенсорному обеспечению и бортовым вычислителям.

С точки зрения практического использования проблемными остаются вопросы определения величины r_1 для нелинейных объектов, учета ограничений в неустойчивых режимах и организации неустойчивых режимов при недиагональных

матрицах T_1, T_2 . Например, воздухоплавательные комплексы и подводные аппараты могут быть весьма ограничены по углам атаки (дифферента) [14, 15], что требует особого внимания при организации неустойчивых режимов движения.

Отметим, что гибридные системы управления, использующие совместно неустойчивые режимы и элементы искусственного интеллекта, в частности, нечеткой логики, позволяют функционировать подвижным объектам в условиях препятствий сложной формы [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пшихопов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 34-41.
2. *Пшихопов В.Х.* Управление подвижными объектами априори неформализованных средах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 6-19.
3. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-02-037509-3.
4. *Пшихопов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
5. *Пшихопов В.Х.* Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 15-20.
6. *Pshikhopov V.Kh., Ali A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 – Proceedings. – P. 540-545.
7. *Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю., Крухмалев В.А., Медведев М.Ю., Переверзев В.А., Пшихопов В.Х., Пьявченко О.А., Сапрыкин Р.В., Соловьев В., Финаев В.И., Чернухин Ю.В., Шаповалов И.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под редакцией В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит. 2014. – 350 с.
8. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
9. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
10. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
11. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 200-207.
12. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
13. *Cielniak G., Treptow A. and Duckett T.* Quantitative Performance Evaluation of a People Tracking System on a Mobile Robot // Proceedings of the European Conference on Mobile Robots (ECMR), Ancona, Italy, 2005.
14. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. и др.* Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. – М.: Физматлит, 2010. – 394 с. ISBN 978-5-9221-1292-5.
15. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V.* Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). – P. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

REFERENCES

1. *Pshikhopov V.X.* Organizatsiya repellerov pri dvizhenii mobil'nykh robotov v srede s prepyatstviyami [The organization of repellers during the movement of mobile robots in environments with obstacles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2008, No. 2, pp. 34-41.
2. *Pshikhopov V.Kh.* Upravlenie podvizhnymi ob'ektami a priori neformalizovannykh sredakh [Management of mobile objects and a priori non-formal environments], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 6-19.
3. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow.: Nauka, 2011, 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
4. *Pshikhopov V.Kh.* Pozitsionno-traektornoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami [Position-trajectory control of mobile]. Taganrog. Izd-vo TTI YuFU, 2009, 183 p.
5. *Pshikhopov V.Kh.* Dirizhabli: perspektivy ispol'zovaniya v robototekhnike [Airships: prospects of use in robotics], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2004, No. 5, pp. 15-20.
6. *Pshikhopov V.Kh., Ali A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments, *2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 – Proceedings*, pp. 540-545.
7. *Guzik V.F., Kosenko E.Yu., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Pereverzev V.A., Pshikhopov V.Kh., Pyavchenko O.A., Saprykin R.V., Solov'ev V., Finaev V.I., Chernukhin Yu.V., Shapovalov I.* Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], Under edition V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit. 2014, 350 p.
8. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A.* Sistema pozitsionno-traektorogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [System position-trajectory control of robotic aeronautical platform: mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2013, No. 6, pp. 14-21.
9. *Byushgens G.S., Studnev R.V.* Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie [The dynamics of the aircraft. Spatial movement]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 320 p.
10. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A.* Sistema pozitsionno-traektorogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: algoritmy upravleniya [System position-trajectory control of robotic aeronautic platform: the control algorithms], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2013, No. 7, pp. 13-20.
11. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Algoritmy otsenivaniya v sisteme upravleniya avtonomnogo robotizirovannogo dirizhablya [The estimation algorithms in the control system of an Autonomous robotic airship], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 200-207.
12. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Sintez adaptivnykh sistem upravleniya letatel'nyimi apparatami [Synthesis of adaptive control systems aircraft], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 187-196.
13. *Cielniak G., Treptow A. and Duckett T.* Quantitative Performance Evaluation of a People Tracking System on a Mobile Robot, *Proceedings of the European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Ancona, Italy, 2005.
14. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. i dr.* Upravlenie vozdukhoplavatel'nyimi kompleksami: teoriya i tekhnologii proektirovaniya [Management of aeronautic systems: theory and design technology]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 394 p. ISBN 978-5-9221-1292-5.
15. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V.* Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle, *Applied Mechanics and Materials* Vols. 490-491 (2014), pp. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Южный федеральный университет; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; факс: 88634681894; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Крухмалев Виктор Александрович – e-mail: doc61rus@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Pshikhov Vyacheslav Khasanovich – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; fax: +78634681894; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Krukhmalev Viktor Alexandrovich – e-mail: doc61rus@gmail.com; assistant professor.

УДК 62-503.51: 62-531.4: 62-531.6

А.Р. Гайдук, Б.В. Гуренко, Е.А. Плаксиенко, И.О. Шаповалов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫМ КАТЕРОМ, КАК МНОГОМЕРНЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ*

При создании быстроходных безэкипажных катеров возникает задача разработки системы и алгоритма управления, автоматически обеспечивающих движение катера по заданной траектории с заданной скоростью [1, 2, 3]. Как известно для решения этой задачи, прежде всего, необходима адекватная математическая модель, которая описывает движения катера. В данной работе используется уточненная математическая модель надводного катера «Нептун», предложенная в [4]. В соответствии с этой моделью катер является многомерным объектом управления, так как имеет два управления и две управляемые переменные. Поэтому система управления движением катера синтезируется как многомерная на основе его модели, представленной в управляемой форме Жордана [5]. Это позволяет с одной стороны учесть нелинейности модели, а с другой стороны, выбором параметров законов и алгоритмов управления обеспечить желаемое качество процесса автономного движения катера по заданным траекториям. Полученный нелинейный алгоритм автономного управления будет реализован с помощью бортового компьютера, а необходимые для управления переменные катера будут измеряться непрерывными датчиками. Исследование свойств замкнутой системы управления проводилось путем численного моделирования на ПЭВМ. В статье разработана система автоматического управления движениями безэкипажного катера. Предполагается, что катер оборудован измерительной системой, способной определять его текущие координаты и скорости линейных и угловых перемещений. Система управления синтезируется на основе математической модели катера, полученной в работе [4]. Для решения задачи, уравнения каналов управления катера приводятся к управляемой форме Жордана, что позволяет аналитически найти необходимые управления. Исследование синтезированной системы управления, с учетом конструктивных ограничений на значения управляющих воздействий, выполнено методом компьютерного моделирования в MATLAB.

Автопилот; безэкипажный катер; управляемая форма Жордана; алгоритмы управления; математическая модель.

* Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ЮФУ 213.01-24/2013-109, гранта РФФИ № 13-08-00249-а и НИР №114041540005 по госзаданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности.