

УДК 007.52:62.503.51

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.В. Соловьев

**ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА В ЗАДАННУЮ ТОЧКУ***

Целью исследования является разработка алгоритмов управления безэкипажным судном, обеспечивающих движение в различных режимах в среде с препятствиями. Описана математическая модель судна на плоскости, базирующаяся на уравнениях движения твердого тела. Рассмотрены три режима: терминальное движение в заданную точку; позиционирование в заданной точке; обход препятствия. Появляется задача обеспечить плавный переход от одного режима к другому. На основе метода позиционно-траекторного управления синтезирован базовый регулятор, реализующий заданные режимы движения. Предложено переход от одного режима движения к другому реализовать за счет изменения алгоритма расчета задающих воздействий. Это позволяет использовать один регулятор на исполнительном уровне, а переход от одного режима к другому осуществлять на уровне планирования. В режиме терминального движения желаемая скорость вычисляется по заданному времени движения и расстоянию до желаемой точки. Предложен алгоритм расчета требуемой скорости в постановке «слабого» терминального управления. Это позволяет устранить сингулярность в целевой точке за счет введения методической погрешности достижения цели. В режиме позиционирования осуществляется переход к вычислению требуемой скорости на основании информации о расстоянии до желаемого положения судна. Предложенный алгоритм управления обеспечивает уменьшение скорости движения пропорционально расстоянию до цели. Для обхода препятствий в желаемый угол ориентации судна добавляется составляющая, генерируемая дополнителем вдали от препятствия, и неустойчивым в некоторой заранее задаваемой области препятствия. Для сопряжения различных режимов движения используется формализм нечеткой логики, позволяющий сгладить переходные режимы и устранить сингулярность в терминальном законе управления. В работе доказана асимптотическая устойчивость желаемого положения равновесия многорежимной системы управления с нечеткой логикой. Приводятся результаты моделирования движения судна в различных режимах, демонстрирующие преимущества предлагаемых алгоритмов. Экспериментальные исследования, проведенные на базе мини-катера, подтверждают физическую реализуемость и заявленные преимущества алгоритмов управления.

Управление движением; безэкипажное судно; позиционирование; терминальное управление; обход препятствий; нечеткая логика; многорежимная система управления.

V.Kh. Pshikhopov, M.Y. Medvedev, V.V. Solovjev

**A HYBRID CONTROL SYSTEM OF MOVEMENT OF UNMANNED VESSEL
TO A GIVEN POINT**

The aim of the study is elaboration of control algorithms for an unmanned vessel movement in uncertain environments. The mathematical model of the unmanned vessel is based on the equations of motion of a solid body. In the article three modes of movement are considered. The first mode is a terminal movement to a given point. The second mode is homing in a given area of the point. The third mode is obstacle avoiding. It is necessary to ensure smooth transients. Base multi-mode controller is designed by the position-path attitude of a movement control. In this study a novel algorithm of the references calculation is proposed. The algorithm changes the mode in a planning level. The low level single controller is used for the considered modes of a vessel motion. In the mode of terminal control a vessel velocity reference is calculated as function of the distance to the homing point and the given time of movement. A problem of terminal control is solved as a problem of weak terminal control. A weak terminal control problem introduces the error of a ves-

* Работа выполнена при поддержке Южного федерального университета, проект № 07/2017-19.

sel homing. This error eliminates a singularity at the homing point. In the homing mode the vessel velocity reference is calculated as function of the distance to the homing point. The vessel velocity reference is the proportional function of the distance to the homing point. In the obstacle avoiding mode the vessel yaw is corrected by additional component. This component is solution of the additional differential equation. The solution is stable if distance from the vessel to the obstacle is more than the safety distance. The solution is unstable if distance from the vessel to the obstacle is less than the safety distance. Composition of the different modes is made by fuzzy logics algorithms. Developed fuzzy logics based algorithms smooth the transients, and eliminate the singularity at the homing point. Asymptotical stability of the origin of the closed control system is proved. Presented results are demonstrated by simulation. Developed algorithms are implemented in the control system of mini vessel.

Movement control; unmanned vessel; homing; terminal control; obstacle avoiding; fuzzy logics; hybrid control system.

Введение. Перевод морских судов в разряд безэкипажных позволяет существенно повысить их автономность. Безэкипажное судно не нуждается в системах жизнеобеспечения, провизии, питьевой воде. В этой связи перспективными направлениями использования безэкипажных судов являются перевозка грузов и пассажиров, картографирование морского дна, проведение поиска месторождений углеводородов, сейсмическая разведка, поисково-спасательные операции [1, 2].

Наиболее актуальными вопросами создания автономных безэкипажных судов являются разработка систем автоматического управления и планирования движения [2–4]. При неопределенности среды, необходимости маневрировать в условиях подвижных препятствий, такая задача является достаточно сложной и требует привлечения интеллектуальных технологий управления [5–8]. Особенно такая задача актуальна при планировании движения.

При выполнении различных задач к системе управления предъявляются разные требования. В этой связи система автоматического управления подвижного объекта, как правило, является многорежимной. Типичными режимами являются позиционирование в точке, движение вдоль заданной траектории с заданной скоростью, движение к заданной траектории, попадание в заданную точку в заданный момент времени, обход препятствия при движении. Для каждого режима движения применяется свой регулятор, поэтому возникает задача переключения из одного режима движения к другому. Четкие границы между различными режимами движения приводят к необходимости решения двух проблем. Первая заключается в необходимости учета большого числа переменных при переходе от одного режима к другому. В частности, при переходе от режима движения в заданную точку к режиму обхода препятствия необходимо учитывать расстояние до препятствия, скорость катера и препятствия, их взаимное расположение, максимально возможные ускорения и пр. Вторая проблема заключается в том, что при движении катера вдоль границы, возможны колебательные переключения между режимами, что приводит к повышенной нагрузке на привода и дополнительному расходу энергии.

В этой связи в данной работе исследуется метод согласования областей функционирования различных регуляторов посредством нечеткой логики, которая позволяет не определять четких границ действия того или иного регулятора [5].

Формальная постановка задачи. Математическая модель движения судна имеет вид [9]

$$\dot{y} = R(y)x, \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(Bu + F_d + F_v), \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos y_3 & \sin y_3 & 0 \\ -\sin y_3 & \cos y_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F_d = \begin{bmatrix} -mx_2x_3 - c_{x1}x_1 \\ -mx_1x_3 - c_{x2}x_2 \\ -m_{x3}x_3 \end{bmatrix},$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix},$$

где $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$; y_1, y_2 – линейные координаты судна в неподвижной системе OY_1Y_2 (рис. 1); y_2 – угол рысканья судна; $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$; x_1, x_2 – проекции линейных скоростей судна в подвижной системе координат OX_1X_2 ; x_3 – угловая скорость; F_v – вектор неизмеряемых возмущений; u – вектор управляющих воздействий; m – масса судна; J – момент инерции относительно вертикальной оси; c_{x1}, c_{x2}, m_{x2} – положительные коэффициенты сопротивления движению.

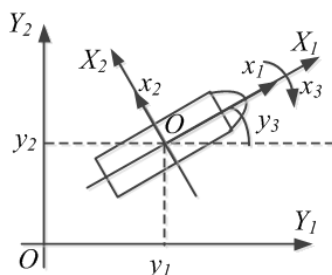


Рис. 1. Системы координат судна

Ставится задача разработать алгоритмы управления, обеспечивающие движение судна в заданную область Ω_0 , обход препятствий на пути и позиционирование в точке $(y_1^0, y_2^0) \in \Omega_0$. При этом необходимо обеспечить асимптотическую устойчивость движения судна в каждом режиме и плавный переход от одного режима движения к другому.

Синтез алгоритмов управления движением судна. Алгоритм управления движением судна в заданную точку синтезируется на основе метода [10]. Введем траекторную и скоростную ошибки в виде:

$$e_{tr} = A_1 y + A_2, \quad (3)$$

$$e_{sp} = A_3 x + A_4, \quad (4)$$

$$A_1 = [0 \ 0 \ 1], \quad A_2 = -y_3^0, \quad A_3 = [1 \ 0 \ 0], \quad A_4 = -x_1^0,$$

где y_3^0 – желаемый угол рысканья судна; x_1^0 – желаемая скорость движения судна.

Зададим эталонные уравнения относительно ошибок (3), (4) в виде

$$\ddot{e}_{tr} + T_2 \dot{e}_{tr} + T_1 e_{tr} = 0, \quad \dot{e}_{sp} + T_3 e_{sp} = 0, \quad (5)$$

где T_1, T_2, T_3 – матрицы постоянных параметров.

Тогда решая обратную задачу динамики [11] для объекта (1), (2), относительно вектора управляющих сил u по заданным траекториям движения (3)–(5), находим

$$u = - \left(\begin{bmatrix} A_1 R \\ A_3 \end{bmatrix} M^{-1} B \right)^{-1} \left(\begin{bmatrix} A_1 R \\ A_3 \end{bmatrix} M^{-1} (F_d + F_v) + \begin{bmatrix} A_1 \dot{R}(y)x + T_2 \dot{e}_{tr} + T_1 e_{tr} \\ T_3 e_{sp} \end{bmatrix} \right), \quad (6)$$

$$\dot{R}(y) = \begin{bmatrix} -\sin y_3 & \cos y_3 & 0 \\ -\cos y_3 & -\sin y_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_3, \quad \dot{e}_{tr} = A_1 R(y)x.$$

В зависимости от режима движения, используются различные способы формирования траекторной и скоростной ошибок (3), (4). В общем виде желаемое значение угла рысканья задается на основе информации о текущем положении (y_1, y_2) и целевом положении (y_1^0, y_2^0) , а также положении препятствия в виде

$$y_3^0 = \begin{cases} -\arctan \frac{y_2^0 - y_2}{y_1^0 - y_1}, & r > r_s, \\ -\arctan \frac{y_2^0 - y_2}{y_1^0 - y_1} + \Delta y_3, & r \leq r_s, \end{cases} \quad (7)$$

где r – текущее расстояние до препятствия; r_s – безопасное расстояние до препятствия, на котором начинается маневрирование; Δy_3 – угол обхода препятствия, формируемый следующими уравнениями [12]

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= -(T_\xi + \beta)\xi + \beta, \\ \beta &= \begin{cases} 0, & r > r_s, \\ T_\xi + \beta_0, & r \leq r_s, \end{cases} \\ \Delta y_3 &= \text{sat}_{-\pi/2}^{\pi/2}(\xi), \end{aligned} \quad (8)$$

ξ – дополнительная переменная; T_ξ – постоянный параметр, определяющий значение собственного числа уравнения (8) в устойчивом режиме; β – бифуркационный параметр, делающий траекторию устойчивой вдали от препятствия и неустойчивой в области препятствия; β_0 – значение собственного числа уравнения (8) в неустойчивом режиме; sat – функция ограничения сигнала по амплитуде.

Выражение (8) позволяет реализовать обход одиночных препятствий, что для морских подвижных объектов является самой распространенной задачей. Вопросы формирования бифуркационных параметров в среде с многочисленными препятствиями рассмотрены в [12].

Желаемое значение скорости движения задается в виде функции расстояния до цели и расстояния до препятствия

$$x_1^0 = \gamma_r V_k \left\| \left[\begin{array}{cc} y_1^0 - y_1 & y_2^0 - y_2 \end{array} \right] \right\| = \gamma_r V_k r, \quad (9)$$

$$V_k = \begin{cases} V_k^0, & r > r_s, \\ V_k^0 \left(1 - \frac{r}{r_s} \right), & r \leq r_s, \end{cases} \quad (10)$$

где V_k – текущая желаемая скорость движения в целевую точку; V_k^0 – желаемая скорость движения в целевую точку при отсутствии препятствий; γ_r – постоянный настроечный коэффициент, определяющий размеры области позиционирования в целевой точке.

В работах [10, 12] отмечено, что неустойчивые режимы могут приводить к избыточно большим изменениям траектории движения подвижного объекта. Кроме того, при обходе препятствия, судно движется при $r \approx r_s$, что приводит к периодическим переключениям из одного режима работы в другой. В этой связи в данной работе применяется нечеткая система сопряжения режима движения в заданную точку и режима обхода препятствия.

Введем две нечеткие входные функции принадлежности: режим движения в заданную точку μ_r и режим обхода препятствия μ_{obs} , представленные на рис. 2.

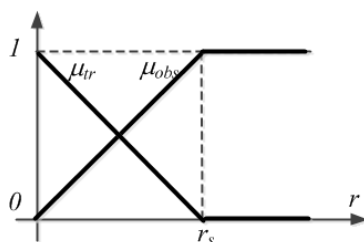


Рис. 2. Нечеткие входные функции принадлежности

Дефаззификация осуществляется с использованием метода центра тяжести [13], из которого, с учетом (10), получаем

$$V_k = \frac{\mu_{tr} V_k^0 + \mu_{obs} V_k^0 \left(1 - \frac{r}{r_s}\right)}{\mu_{tr} + \mu_{obs}}. \quad (11)$$

Синтез алгоритмов управления в терминальной постановке. Рассмотрим теперь терминальную задачу движения [14], которая является достаточно актуальной для морских роботов [15, 16]. Сформулируем задачу управления следующим образом. Пусть судно вначале должно попасть из произвольного начального положения (y_1, y_2) в заданную окрестность ду целевой точки (y_1^0, y_2^0) за время T_k , а далее решать задачу асимптотического позиционирования в точке (y_1^0, y_2^0) .

Наиболее распространенный способ решения задачи терминального управления – построение программной траектории, а затем слежение за полученной траекторией [15–17]. Известно, что задача терминального управления в строгой постановке приводит к управлению с особенностью [17–19]. В этой связи в данной статье предлагается решение, позволяющее устранить указанную особенность за счет применения нечеткой логики для сопряжения двух режимов движения: режима терминального управления и режима позиционирования.

Пусть в режиме позиционирования требования к скорости движения задаются в виде (9). В режиме терминального управления рассмотрим следующий алгоритм задания требований к скорости движения

$$x_1^{0ter} = \frac{r}{T_k - t}. \quad (12)$$

Отметим, что выражение (12) обладает в конечный момент времени $t=T_k$ особенностью.

Введем следующие входные функции принадлежности нечеткой системы сопряжения режима терминального управления и режима позиционирования (рис. 3): μ_p – позиционирование судна; μ_{ter} – движение в терминальном режиме.

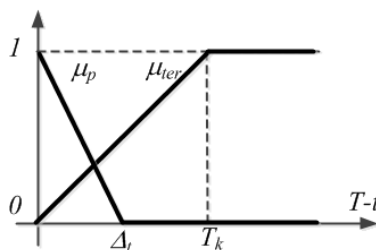


Рис. 3. Нечеткие входные функции сопряжения терминального режима и режима позиционирования

Применяя для дефаззификации метод центра тяжести, согласно рис. 3, получаем требования к скорости движения судна

$$V_k = \frac{\mu_p x_1^{0p} + \mu_{ter} x_1^{0ter}}{\mu_p + \mu_{ter}}. \quad (13)$$

Согласно рис. 3 получаем

$$\mu_{ter} = \frac{T_k - t}{T_k}, \quad \mu_p = \begin{cases} 1 - \frac{T_k - t}{\Delta t}, & T_k - t \leq \Delta t \\ 0, & T_k - t > \Delta t \end{cases}.$$

С учетом последних выражений, полагая в (13) $x_1^{0p} = \gamma r$, с учетом (9), (12), получаем

$$V_k = \begin{cases} \frac{\frac{\Delta t - T_k + t}{\Delta t} \gamma r + \frac{r}{T_k}}{\frac{\Delta t - T_k + t}{\Delta t} + \frac{T_k - t}{T_k}}, & T_k - t \leq \Delta t, \\ \frac{r}{T_k - t}, & T_k - t > \Delta t. \end{cases} \quad (14)$$

Отметим, что выражение (14) не содержит особенностей. В частности, при $\Delta t = T_k$, получаем

$$V_k = \frac{r}{T_k} (1 + \gamma_r t). \quad (15)$$

Сформулируем следующее утверждение.

В замкнутой системе управления (1)–(6), в которой задающее воздействие по скорости формируется в соответствии с выражением (15), полученным в результате применения нечеткого алгоритма (13), (14) с нечеткими функциями, представленными на рис. 3, устойчивое положение равновесия определяется выражениями

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= y_1^0, \quad \tilde{y}_2 = y_2^0, \quad \tilde{y}_3 = const, \\ \tilde{x}_1 &= 0, \quad \tilde{x}_2 = 0, \quad \tilde{x}_3 = 0. \end{aligned}$$

Доказательство.

Проведем анализ замкнутой системы управления (1), (2) при $t \rightarrow \infty$. Подставляя управление (6) в уравнение (2), получаем в скалярной форме, с учетом уравнений (5),

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{y}}_1(t) &= \tilde{x}_1 \cos \tilde{y}_3 + \tilde{x}_2 \sin \tilde{y}_3, \\ \dot{\tilde{y}}_2(t) &= -\tilde{x}_1 \sin \tilde{y}_3 + \tilde{x}_2 \cos \tilde{y}_3, \\ \dot{\tilde{y}}_3(t) &= \tilde{x}_3, \\ m\dot{\tilde{x}}_1(t) &= 0, \\ m\dot{\tilde{x}}_2(t) &= -m\tilde{x}_1 \tilde{x}_3 - c_{x2} \tilde{x}_2, \\ J\dot{\tilde{x}}_3(t) &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

где $\tilde{y}_1, \tilde{x}_1, \tilde{y}_3, \tilde{x}_2, \tilde{y}_2, \tilde{x}_3$ – значения переменных при $t \rightarrow \infty$.

В уравнениях (16) в силу того, что анализируется асимптотическая устойчивость системы, принято $F_v = 0$.

При $t \rightarrow \infty$, в силу уравнений (5) $e_{sp} = 0$, $e_{tr} = 0$ и $\dot{e}_{tr} = 0$, поэтому

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= x_1^0 = \gamma_r V_k r = \gamma_r V_k \sqrt{(y_1^0 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2^0 - \tilde{y}_2)^2}, \\ \tilde{y}_3 &= y_3^0 = -\operatorname{arctg} \frac{y_2^0 - \tilde{y}_2}{y_1^0 - \tilde{y}_1}, \\ \tilde{x}_3 &= \frac{(y_2^0 - \tilde{y}_2) - (y_1^0 - \tilde{y}_1)}{\sqrt{(y_1^0 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2^0 - \tilde{y}_2)^2}}.\end{aligned}\quad (17)$$

Из четвертого уравнения (16) следует, что $\tilde{x}_1 = \operatorname{const}$. Тогда из первого уравнения (17), с учетом (15), получаем

$$\begin{aligned}\tilde{x}_1 &= \gamma_r \frac{r}{T_k} (1 + \gamma_r t) \sqrt{(y_1^0 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2^0 - \tilde{y}_2)^2} \Rightarrow \\ (y_1^0 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2^0 - \tilde{y}_2)^2 &= \frac{\tilde{x}_1 T_k}{\gamma_r (1 + \gamma_r t)} \Big|_{t \rightarrow \infty} = 0.\end{aligned}\quad (18)$$

Из шестого уравнения (16) следует, что $\tilde{x}_3 = \operatorname{const}$. С учетом выражения (18) это означает, что существует предел

$$\lim_{\substack{\tilde{y}_2 \rightarrow y_2^0 \\ \tilde{y}_1 \rightarrow y_1^0}} \frac{(y_2^0 - \tilde{y}_2) - (y_1^0 - \tilde{y}_1)}{\sqrt{(y_1^0 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2^0 - \tilde{y}_2)^2}} = \tilde{x}_3.$$

Однако предел в последнем выражении, в общем случае, не существует, если переменные $(y_1^0 - \tilde{y}_1), (y_2^0 - \tilde{y}_2)$ независимы [20]. Отсюда следует, что

$$(y_1^0 - \tilde{y}_1) = k (y_2^0 - \tilde{y}_2).$$

Подставляя последнее выражение во второе уравнение (17), получаем

$$\tilde{y}_3 = -\operatorname{arctg}(k) = \operatorname{const}, \rightarrow \tilde{x}_3 = 0. \quad (19)$$

Из последнего выражения получаем, что $\dot{\tilde{y}}_3(t) = \tilde{x}_3 = 0$. Тогда пятое уравнение системы (16) принимает вид

$$m\ddot{\tilde{x}}_2(t) = -c_{x2}\tilde{x}_2.$$

Решение последнего уравнения при $c_{x2} > 0$ является устойчивым.

Утверждение доказано.

Результаты моделирования и экспериментов. Исследование полученные алгоритмы управления осуществляется на базе математической модели надводного мини-катера «Нептун» [9]. Движительно-рулевой комплекс катера, показанный на рис. 4, представляет собой два винтовых движителя на основе бесколлекторных асинхронных двигателей. Двигатели и винты установлены на подвижной раме и могут отклоняться от продольной оси на одинаковый угол α . Двигатели и сервопривод управляются локальными регуляторами, на входы которых подаётся ШИМ-сигнал.

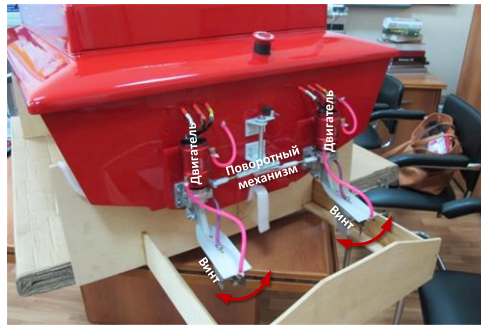


Рис. 4. Двигательный рулевой комплекс мини-корабля

Параметры мини-катера: масса $m = 50$ кг; момент инерции $J = 15$ кг·м²; коэффициенты сопротивления движения $c_{x1} = 0.1$, $c_{x2} = 0.7$, $m_{x3} = 0.2$.

На носу установлены три дальномера. Лучи дальномеров расходятся под углом 30° . Длина каждого луча составляет 10 м. При моделировании модель сенсора проверяет пересечение каждого луча с каждым препятствием и при наличии пересечения выдает минимальное расстояние, а так же флаг о наличии препятствия. Также мини-катер оборудован навигационной системой GPS и бортовым компьютером, позволяющим выполнять алгоритмы обработки навигационных данных, данных от системы технического зрения и управления движением.

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения безэкипажного судна с тремя режимами функционирования: терминальное движение в заданную точку; обход препятствия; позиционирование.

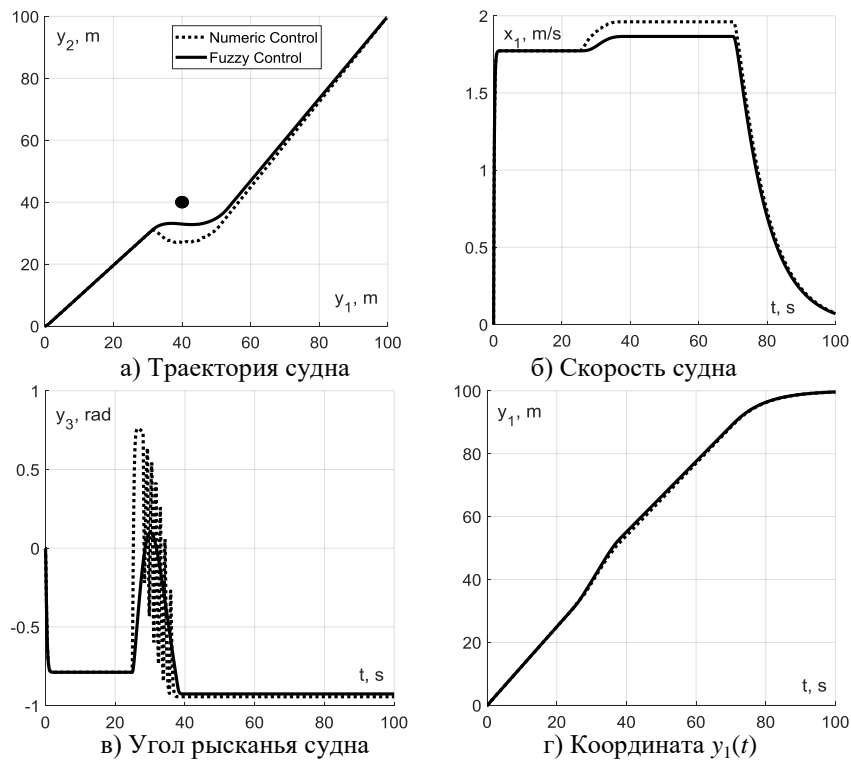


Рис. 5. Результаты моделирования

Начальное положение судна (0, 0), конечное положение (100, 100), время выполнения задачи $T_k = 80$ с. Максимальная скорость судна 3,0 м/с. Безопасное расстояние до препятствия, на котором начинается маневрирование, $r_s = 10$ м. Параметры регулятора: $T_1=25$; $T_2=10$; $T_3=5$; $\gamma_r=0.1$; $T_5=10$; $\beta_0=1.0$; $\Delta t = 10$ с.

Результаты моделирования представлены при четких границах между режимами (Numeric Control) и нечетких границах между режимами (Fuzzy Control). Приблизительно в момент времени $t=25$ с безэкипажный катер приближается к препятствию на опасное расстояние 10 м и начинает маневр. В ходе выполнения маневра пересчитывается скорость движения в сторону увеличения, т.к. оставшееся время уменьшается, расстояние до целевой точки не сокращается, а максимальная скорость движения в режиме обхода препятствий равна 2 м/с. В этой связи участок пути после препятствия безэкипажное судно проходит к более высокой скоростью. Начиная с момента времени $t = T_k - \Delta t = 70$ с, система управления переходит в режим позиционирования. На рис. 5,а и рис. 5,в хорошо видно преимущество применения нечетких правил для сопряжения различных режимов работы, это плавное движение в области препятствия.

На рис. 6 представлены результаты моделирования системы управления с нечеткой системой сопряжения режимов работы при значениях $T_k = 80$ с и $T_k = 60$ с.

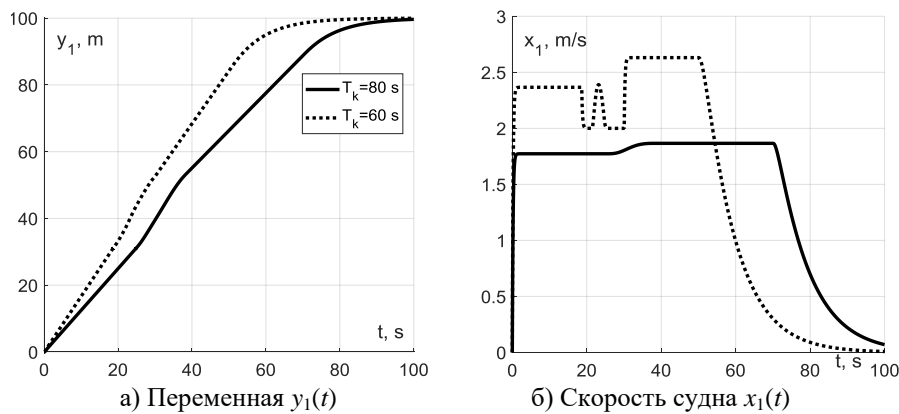


Рис. 6. Результаты моделирования при разном времени выполнения задачи

Из рис. 6 видно, что уменьшение времени выполнения задачи приводит к повышению скорости движения. При этом при обходе препятствия, текущая скорость оказывается выше максимально допустимой скорости в опасной области (2 м/с), поэтому скорость в данном режиме снижается. После обхода препятствия безэкипажное судно увеличивает скорость и движется с максимальной скоростью до момента времени $t = T_k - \Delta t = 50$ с, после чего осуществляется позиционирование.

Отметим увеличение скорости в начале периода позиционирования, которое уменьшается пропорционально величине интервала времени Δt . Методами численного моделирования проведена оптимизация нечетких функций, представленных на рис. 3. Изучено влияние параметра Δt на характеристики системы управления и осуществлена его оптимизация. В результате выработана рекомендация выбирать интервал Δt минимально возможным, но достаточным для того, чтобы судно успело выполнить остановку. Также проведено численное изучение различных вариантов построения нечетких входных функций, представленных на рис. 7. Показано, что наиболее существенное влияние на качество системы управления оказывает параметр Δt_2 .

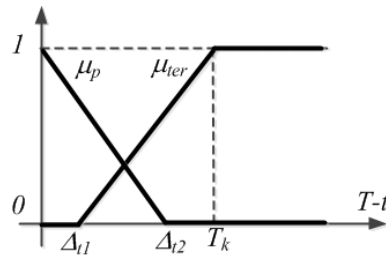


Рис. 7. Варианты вида нечетких входных функций сопряжения терминального режима и режима позиционирования

На рис. 8 представлены результаты экспериментальных исследований много-режимной системы управления безэкипажного катера «Нептун». Испытания проводились в Таганрогском заливе Азовского моря. На рис. 7 представлены траектории движения и графики изменения переменных состояния безэкипажного катера «Нептун», отражаемые на экране наземного пульта управления.

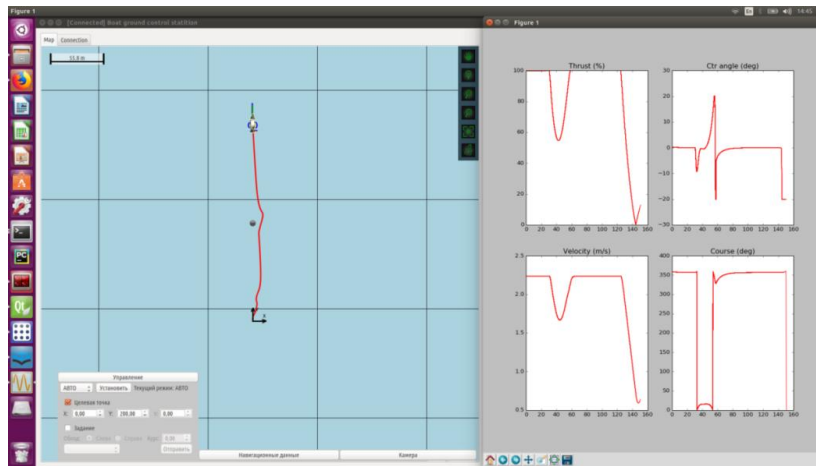


Рис. 8. Результаты экспериментов для системы управления с нечеткими границами между режимами движения

На рис. 8 в правой части представлена карта, на которой отображена траектория движения мини-катера, положение целевой точки и препятствия для системы управления с нечетким совмещением различных режимов движения. Также на рис. 8 представлены тяга, развиваемая двигателями, угол поворота двигателей мини-катера, угол рысканья и скорость движения.

На рис. 9 представлена аналогичная информация для эксперимента, в котором режимы движения разделены четкими границами.

В ходе экспериментов проведено 20 испытаний для каждой системы управления. Анализ результатов экспериментов показал, что длина траектории в системе управления с нечеткими границами меньше приблизительно на 7 %. Очевидно, что данный показатель будет повышаться увеличиваться при увеличении числа препятствий, и снижаться при увеличении длины траектории. Кроме того, углы поворота двигателей мини-катера изменяются более плавно, что благоприятно сказывается на режиме работы приводов и преобразователей.

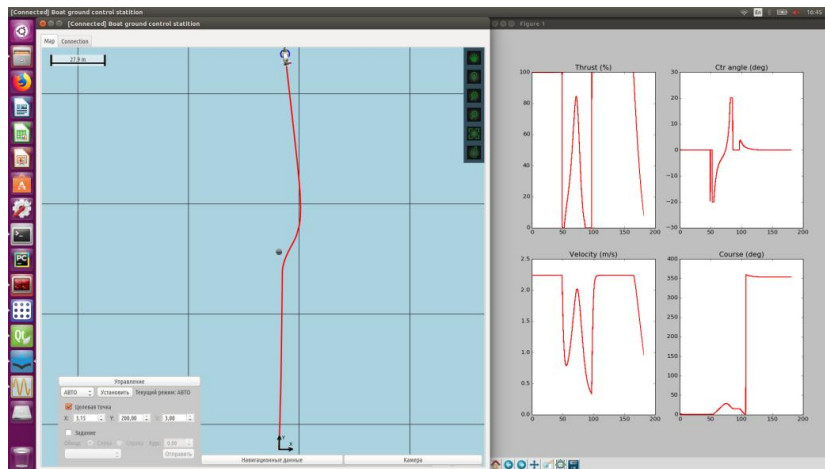


Рис. 9. Результаты экспериментов для системы управления с четкими границами между режимами движения

Заключение. В работе представлены алгоритмы системы управления безэкипажным судном, включающий в себя режим терминального движения в заданную точку, режим позиционирования и режим обхода препятствий. Преимуществами предложенной системы являются: единый алгоритм управления, обеспечивающий все три режима функционирования; переход от одного режима к другому осуществляется за счет изменения задающих воздействий, без изменения структуры управления; отсутствие неопределенности при решении терминальной задачи управления, что достигается использованием нечеткой логики и постановкой задачи слабого терминального управления; доказанной асимптотической устойчивостью желаемого положения системы управления.

Отметим, что доказательство асимптотической устойчивости желаемого положения произведено, с учетом элементов нечеткой логики в системе управления движением, для частного случая, когда $\Delta t = T_k$. Доказательство устойчивости при произвольном Δt возможно на основе линеаризации уравнений движения объекта и применении теории абсолютной устойчивости. При выборе нечетких функций принадлежности таким образом, чтобы обеспечивалась непрерывность задающего воздействия и его первой производной, возможно использование метода функций Ляпунова. Данный вопрос является направлением дальнейших исследований.

Предложенный метод может применяться для других подвижных объектов, включая беспилотные летательные аппараты, автономные необитаемые подводные аппараты, наземные колесные и гусеничные мобильные роботы. Т.к. предложенный метод построения многорежимной системы основывается на использовании нечеткой логики при формировании задающих воздействий, то он может применяться при различных алгоритмах управления движением. В частности, его применение совместно с адаптивным регулятором [21, 22] позволяет получить адаптивную многорежимную систему управления подвижным объектом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klinger W.B., Bertaska I.R., Ellenrieder K.D., and Dhanak M.R. Control of an Unmanned Surface Vehicle With Uncertain Displacement and Drag // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2017. – Vol. 42 (2). – P 458-476.
2. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control. – 2016. – Vol. 41. – P. 71-93.

3. Jin X. Fault tolerant finite-time leader-follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints // *Automatica*. – 2016. – Vol. 68 (1). – P. 228-236.
4. Villa J.L., Paez J., Quintero C., Yime E., and Cabrera J. Design and control of an Unmanned Surface Vehicle for Environmental Monitoring Applications // 2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA). – P. 1-5.
5. Xiang, X., Yu, C., Lapierre, L., Zhang, J., Zhang, Q. Survey on Fuzzy-Logic-Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2018. – Vol. 20 (2). – P. 572-586.
6. Wang N., Sun J.-C., Er M.J., Liu Y.-C. A Novel Extreme Learning Control Framework of Unmanned Surface Vehicles // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2016. – Vol. 46 (5). – P. 1106-1117.
7. Zheng Z., Sun L. Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation // *Neurocomputing*. – 2016. – Vol. 177 (12). – P. 158-167.
8. Peng Z., Wang J., Wang D. Distributed Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles Based on Neurodynamic Optimization and Fuzzy Approximation // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2018. – Vol. 26 (3). – P. 1083-1090.
9. Костюков В.А., Маевский А.М., Гуренко Б.В. Математическая модель надводного миникорабля // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 3.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle // *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*. – 2017. – P. 1-23.
11. Kokotović P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective // *Automatica*. – 2001. – Vol. 37 (5). – P. 637-662.
12. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Труды СПИИРАН*. – 2018. – Вып. 60. – С. 39-63.
13. Lee C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1990. – Vol. 20 (2). – P. 404-418 (Part I). – P. 419-435 (Part II).
14. Фельдбаум А.А. О распределении корней характеристического уравнения системы регулирования // *Автоматика и телемеханика*. – 1948. – № 4. – С. 253-279.
15. Li B., Xu Y., Liu Ch., Fan Sh., Xu W. Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle // *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems*. – 2015. – P. 25-30.
16. Shikai W., Hongzhang J., Lingwei M. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control // *Chinese Control and Decision Conference*. – 2016. – P. 6833-6837.
17. Londhe P.S., Dhadekar D.D., Patre B.M., Waghmare L.M. Non-singular terminal sliding mode control for robust trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle // *Indian Control Conference*. – 2017. – P. 443-449.
18. Кабанов С.А., Шалыгин А.С. Решение терминальной задачи управления движением летательного аппарата с применением методов аналитической механики // *Автоматика и телемеханика*. – 1992. – № 8. – С. 39-45.
19. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы терминального управления подвижными объектами мультикоптерного типа // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 44-51.
20. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
21. Pshikhopov V., Medvedev M. Position control of vehicles with multi-contour adaptation // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – P. 8921-8928.
22. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю., Сиротенко М.Ю., Носко О.Э., Юрченко А.С. Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // *Известия ТРТУ*. – 2006. – № 3 (58). – С. 160-167.

REFERENCES

1. Klinger W.B., Bertaska I.R., Ellenrieder K.D., and Dhanak M.R. Control of an Unmanned Surface Vehicle With Uncertain Displacement and Drag, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, Vol. 42 (2), pp. 458-476.
2. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges, *Annual Reviews in Control*, 2016, Vol. 41, pp. 71-93.

3. Jin X. Fault tolerant finite-time leader-follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints, *Automatica*, 2016, Vol. 68 (1), pp. 228-236.
4. Villa J.L., Paez J., Quintero C., Yime E., and Cabrera J. Design and control of an Unmanned Surface Vehicle for Environmental Monitoring Applications, *2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, pp. 1-5.
5. Xiang, X., Yu, C., Lapiere, L., Zhang, J., Zhang, Q. Survey on Fuzzy-Logic-Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles, *International Journal of Fuzzy Systems*, 2018, Vol. 20 (2), pp. 572-586.
6. Wang N., Sun J.-C., Er M.J., Liu Y.-C. A Novel Extreme Learning Control Framework of Unmanned Surface Vehicles, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, Vol. 46 (5), pp. 1106-1117.
7. Zheng Z., Sun L. Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation, *Neurocomputing*, 2016, Vol. 177 (12), pp. 158-167.
8. Peng Z., Wang J., Wang D. Distributed Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles Based on Neurodynamic Optimization and Fuzzy Approximation, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, Vol. 26 (3), pp. 1083-1090.
9. Kostyukov V.A., Maevskiy A.M., Gurenko B.V. Matematicheskaya model' nadvodnogo minikorablya [A mathematical model of a surface mini-ship], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, No. 3.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle, *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, 2017, pp. 1-23.
11. Kokotović P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective, *Automatica*, 2001, Vol. 37 (5), pp. 637-662.
12. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes], *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2018, Issue 60, pp. 39-63.
13. Lee C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, Vol. 20 (2), pp. 404-418 (Part I); pp. 419-435 (Part II).
14. Fel'dbaum A.A. O raspredelenii korney kharakteristicheskogo uravneniya sistemy regulirovaniya [On the distribution of roots of the characteristic equation of the control system], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1948, No. 4, pp. 253-279.
15. Li B., Xu Y., Liu Ch., Fan Sh., Xu W. Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle, *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems*, 2015, pp. 25-30.
16. Shikai W., Hongzhang J., Lingwei M. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control, *Chinese Control and Decision Conference*, 2016, pp. 6833-6837.
17. Londhe P.S., Dhadekar D.D., Patre B.M., Waghmare L.M. Non-singular terminal sliding mode control for robust trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle, *Indian Control Conference*, 2017, pp. 443-449.
18. Kabanov S.A., Shalygin A.S. Reshenie terminal'noy zadachi upravleniya dvizheniem letatel'nogo apparata s primeneniem metodov analiticheskoy mekhaniki [Solution of the terminal problem of motion control of aircraft by methods of analytical mechanics], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1992, No. 8, pp. 39-45.
19. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy terminal'nogo upravleniya podvizhnymi ob'ektami mul'tikopternogo tipa [Algorithms of Terminal Control of Multi-Copters], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2019, Vol. 20, No. 1, pp. 44-51.
20. Vygodskiy M.Ya. Spravochnik po vyshey matematike [Handbook of higher mathematics]. Moscow: ACT: Astrel', 2006, 991 p.
21. Pshikhopov V., Medvedev M. Position control of vehicles with multi-contour adaptation, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, Vol. 13, pp. 8921-8928.
22. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Sirotenko M.Yu., Nosko O.E., Yurchenko A.S. Proektirovanie sistem upravleniya robotizirovannykh vozdukhoplavatel'nykh kompleksov na baze dirizhably [Design of control systems for robotic aeronautical systems based on airships], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 3 (58), pp. 160-167.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.Г. Капустян.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: pshichop@ Rambler.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; директор.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Соловьев Виктор Владимирович – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; с.н.с.

Pshikhov Viacheslav Khasanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: pshichop@ Rambler.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371694; dr of eng. sc.; professor; director.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr of eng. sc.; leading researcher.

Solovjev Viktor Vladimirovich – e-mail: soloviev-tti@mail.ru; senior researcher.

УДК 681.283

Е.Я. Рубинович

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИГРА ПООЧЕРЕДНОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ С КРИТЕРИЕМ «ПРОМАХ ПО ИСТИННОЙ ЦЕЛИ»

На плоскости рассматривается дифференциальная игра Γ_{miss} одного преследователя P против двух согласованно уклоняющихся целей E_A и E_B , образующих коалицию, одна из которых – ложная. Игроки обладают простыми движениями. Преследователь, имея преимущество в скорости, не знает, какая из целей является ложной, т.е. обе цели для него идентичны. В задачу преследователя входит поимка истинной цели или минимизация промаха до нее в худшем для преследователя случае, когда первоначально он поймал ложную цель. Оказывается, в игре всегда существует последний момент принятия решения преследователем о начале поочередного преследования, т.е. такой момент θ , начиная с которого порядок поочередного преследования $E_A \rightarrow E_B$ или $E_B \rightarrow E_A$ уже не меняется до конца игры. Специфика постановки состоит в том, что в этот момент θ преследователь теряет из виду вторую по порядку преследования цель i , если первая цель оказывается ложной (что определяется в момент встречи), то единственной информацией о второй цели, которой обладает преследователь, являются ее координаты в момент θ начала поочередного преследования. По этой причине преследователь вынужден двигаться в ту точку, где он видел вторую цель последний раз таким образом, чтобы минимизировать терминальный промах по второй цели в этой точке. Поскольку выбор момента θ начала поочередного преследования осуществляется преследователем, то момент θ является по сути его управлением. Этот момент можно выбирать программно, т.е. в момент $t = 0$ начала игры (при этом очередность встреч фиксируется с самого начала и не меняется до конца игры) или позиционно, т.е. в процессе преследования, как функцию текущих позиций игроков. В рассматриваемой постановке момент θ перехода на поочередное преследование осуществляется позиционно и показывается, что в этом случае собственно этапу поочередного преследования предшествует этап совместного преследования двух целей на интервале $[0, \theta]$, в течение которого преследователь держит цели в условиях неопределенности относительно предстоящего порядка преследования.

Дифференциальная игра; групповая цель; ложная цель; поочередное преследование; терминальный промах.