

## Многорежимная система управления безэкипажного судна с нечеткой гибридизацией регуляторов

*В.Х. Пилюхов, М.Ю. Медведев, В.В. Соловьев*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье рассматривается система управления безэкипажным судном в различных режимах движения. Описана математическая модель судна в плоскости. Рассмотрены три режима: терминальное движение в заданную точку; позиционирование в заданной точке; обход препятствия. На основе метода позиционно-траекторного управления синтезирован регулятор, реализующий заданные режимы движения. Переход от одного режима движения к другому реализуется за счет изменения алгоритма расчета задающих воздействий. В режиме терминального движения желаемая скорость вычисляется по заданному времени движения и расстоянию до желаемой точки. В режиме позиционирования осуществляется переход к вычислению требуемой скорости на основании информации о расстоянии до желаемого положения судна. Для обхода препятствия в желаемый угол ориентации судна добавляется составляющая, генерируемая дополнительным дифференциальным уравнением, решение которого является устойчивым вдали от препятствия, и неустойчивым в области препятствия. Для сопряжения различных режимов движения используется нечеткая логика, позволяющая сгладить переходные режимы и устранить сингулярность в терминальном законе управления. Доказана асимптотическая устойчивость желаемого положения равновесия многорежимной системы управления с нечеткой логикой. Приводятся результаты моделирования и экспериментов с использованием мини-катера.

**Ключевые слова:** управление движением, безэкипажное судно, позиционирование, терминальное управление, обход препятствий, нечеткая логика, многорежимная система управления.

### 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].

## 1. Математическая модель плоского движения судна

Математическая модель движения судна имеет вид [9]:

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

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

$$R = \begin{bmatrix} \cos y_3 & \sin y_3 & 0 \\ -\sin y_3 & \cos y_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F_d = \begin{bmatrix} -m x_2 x_3 - c_{x1} x_1 \\ -m x_1 x_3 - c_{x2} x_2 \\ -m_{x3} x_3 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \\ 01 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix},$$

где  $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$ ;  $y_1, y_2$  – линейные координаты судна в неподвижной системе  $OY_1Y_2$  (рис. 1);  $y_3$  – 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;  $c_{x1}, c_{x2}, m_{x3}$  – положительные коэффициенты сопротивления движению.

Ставится задача разработать алгоритмы управления, обеспечивающие движение судна в заданную область  $\Omega_0$ , 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.

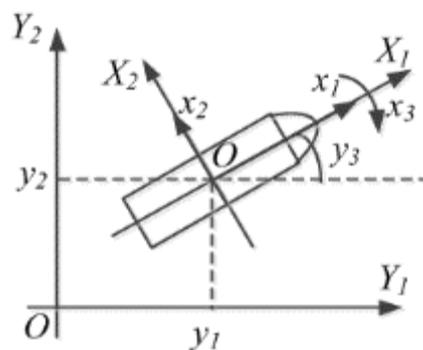


Рис. 1. – Системы координат судна

## 2. 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;  $\Delta y_3$  – угол обхода препятствия, формируемый следующими уравнениями [12]:

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

где  $\xi$  – дополнительная переменная;  $T_\xi$  – постоянный параметр, определяющий значение собственного числа уравнения (8) в устойчивом режиме;  $\beta$  – бифуркационный параметр, делающий траекторию устойчивой вдали от препятствия и неустойчивой в области препятствия;  $\beta_0$  – значение собственного числа уравнения (8) в неустойчивом режиме;  $\text{sat}$  – 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:

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

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

где  $V_k$  – желаемая скорость движения в целевую точку;  $V_k^0$  – желаемая скорость движения в целевую точку при отсутствии препятствий;  $\gamma_r$  – 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  $\mu_{tr}$  и режим обхода препятствия  $\mu_{obs}$ , представленные на рис. 2.

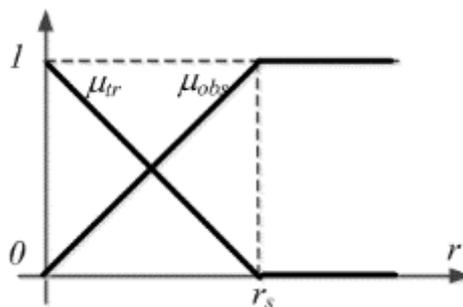


Рис. 2. – Нечеткие входные функции принадлежности

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

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

### 3. 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  $\delta$ у 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):  $\mu_p$  – позиционирование судна;  $\mu_{ter}$  – движение в терминальном режиме.

---

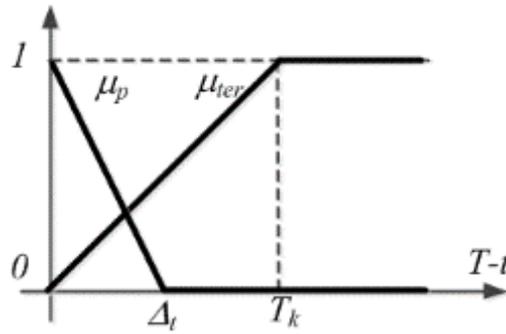


Рис. 3. – Нечеткие входные функции сопряжения терминального режима и режима позиционирования

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)  $x_1^{0p} = \gamma_r r$ , 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:

$$\tilde{y}_1 = y_1^0, \tilde{y}_2 = y_2^0, \tilde{y}_3 = const,$$
$$\tilde{x}_1 = 0, \tilde{x}_2 = 0, \tilde{x}_3 = 0.$$

*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):

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

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:

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

Из четвертого уравнения (16) следует, что  $\tilde{x}_1 = const$ . 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  $\tilde{x}_3 = const$ . 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  $(y_1^0 - \tilde{y}_1), (y_2^0 - \tilde{y}_2)$  независимые [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:

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

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

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

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

*Утверждение доказано.*

#### 4. Результаты моделирования и экспериментов

Исследование полученные алгоритмов 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  $\alpha$ . Двигатели и сервопривод управляются локальными регуляторами, на входы которых подаётся ШИМ-сигнал.



Рис. 4. – Движительный рулевой комплекс мини-корабля

Параметры мини-катера: масса  $m = 50$  кг; момент инерции  $J = 15$  кг·м<sup>2</sup>; коэффициенты сопротивления движения  $c_{x1} = 0.1$ ,  $c_{x2} = 0.7$ ,  $m_{x3} = 0.2$ .

На носу БК установлены три дальномера. Лучи дальномеров расходятся под углом  $30^{\circ}$ . 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.

Начальное положение судна  $(0, 0)$ , конечное положение  $(100, 100)$ , время выполнения задачи  $T_k = 80$  с. Максимальная скорость судна 10 м/с. Безопасное расстояние до препятствия, на котором начинается

маневрирование,  $r_s = 10$  м. Параметры регулятора:  $T_1=25$ ;  $T_2=10$ ;  $T_3=5$ ;  $\gamma_r=0.1$ ;  
 $T_\xi=10$ ;  $\beta_0=1.0$ ;  $\Delta t = 10$  с.

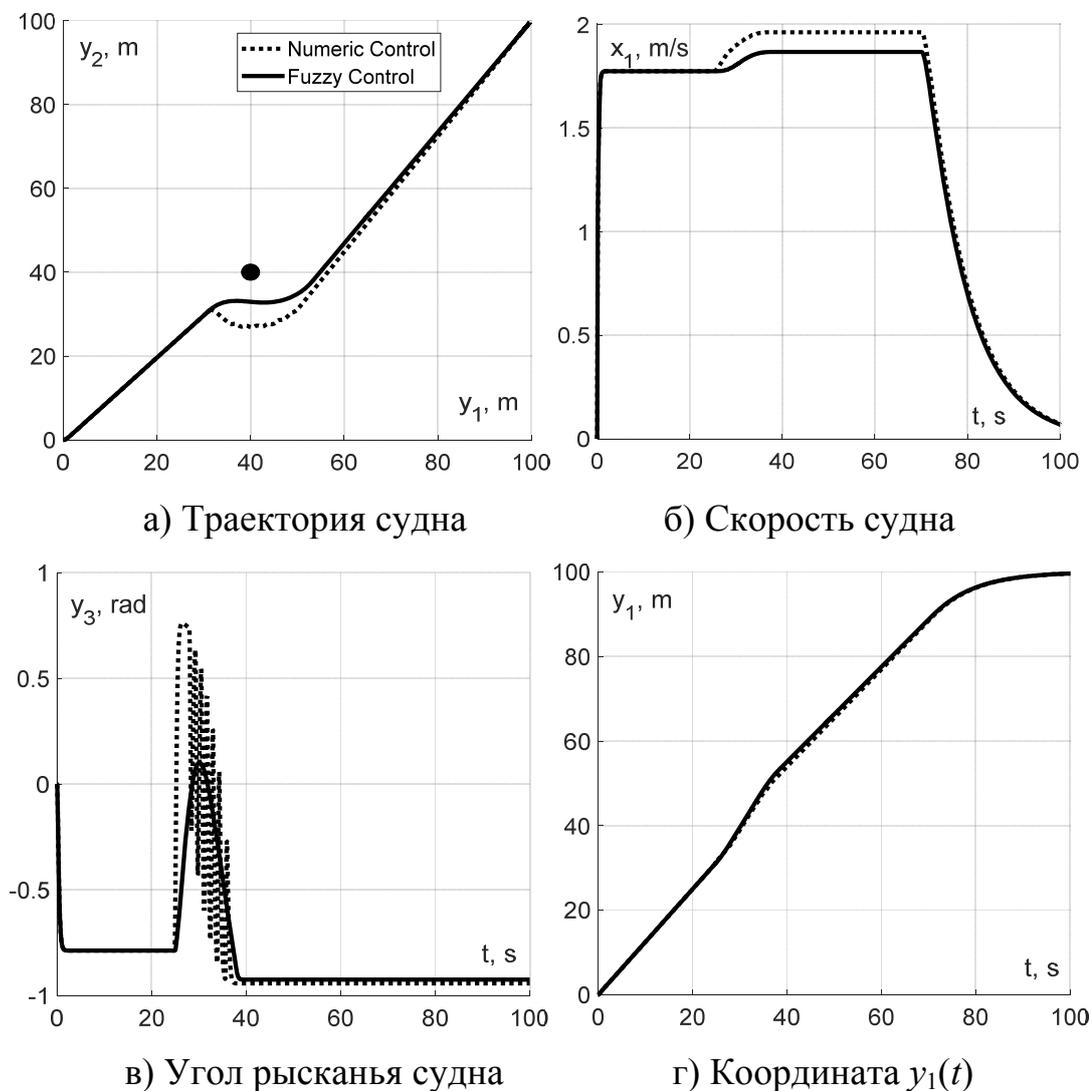


Рис. 5. – Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены при четких границах между режимами (NumericControl) и нечетких границах между режимами (FuzzyControl). 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. 5а и рис. 5в 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.

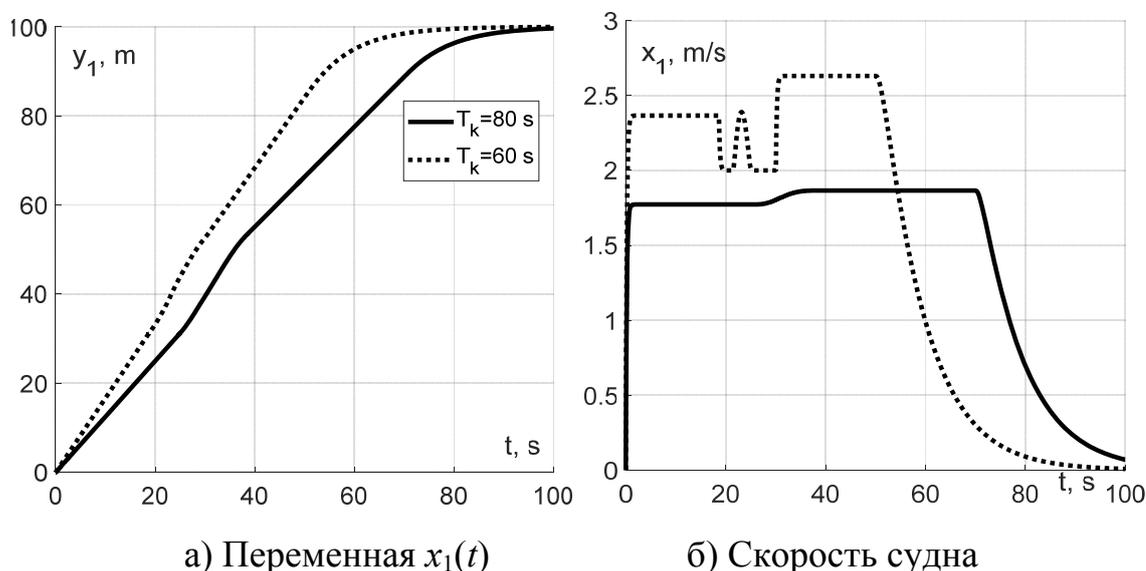


Рис. 6. – Результаты моделирования при разном времени выполнения задачи

Из рис. 6 видно, что уменьшение времени выполнения задачи приводит в 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  $\Delta t$ . Методами численного моделирования проведена оптимизация нечетких

функций, представленных на рис. 3. Изучено влияние параметра  $\Delta t$  на характеристики системы управления и осуществлена его оптимизация. В результате выработана рекомендация выбирать интервал  $\Delta t$  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  $\Delta t_2$ .

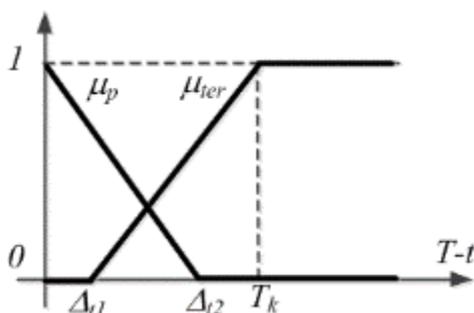


Рис. 7. – Варианты вида нечетких входных функций сопряжения терминального режима и режима позиционирования

На рис. 8 представлены результаты экспериментальных исследований многорежимной 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.

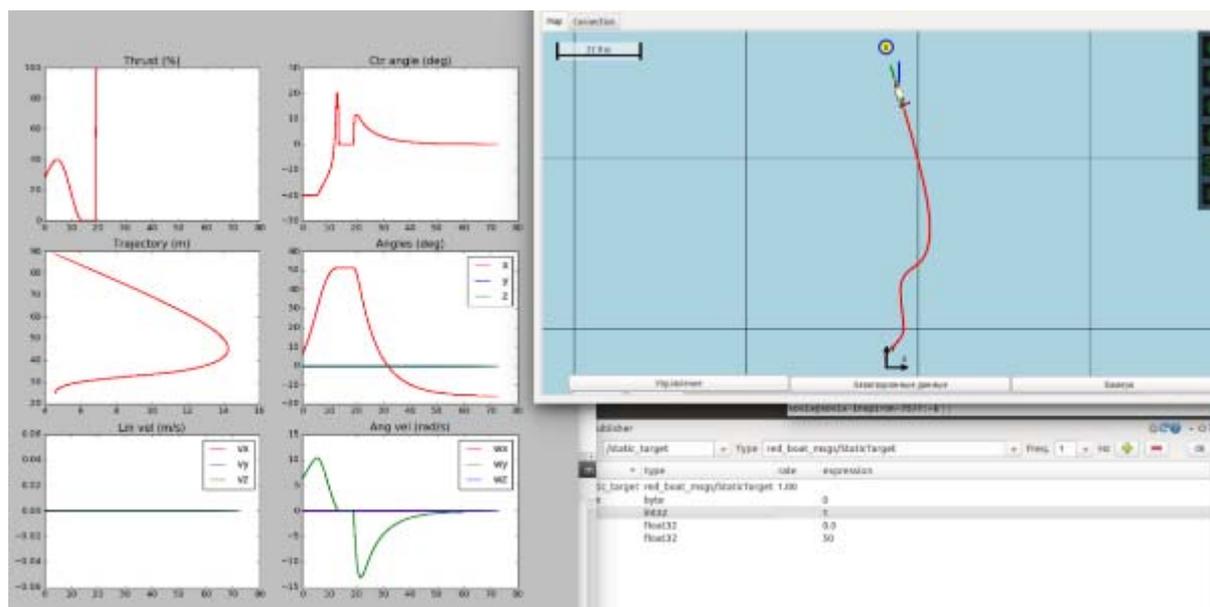


Рис. 8. – Результаты экспериментов для системы управления с нечеткими границами между режимами движения

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.

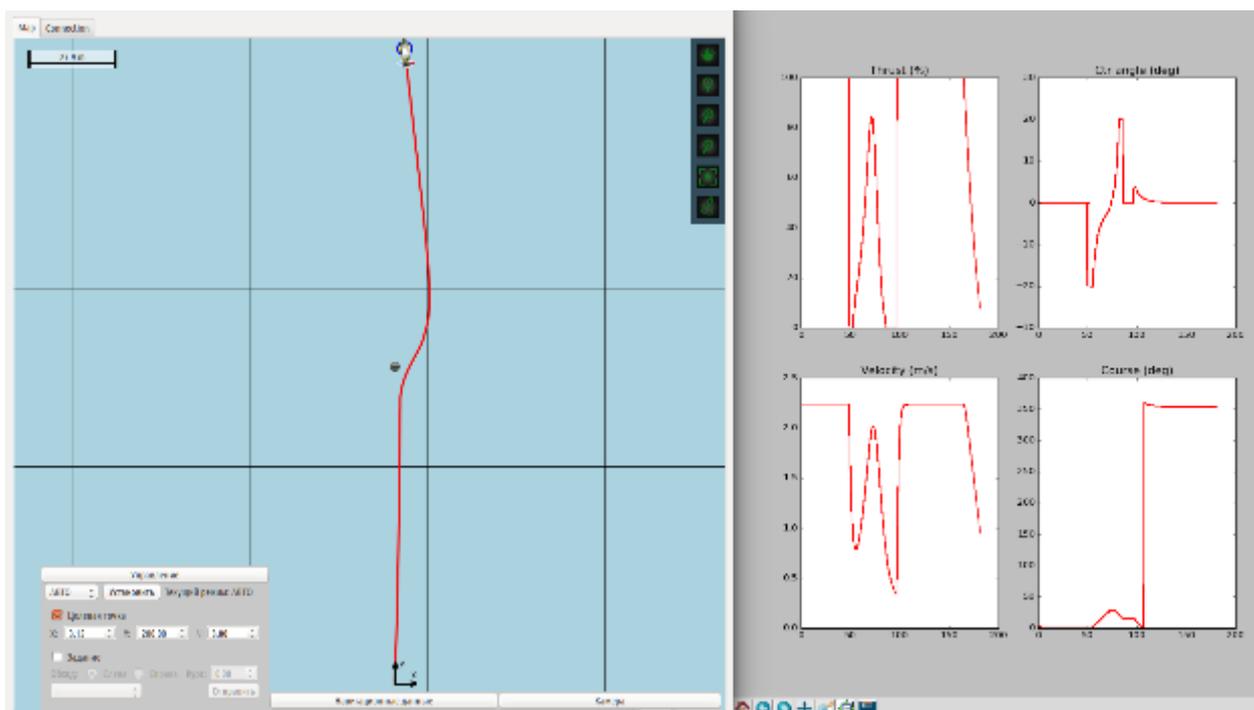


Рис. 9. Результаты экспериментов для системы управления с четкими границами между режимами движения

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 миникатера изменяются более плавно, что благоприятно сказывается на режиме работы приводов и преобразователей.

## 5. 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 режиму 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  $\Delta t$  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] позволяет получить адаптивную многорежимную систему управления подвижным объектом.

### Благодарности

*Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ЮФУ «Разработка теоретических основ и интеллектуальных методов управления терминальным состоянием подвижных объектов в условиях неопределенности» (грант 07/2017-19).*

### Литература

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. (2017). IEEE Journal of Oceanic Engineering, V. 42(2). pp. 458-476.
  2. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. (2016). Annual Reviews in Control, V. 41. pp. 71 – 93.
  3. Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Федоренко Р.В. Разработка планировщика перемещений БЭК на основе неустойчивого режима // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4465](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4465).
  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., Lapierre, L., Zhang, J., Zhang, Q. Survey on Fuzzy-Logic-Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles. (2018). International Journal of Fuzzy Systems. V. 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. (2016). IEEE Transactions on Cybernetics. V. 46(5), pp. 1106-1117.
-

7. Zheng Z., Sun L. Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation. (2016). *Neurocomputing*. V. 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. (2018). *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. V. 26(3), pp. 1083-1090.
9. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В. Разработка и исследование математической модели автономного надводного мини-корабля «Нептун» // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1918](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1918).
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle. (2017). *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*. pp. 1–23.
11. Kokotović, P., Arcak, M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. (2001). *Automatica*. V. 37(5), pp. 637-662.
12. Pshikhopov V., Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes. (2018). *SPIIRAS Proceedings*. V. 5(60). pp. 39-63.
13. Lee C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. (1990). V. 20(2). P. 404-418 (Part I). pp. 419-435 (Part II).
14. Feldbaum A.A. On the distribution of roots of the characteristic equation of the control system. (1948). *Automation and remote control*. V 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. (2015).

IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30.

16. Shikai W., Hongzhang J., Lingwei M. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control. (2016) Chinese Control and Decision Conference. 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. (2017) Indian Control Conference. pp. 443 – 449.

18. Kabanov S.A., Shalygin A.S. Solution of the terminal problem of motion control of aircraft by methods of analytical mechanics. (1992). Automation and Remote Control V. 8. pp. 39-45.

19. Pshikhopov V., Medvedev M., Gurenko B. Algorithms of Terminal Control of Multi-Copters. (2019). Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, V. 20(1). pp. 44-51.

20. Claudio Canuto, Anita Tabacco. Mathematical Analysis I. (2008) Springer-Verlag Italia, P. 435.

21. Pshikhopov V., Medvedev M. Position control of vehicles with multi-contour adaptation. (2018). Journal of Engineering and Applied Sciences, V. 13, pp. 8921 – 8928.

### 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. (2017). IEEE Journal of Oceanic Engineering, V. 42(2). pp. 458-476.

2. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. (2016). Annual Reviews in Control, V. 41. pp. 71 – 93.

3. Medvedev M.Yu, Gurenko B.V., Fedorenko R.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4465](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4465).
  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., Lapierre, L., Zhang, J., Zhang, Q. Survey on Fuzzy-Logic-Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles. (2018). International Journal of Fuzzy Systems. V. 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. (2016). IEEE Transactions on Cybernetics. V. 46(5), pp. 1106-1117.
  7. Zheng Z., Sun L. Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation. (2016). Neurocomputing. V. 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. (2018). IEEE Transactions on Control Systems Technology. V. 26(3), pp. 1083-1090.
  9. Pshikhopov V., Gurenko B. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1918](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1918).
  10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-PathControlofaVehicle. (2017). Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments. pp. 1–23.
  11. Kokotović, P., Arcač, M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. (2001). Automatica. V. 37(5), pp. 637-662.
-



12. Pshikhopov V., Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes. (2018). SPIIRAS Proceedings. V. 5(60). pp. 39-63.
  13. Lee C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. (1990). V. 20(2). P. 404-418 (Part I). pp. 419-435 (Part II).
  14. Feldbaum A.A. On the distribution of roots of the characteristic equation of the control system. (1948). Automation and remote control. V 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. (2015). IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pp. 25-30.
  16. Shikai W., Hongzhang J., Lingwei M. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control. (2016) Chinese Control and Decision Conference. 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. (2017) Indian Control Conference. pp. 443 – 449.
  18. Kabanov S.A., Shalygin A.S. Solution of the terminal problem of motion control of aircraft by methods of analytical mechanics. (1992). Automation and Remote Control V. 8. pp. 39-45.
  19. Pshikhopov V., Medvedev M., Gurenko B. Algorithms of Terminal Control of Multi-Copters. (2019). Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, V. 20(1). pp. 44-51.
  20. Claudio Canuto, Anita Tabacco. Mathematical Analysis I. (2008) Springer-Verlag Italia, P. 435.
-



21. Pshikhov V., Medvedev M. Position control of vehicles with multi-contour adaptation. (2018). Journal of Engineering and Applied Sciences, V. 13, pp. 8921 – 8928.