

Математическое моделирование траекторного управления движением подводного бионического робота-разведчика типа «каракатица»

Б.В. Лушников¹ ✉, В.В. Трофимов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: bvl_61@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка и реализация алгоритма траекторного управления автономного необитаемого подводного аппарата бионического типа каракатица, предназначенного для проведения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-морского флота.

Методы. Представлена конструкция и принцип действия бионического подводного робота типа каракатица. Проектирование трехмерной модели робота-каракатицы для военной разведки проводилось посредством использования программного пакета SolidWorks. Рассмотрена расчетная динамическая схема и представлена математическая модель движения подводного плавающего робота, реализованная в пакете Mathcad. Движение робота обеспечивается волнообразными перемещениями эластичных боковых плавников, упирающимися на водную среду и формирующими тяговые усилия в требуемом направлении. Методами компьютерного математического моделирования доказана адекватность разработанной математической модели подводного робота и отработан алгоритм траекторного управления движением объекта по заданной траектории с требуемой скоростью.

Результаты. Система автоматического управления траекторным движением рассмотрена на примере движения робота в горизонтальной плоскости с выходом на заданную прямолинейную траекторию и поддержания требуемого режима продольного движения с заданной скоростью. Для этого были сформированы каналы управления силами тяги, создаваемыми волнообразными движениями боковых плавников, по угловой и ортогональной ошибкам. Подобраны коэффициенты регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость системы и требуемое качество переходных процессов.

Заключение. Разработанный и реализованный алгоритм траекторного управления движением подводного бионического робота типа каракатица из различных начальных положений по заданной траектории показал хорошую адекватность и высокую эффективность, демонстрируя устойчивость и обеспечивая требуемые показатели качества переходных процессов.

Ключевые слова: бионический подводный робот; траекторное управление движением; математическое моделирование; система автоматического управления

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Лушников Б.В., Трофимов В.В. Математическое моделирование траекторного управления движением подводного бионического робота-разведчика типа «каракатица» // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 106-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-106-121>.

Поступила в редакцию 08.04.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

© Лушников Б.В., Трофимов В.В., 2022

Mathematical Modelling of the Trajectory Control of the movement of a Cuttlefish-Type Undersea Bionic Reconnaissance Robot

Boris V. Lushnikov ¹ ✉, Vladimir V. Trofimov ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: bvl_61@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. is to develop and implement an algorithm for trajectory control of an autonomous unmanned undersea cuttlefish-type bionic vehicle, designed for reconnaissance operations, combat security of surface and undersea naval armament.

Methods. The design and principle of operation of a cuttlefish-type bionic undersea robot are presented. The design of a three-dimensional model of a cuttlefish-type robot for military intelligence has been carried out using the SolidWorks software package. A computational dynamic scheme has been considered and a mathematical model of the movement of an undersea amphibious robot implemented in the Mathcad package has been presented. The movement of the robot is provided by wave-like movements of the elastic side fins resting against the aquatic environment and forming tractive forces in the required direction. Using the methods of computer mathematical modelling, the adequacy of the developed mathematical model of the undersea robot has been proved and the algorithm for trajectory control of the movement of the object along a given trajectory at a required speed has been worked out.

Results. The system of automatic control of the trajectory movement has been considered for the case of the movement of the robot in a horizontal plane with further passage to a given linear trajectory and maintaining the required mode of longitudinal movement at a given speed. To do this, channels to control tractive forces created by the wave-like movements of the lateral fins have been formed according to the angular and orthogonal errors. The coefficients of the controllers have been selected to ensure the asymptotic stability of the system and the required quality of transient processes.

Conclusion. The developed and implemented algorithm for trajectory control of the movement of an undersea cuttlefish-type bionic robot from various initial positions along a given trajectory showed good adequacy and high effectiveness demonstrating stability and providing the required indicators of the quality of transient processes.

Keywords: bionic undersea robot; trajectory movement control; math modelling; automatic control system.

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

For citation: Lushnikov B. V., Trofimov V. V. Mathematical Modelling of the Trajectory Control of the movement of a Cuttlefish-Type Undersea Bionic Reconnaissance Robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 106-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-106-121>.

Received 08.04.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Развитие автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) становится всё более перспективным. АНПА показали свою эффективность при выполнении различного рода работ в Мировом океане от обзорно-поисковых до разведывательных, открыли ряд новых важных применений. К настоящему времени насчитывается около 700-800

различных проектов АНПА, при этом число всех созданных аппаратов уже превысило 5000 [1]. Мировыми лидерами в разработке и производстве АНПА являются США, Великобритания, Канада, Франция, Германия и Япония, причем подводные роботы военного или двойного назначения составляют внушительные сегменты рынка (рис. 1) [2].

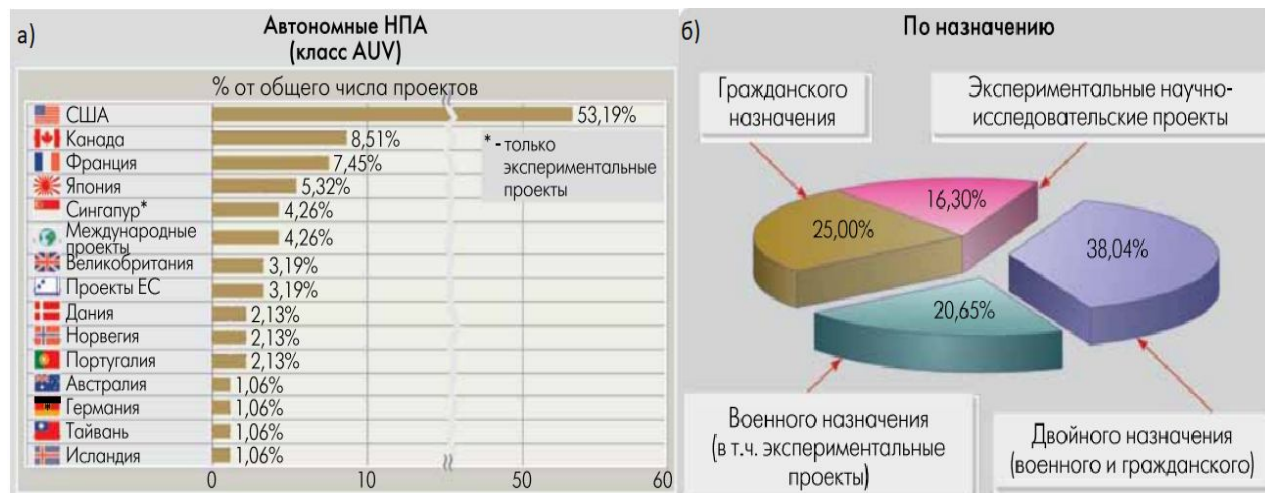


Рис. 1. Характеристика активности зарубежных стран в разработках АНПА по числу проектов (а) и по назначению (б) [1,2]

Fig. 1. Characteristics of foreign countries activities in the development of unmanned undersea vehicle by the number of projects (a) and by purpose (b)

Создание отечественного аналога малогабаритного подводного робота как автоматизированного средства мониторинга, разведки и боевого охранения при выполнении боевых операций Военно-морского флота Российской Федерации в различных условиях и местах Мирового океана повысило бы конкурентоспособность России в мировой гонке вооружений в сфере робототехники. Это приве-

дет к повышению качества разведывательных операций, снижению количества потерь живой силы и является актуальной задачей для обеспечения обороноспособности РФ.

Главным требованием к средствам разведки в настоящий момент является скрытность выполнения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-

морского флота с помощью мобильных подводных аппаратов при минимизации воздействия их на окружающую среду и умении быстро реагировать на изменение окружающих условий [3].

Разработка и реализация максимально энергоэффективного типа движения занимает умы инженеров на протяжении последних десятилетий [4, 5]. Классические технические решения для обеспечения движения, придуманные человечеством (колеса, гусеницы, воздушные винты и т.д.), не всегда являются конкурентно способными с точки зрения расхода энергии на проходимый километр по сравнению с бионическими принципами движения, рожденными самой природой в ходе эволюции [6]. Поэтому использование типов движения, которыми пользуются животные – самые энергоэффективные «механизмы» на планете, является весьма перспективной задачей, решением которой занимается новое, активно развивающееся направление науки и техники – бионика. Имитация или копирование принципов поведения живых организмов позволяет создавать устройства, которые обладают уникальными свойствами, обеспечивающими повышение эффективности и скрытности перемещения под водой и выполнения разведывательных операций [7-13].

Одним из наиболее интересных механизмов движения обладают каракатицы. При помощи плавных волнообразных движений своих плавников они могут преодолевать большие расстояния

под водой, при этом растрачивая небольшие запасы своей энергии, добыча которой на глубинах затруднена [14].

Технически принцип работы волнового движителя в предлагаемой механической конструкции робота-каракатицы заключается в том, что коленчатый вал, который приводится во вращение электродвигателем, создаёт колебательное движение выходных звеньев (спиц), на которых установлены эластичные плавники. Получаемые волнообразные движения плавников, которые опираются на окружающую водную среду, создают силу тяги в заданном направлении. Данных о наличии в Российской Федерации аналогов такого вида движителя и конструкции аппарата по предлагаемым техническим решениям не имеется.

Материалы и методы

Конструкция и принцип действия АНПА типа «каракатица»

Проектирование трёхмерной модели робота-каракатицы для военной разведки проводилось посредством использования программного пакета SolidWorks. В процессе проектирования были учтены такие параметры, как форма и размеры корпуса робота, подходящие материалы, максимально допустимая масса устройства, обеспечение герметичности на требуемой глубине и т.д.

На рис. 2 представлен внешний вид трёхмерной модели робота-каракатицы, реализованной в среде SolidWorks.

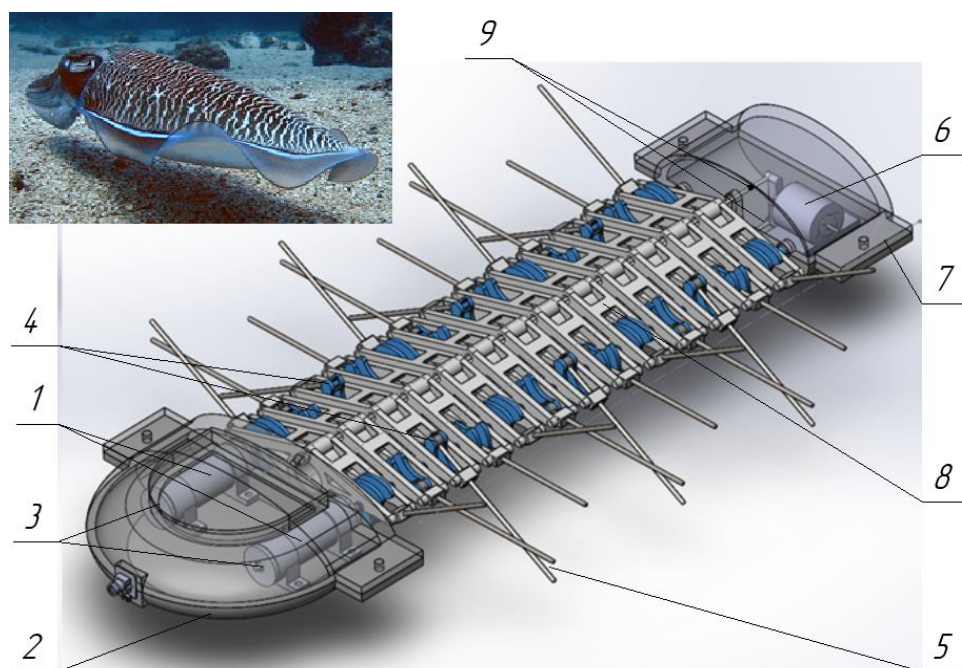


Рис. 2. Трёхмерная модель робота-каракатицы

Fig. 2. 3-D model of a cuttlefish-type robot

Робот-каракатица приводится в движение двумя приводами (1), отвечающими за вращение коленчатых валов и состоящими из коллекторных ДПТ и планетарных редукторов компании Махон, расположенных в головной части робота (2). На измерительном валу каждого двигателя установлен магнитный инкрементальный энкодер (3), который считает обороты и передает эти данные на микроконтроллер. Информация об угловой скорости используется для формирования управляющего воздействия (величины ШИМ – сигнала) для драйвера ДПТ, который непосредственно регулирует обороты и режимы работы двигателей.

Во время поворота или обхода препятствия в горизонтальной плоскости

информация с датчиков позволяет находящемуся на управляющей плате микроконтроллеру определять необходимые угловые скорости коленчатых валов (4), приводящие в движение спицы (5), которые, в свою очередь, обеспечивают волнообразное движение гибких боковых пластин (плавников) (на рисунке не показаны).

Для возможности динамического погружения или всплытия робота используется привод (6), расположенный в хвостовой части робота (7), который обеспечивает изгиб позвоночника (8) за счёт осуществления натяжения упругих струн (9), проходящих вдоль тела робота и закрепленных в задней части головы робота.

Вся информационно-управляющая система построена на базе платы Arduino MEGA, микроконтроллера, которой формирует все управляющие сигналы, обрабатывает информацию с приводов и датчиков окружающей среды (УЗ – дальномеры, датчики угла поворота, давления, система навигации и приёма команд и камера) [15-16]. Работа с энкодерами и УЗ – дальномерами реализована через внешние прерыва-

ния, остальные датчики, как и программа движения робота, обрабатываются в основном программном цикле.

Расчетная динамическая схема и математическая модель движения устройства

Для получения и исследования математической модели рассматриваемого устройства была использована расчетная динамическая схема, представленная на рис. 3.

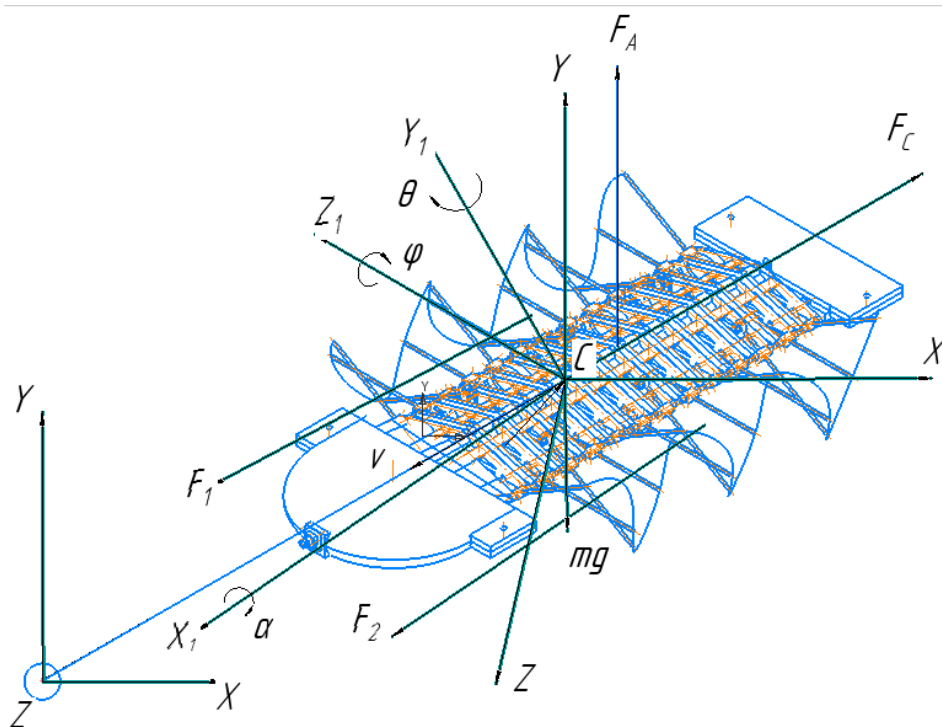


Рис. 3. Расчётная динамическая схема робота

Fig.3. Dynamic design diagram of the robot

Положение робота в пространстве будет определяться координатами центра масс «тела» робота (X ; Y ; Z), и углами Эйлера α (угол крена), θ (угол курса) и φ (угол тангажа) поворота вокруг осей X , Y и Z соответственно. Также введена система относительных ко-

ординат, связанных с центром тяжести (X_1 ; Y_1 ; Z_1). Установившееся значение угла крена (φ) вокруг оси X будем принимать равным нулю вследствие обеспечения безусловной устойчивости робота, в результате действия момента, создаваемого силой тяжести и силой

Архимеда, приложенной в центре объёма (рис.3) [17-18].

Движение робота происходит благодаря сил тяги, возникающих при волнообразном движении боковых плавников за счёт вращения коленчатых валов с угловыми скоростями ω_i

$$F_i(\omega_i) = \beta \omega_i^2 \text{sign}(\omega_i), i=1,2; \quad (1)$$

где β – коэффициент, учитывающий геометрические особенности плавников и плотность среды.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение рассматриваемого устройства, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{1x}(\omega_1) + F_{2x}(\omega_2) + F_{\text{сопр}}^x(\dot{x}) \\ m\ddot{y} = F_{1y}(\omega_1) + F_{2y}(\omega_2) + F_{\text{сопр}}^y(\dot{y}) - mg + F_A \\ m\ddot{z} = F_{1z}(\omega_1) + F_{2z}(\omega_2) - F_{\text{сопр}}^z(\dot{z}) \\ J_x \ddot{\alpha} = M(mg) + M(F_A) + M_{\text{сопр}}(\dot{\alpha}) = 0 \\ J_y \ddot{\theta} = M(F_1, F_2) + M_{\text{сопр}}(\dot{\theta}) \\ J_z \ddot{\phi} = M(mg) + M(F_A) + M_{\text{сопр}}(\dot{\phi}), \end{cases} \quad (2)$$

где m, J_x, J_y, J_z – масса робота и его моменты инерции относительно осей x, y и z ; $(x, y, z, \alpha, \theta, \phi)^T$ – вектор обобщенных координат; $F_{1x}, F_{1y}, F_{1z}, F_{2x}, F_{2y}, F_{2z}$ – проекции сил тяги, создаваемых, соответственно, правым и левым плавниками, на оси координат x, y, z ; ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения правого и левого коленчатых валов приводов плавников; F_A – архимедова сила; $F_{\text{сопр}}^x(\dot{x}), F_{\text{сопр}}^y(\dot{y}), F_{\text{сопр}}^z(\dot{z})$ – проекции вязкого сил сопротивления движению робота в водной среде на оси x, y, z ; $M(F_1, F_2) = (F_1 - F_2)l$ – момент от сил тяги плавников, обеспечивающий повороты робота в горизонтальной плоскости (вокруг оси y),

остальные моменты вызваны действием соответствующих указанных сил.

Так как движение в горизонтальной и вертикальной плоскости происходит независимо друг от друга, рассмотрим движение робота на плоскости, исключив из анализа погружение и всплытие робота (рис.4).

Положение корпуса робота (см. рис.4) как твёрдого тела на плоскости характеризуется координатами $(x; y)$ и α , где $(x; y)$ – вектор декартовых координат центра масс C , α – угловая ориентация продольной оси робота с осью x .

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение робота на плоскости, имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \sum F_{x_i} = \left(\frac{F_1 + F_2}{2}\right) \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^x \\ m\ddot{y} = \sum F_{y_i} = \left(\frac{F_1 + F_2}{2}\right) \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^y \\ J \ddot{\alpha} = (F_1 - F_2)l + \mu \dot{\alpha} |\dot{\alpha}|, \end{cases} \quad (3)$$

где μ – коэффициент вязкого сопротивления вращению корпуса робота относительно вертикальной оси; l – расстояние между левым и правым плавниками.

Силы сопротивления при движении робота в водной среде определяются выражениями:

$$\begin{aligned} F_{\text{сопр}}^{x1} &= -k_1 \cdot u_{x1} \cdot |u_{x1}| \\ F_{\text{сопр}}^{y1} &= -k_2 \cdot u_{y1} \cdot |u_{y1}|, \end{aligned}$$

где $F_{\text{сопр}}^{x1}, F_{\text{сопр}}^{y1}$ – проекции силы сопротивления на локальные оси координат x_1 (продольную) и y_1 (поперечную) соответственно; k_1, k_2 – коэффициенты сопротивления среды; u_{x1}, u_{y1} – проекции линейной скорости движения центра масс робота на оси координат x_1 и y_1

соответственно, которые определяются по формулам:

$$\begin{aligned} u_{x1} &= \dot{x} \cdot \cos \alpha + \dot{y} \cdot \sin \alpha, \\ u_{y1} &= -\dot{x} \cdot \sin \alpha + \dot{y} \cdot \cos \alpha. \end{aligned}$$

Таким образом, проекции сил сопротивления среды будут задаваться выражениями:

$$\begin{cases} F_{\text{сопр}}^{x1} = -k_1 (\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha) \cdot |\dot{x} \cos \alpha + \dot{y} \sin \alpha| \\ F_{\text{сопр}}^{y1} = -k_2 (-\dot{x} \sin \alpha + \dot{y} \cos \alpha) \cdot |-\dot{x} \sin \alpha + \dot{y} \cos \alpha|, \end{cases} \quad (4)$$

а система дифференциальных уравнений (3) примет вид

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} \left[\left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \cdot \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^{x1} \cdot \cos \alpha + F_{\text{сопр}}^{y1} \cdot \sin \alpha \right] \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} \left[\left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \cdot \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^{x1} \cdot \sin \alpha + F_{\text{сопр}}^{y1} \cdot \cos \alpha \right] \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{J} (l \cdot (F_1 - F_2) - \mu_c \cdot \dot{\alpha} \cdot |\dot{\alpha}|) \end{cases} \quad (5)$$

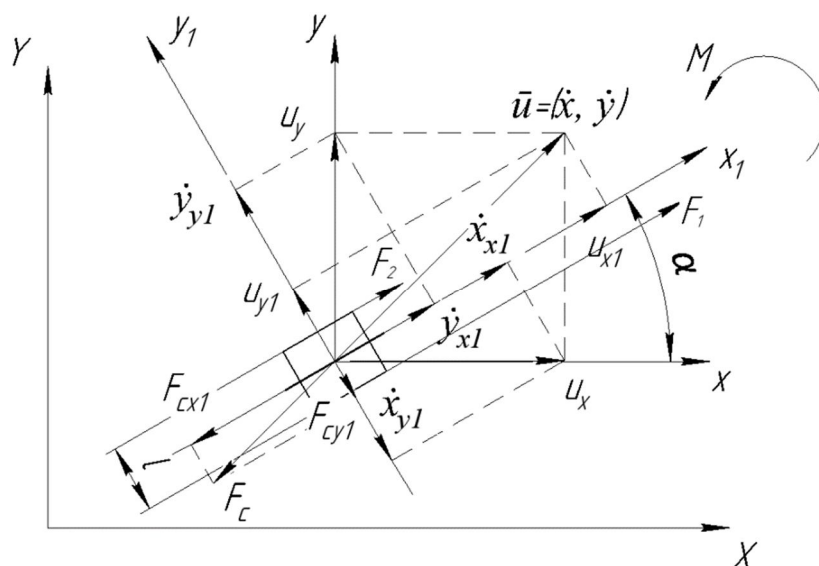


Рис. 4. Расчетная динамическая схема движения робота-каракатицы в горизонтальной плоскости

Fig. 4. Dynamic design diagram of the cuttlefish-type robot movement in the horizontal plane

Полученная система (5) с учётом (4) определяет движение робота в горизонтальной плоскости под действием движущих сил тяги F_1 и F_2 , возникающих от волнообразного движения плавников.

Моделирование управления траекторным движением робота

Для обеспечения движения подводного робота по заранее спланированной

траектории будем использовать хорошо зарекомендовавший себя известный подход по траекторному управлению плоским движением автономных роботов по предписанной траектории с определенной скоростью [19]. При рассматриваемом подходе сложная многоканальная задача управления сводится к ряду простых задач компенсации линейных и угловых отклонений и ис-

пользовании стандартных приёмов нелинейной стабилизации [20] для получения адекватных законов управления.

Рассмотрим алгоритм процесса управления на примере движения робота из заданной начальной точки и с нулевой начальной скоростью на прямолинейную траекторию вида (рис. 5):

$$Ay+Bx+C=0 \quad (6)$$

и дальнейшего его движения с заданной, например, постоянной скоростью $v^* = \text{const}$. Для управления траекторным движением автономного робота введём понятия ошибок траекторного движения. Ошибку положения будем определять ортогональным отклонением

ем $e = e(x, y)$ как кратчайшим расстоянием от текущего положения робота до желаемой траектории движения (6). Угловая ошибка ориентации корпуса робота будет определяться разностью угла текущего положения робота и угла наклона прямой α^* к мировой системе координат $\delta = \alpha - \alpha^*$, где $\alpha^* = \arctg \frac{B}{A}$.

Тогда ошибка положения робота относительно прямой (6) (рис.5), заданной в неявном виде, как кратчайшее расстояние d от текущего положения робота с координатами (x, y) до этой прямой, будет определять выражением

$$d = e(x, y) = \frac{A \cdot y + B \cdot x + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

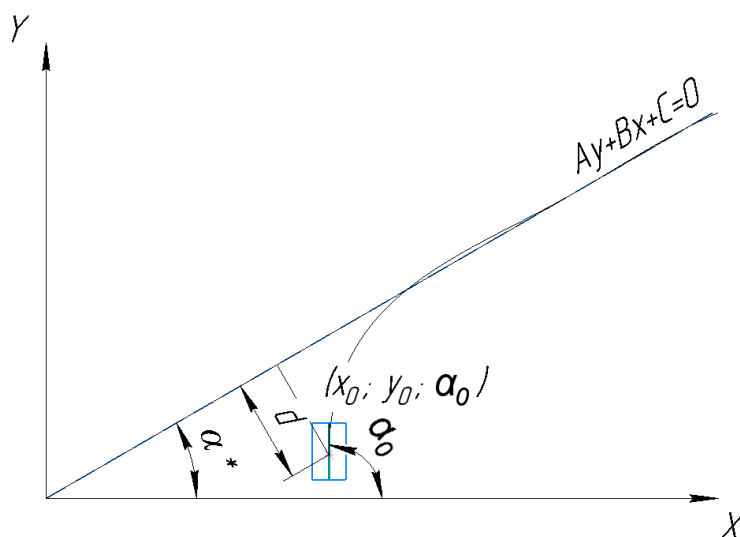


Рис. 5. Схема выхода робота на прямолинейную траектории из начального положения

Fig. 5. The diagram of robot passage to linear trajectory from initial position

Пусть, например, задана требуемая траектория движения $y=x$, для которой коэффициенты $A=1, B=-1, C=0$.

Тогда ошибка по положению равна

$$d=e(x,y)=\frac{y-x}{\sqrt{2}}=\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot y - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot x,$$

а угловая ошибка $\delta = \alpha - \pi/4$. Выражения их производных по времени как скорости изменения ошибок будут, соответственно, иметь вид

$$\frac{de}{dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{x}, \quad \frac{d\delta}{dt} = \dot{\alpha}.$$

Таким образом, задача траекторного управления автономным роботом будет заключаться в определении сил тяги боковых плавников F_1 и F_2 , формируемых в соответствии с выражениями (1), которые обеспечивают:

(а) максимально быстрый выход робота на требуемую прямолинейную траекторию $A \cdot y + B \cdot x + C = 0$, что подразумевает обнуление вектора ортогонального отклонения d ;

(б) поддержание требуемого режима продольного движения объекта по желаемой прямолинейной траектории с обнулением скоростной ошибки:

$\Delta\theta = v^* \cdot \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, где $v^* = \text{const}$ – требуемое значение скорости движения робота по заданной траектории.

Исходя из алгоритмов управления продольным и поперечным движением, представленным в [19], получим систему уравнений, описывающую алгоритм управления траекторным движением автономного робота. Реализация принятого алгоритма предусматривает необходимость измерений относительного положения, ориентации системы и фактической скорости движения (отклонений ϵ , δ , и ΔV):

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} \left[k_s \cdot \left[\theta^* - \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right] \cdot \cos \alpha + k_1 \cdot F_{cx1} \cdot \cos \alpha + k_2 \cdot F_{cy1} \cdot \sin \alpha \right] \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} \left[k_s \cdot \left[\theta^* - \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right] \cdot \sin \alpha + k_1 \cdot F_{cx1} \cdot \sin \alpha + k_2 \cdot F_{cy1} \cdot \cos \alpha \right], \\ \ddot{\alpha} = \frac{1}{J} \left[\frac{1}{\theta^*} \left[k_{e1} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{y} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \dot{x} \right) + k_{e2} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot y - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot x \right) \right] + k_{\delta 1} \cdot \dot{\alpha} + \right. \\ \left. + k_{\delta 2} \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) - \mu_c \cdot \dot{\alpha} \cdot |\dot{\alpha}| \right] \end{cases} \quad (7)$$

где k_s , k_{e1} , k_{e2} , $k_{\delta 1}$, $k_{\delta 2}$ – коэффициенты пропорциональных и дифференциальных составляющих регуляторов, которые назначаются из условия обеспечения асимптотической устойчивости системы (7) и требуемых качественных показателей переходных процессов.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования системы (7) управления движением автономного робота, реализованные средствами математического пакета Mathcad, из

различных начальных положений робота с координатами $x_0 = 20$, $y_0 = 0$, $\alpha_0 = \pi$ и $x_0 = 10$, $y_0 = 35$, $\alpha_0 = \pi$ представлены на рис.6, демонстрируют устойчивость системы и хорошие качественные показатели траекторного управления робота.

На рис.7 представлены графики изменения ортогональной (а) и угловой (б) ошибок во времени, которые свидетельствуют об асимптотическом достижении ими нулевых значений без перерегулирования примерно за 50 с.

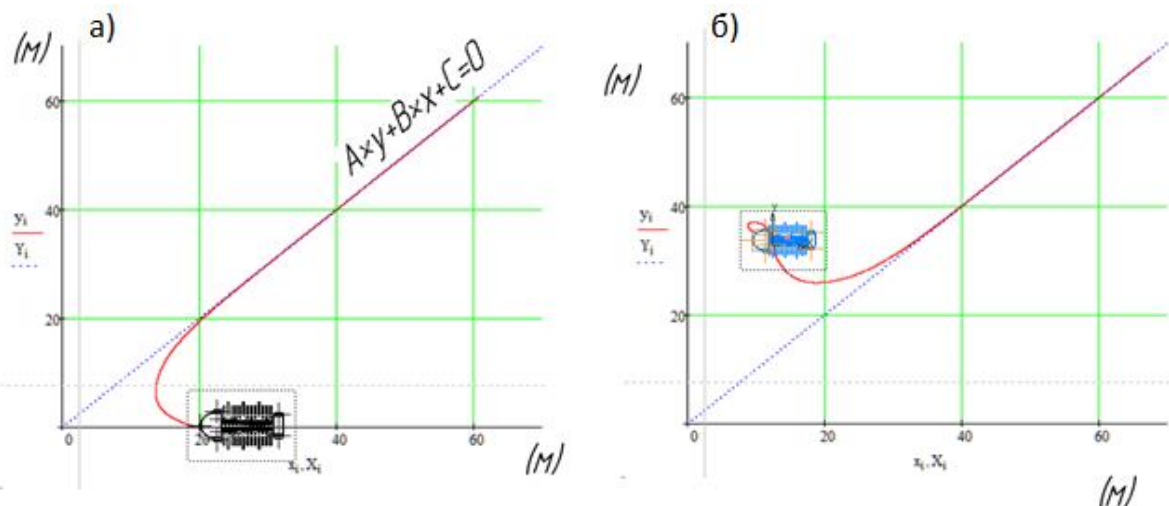


Рис. 6. Траектории движения робота из различных начальных положений:

а – $x_0=20$, $y_0=0$, $\alpha_0=\pi$; **б** – $x_0=10$, $y_0=35$, $\alpha_0=\pi$

Fig. 6. Robot trajectories from different starting positions:

а – $x_0=20$, $y_0=0$, $\alpha_0=\pi$; **б** – $x_0=10$, $y_0=35$, $\alpha_0=\pi$

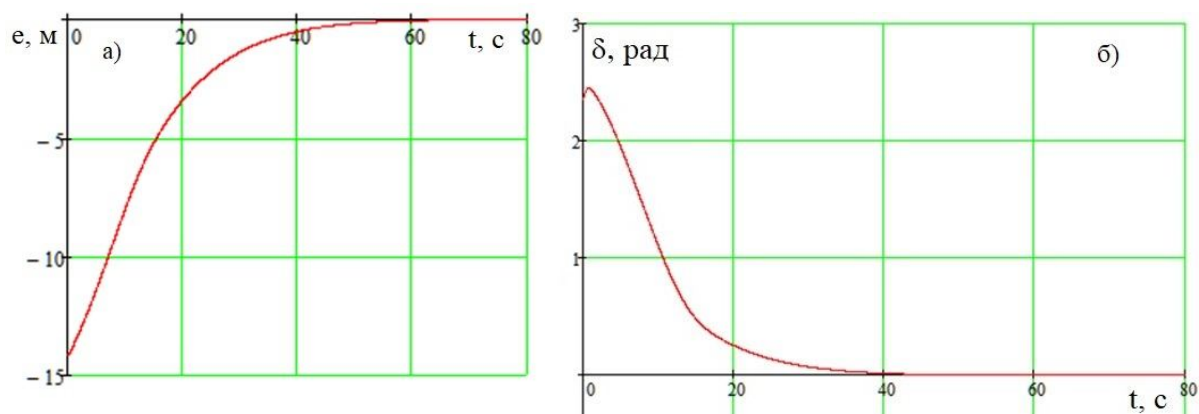


Рис. 7. Графики изменения во времени $e(t)$ – ортогональной (а) и $\delta(t)$ –угловой (б) ошибок

Fig. 7. Diagram of time change $e(t)$ – orthogonal (а) and $\delta(t)$ – angular (б) errors

На рис. 8 показаны графики изменения сил продольного (а) и поперечного (б) сопротивления во время выхода робота на заданную траекторию. Как видно из анализа этих зависимостей, по окончании маневрирования продольная сила сопротивления становится равной нулю, а поперечная – принимает установившееся значение вследствие движения с постоянной скоростью.

Таким образом, постановка и реализация задачи траекторного управления движением бионического подводного робота средствами компьютерного математического моделирования выполнена успешно с достаточной степенью адекватности и достижением требуемых качественных и количественных характеристик.

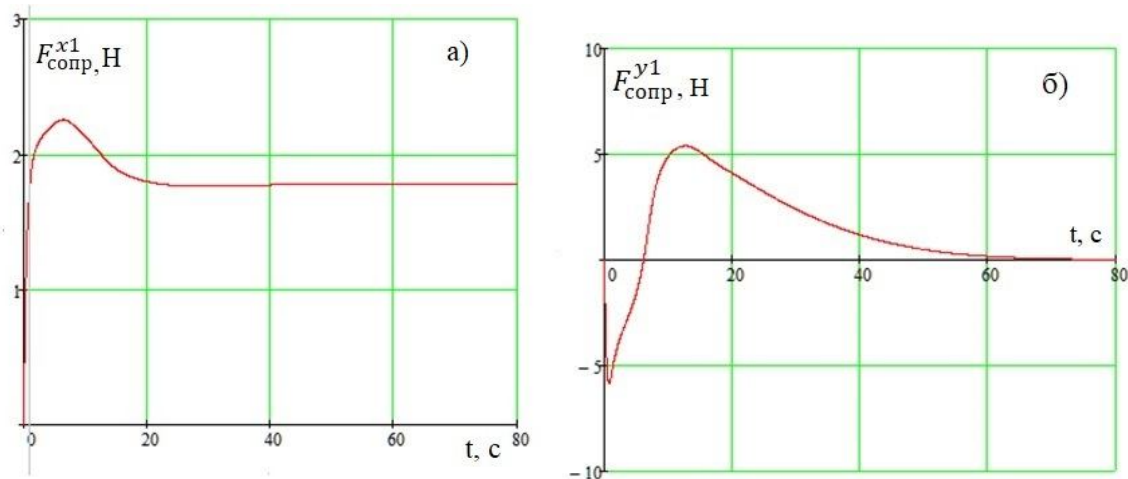


Рис. 8. Графики изменения сил продольного (а) и поперечного (б) сопротивления движению робота во времени

Fig. 8. Diagrams of the change in forces of longitudinal (а) and transverse (б) resistance to robot movement over time

Выводы

В работе рассмотрена реализация алгоритма траекторного управления АНПА бионического типа «каракатица», предназначенного для проведения разведывательных операций, боевого охранения надводных и подводных средств военно-морского флота. Представлена математическая модель движения подводного плавающего робота, реализованная в пакете Mathcad.

Система автоматического управления траекторным движением рассмотрена на примере движения робота в горизонтальной плоскости с выходом на заданную прямолинейную траекторию

и поддержания требуемого режима продольного движения с заданной скоростью. Для этого были сформированы каналы управления силами тяги, создаваемыми волнообразными движениями боковых плавников, по угловой и ортогональной ошибкам, подобраны коэффициенты регуляторов, обеспечивающие асимптотическую устойчивость системы.

Результаты моделирования показывают хорошую адекватность представленного алгоритма управления движением из различных начальных положений, демонстрируя устойчивость и требуемые показатели качества переходных процессов траекторного движения робота.

Список литературы

1. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/286>.
2. Бочаров Б.Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития// *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2009, №7(97): 62-69.

3. Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ / С.Ф. Яцун, В.И. Королёв, В.Е. Бондырев, Б.В. Лушников // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2019, 1(203): 98-109.
4. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
5. Гафуров С.А., Салмина В.А. Классификация автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: матер. одиннадцатой Всеросс. науч.-практ. конф.; в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 110-128.
6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // *Подводные исследования и робототехника*. 2012, 1 (13): 24-35.
7. Clair. Multi-UUV Missions Using Ranger MicroUUVs / Bryan Schulz, Brett Hobson, Mathieu Kemp, Jim Meyer, Ryan Moody, Heather Pinnix, Mathew St. // Nekton Research, LLC. 4625 Industry Lane Durham, NC 27713.
8. Madeleine: An agile AUV propelled by flexible fins. URL: https://www.researchgate.net/publication/229428877_Madeleine_An_agile_AUV_propelled_by_flexible_fins.
9. Mason R.J., J. W. Burdick Experiments in Carangiform Robotic Fish Locomotion // *Proc. of the 2000 ICRA*, 2000, pp. 428-435.
10. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion / K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001. pp. 427-434.
11. An Amphibious Autonomous Robot. URL: https://www.researchgate.net/publication/2961702_AQUA_An_amphibious_autonomous_robot.
12. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype / S. Jatsun, B. Lushnikov, E. Politov, S. Knyazev // *MATEC Web of Conferences*. 2017, 02014.
13. Конструктивные особенности бионического робота-рыбы / С.Ф. Яцун, Б.В. Лушников, К.Г. Казарян, Л.Ю. Ворочаева, Ворочаев А.В. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии*. 2017, 2(23): 94-102.
14. Autonomous Underwater Vehicle "Cuttlefish" // *Marine Technology Reporter*, May-June 2005, P. 51-53.
15. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 272 с.
16. Политов Е.Н., Лушников Б.В., Яцун С.Ф. Управление рыбоподобным робототехническим устройством для мониторинга объектов в гидросфере // Перспективные системы и задачи управления: материалы одиннадцатой Всероссийской научно-

практической конференции "Управление и обработка информации в технических системах". Ростов-на-Дону, 2016. С. 208-222.

17. Porez M., Boyer F., Ijspeert A.J. Improved light hill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons // *Int. J. Robot. Res.* 2014;33(10):1322-41.

18. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // *Autonomous Robots*. 2000. 8(1): 7-24.

19. Мирошник И.В., Шалаев А.Н. Управление траекторным движением автономных роботов // *Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). Информационные, вычислительные и управляющие системы*. 2002, 6: 237-242.

20. Мирошник И.В., Фрадков А.Л., Никифоров В.О. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

References

1. *Neobitaemye podvodnye apparaty: sostoyanie i obshchie tendentsii razvitiya* [Unmanned underwater vehicles: state and general development trends]. Available at: <https://www.electronics.ru/journal/article/286>.

2. Bocharov B.L. *Neobitaemye podvodnye apparaty: sostoyanie i obshchie tendentsii razvitiya* [Unmanned underwater vehicles: state and general development trends]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2009, №7(97): 62-69.

3. Yatsun S.F., Korolev V.I., Bondyrev V.E., Lushnikov B.V. Razvitie malykh i srednikh avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsipov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdelenii spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [The development of small and medium autonomous uninhabited underwater apparats on the basis of bionic (fish-like) movement principles for the task of special forces of the Navy of the Russian Federation]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Southern Federal University*. 2019, 1(203): 98-109.

4. Ageev M.D. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologi* [Autonomous underwater robots. Systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 400 p.

5. Gafurov S.A., Salmina V.A. Klassifikatsiya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. Odinnadtsatoi Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Promising management systems and tasks. Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical. conf.]. Rostov-Don, 2016, vol. 1, pp. 110-128.

6. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Sravnitel'nyi analiz i optimizatsiya dinamicheskikh svoistv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguratsii [Compara-

tive analysis and optimization of dynamic properties of autonomous underwater robots of various designs and configurations]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*. 2012, 1 (13): 24-35.

7. Bryan Schulz, Brett Hobson, Mathieu Kemp, Jim Meyer, Ryan Moody, Heather Pinnix, Mathew St. Clair. Multi-UUV Missions Using Ranger MicroUUVs. *Nekton Research, LLC*. 4625 Industry Lane Durham, NC 27713.

8. Madeleine: An agile AUV propelled by flexible fins. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229428877_Madeleine_An_agile_AUV_propelled_by_flexible_fins.

9. Mason R.J., Burdick J. W. Experiments in Carangiform Robotic Fish Locomotion. *Proc. of the 2000 ICRA*, 2000. pp. 428-435.

10. Morgansen K.A., Duindam V., Mason R.J., Burdick J.W. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, pp. 427-434.

11. An Amphibious Autonomous Robot. Available at: https://www.researchgate.net/publication/2961702_AQUA_An_amphibious_autonomous_robot.

12. Jatsun S., Lushnikov B., Politov E., Knyazev S. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype. *MATEC Web of Conferences*. 2017, 02014.

13. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Kazaryan K.G., Vorochaeva L.Yu., Vorochaev A.V. Konstruktivnye osobennosti bionicheskogo robota-ryby [Design features of bionic robot fish]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2017, 2(23): 94-102.

14. Autonomous Underwater Vehicle "Cuttlefish". *Marine Technology Reporter*, May-June 2005, pp. 51-53.

15. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* [Underwater robot control devices and systems]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 272 p.

16. Politov E.N., Lushnikov B.V., Yatsun S.F. Upravlenie rybopodobnym robototekhnicheskim ustroystvom dlya monitoringa ob"ektov v gidrosfere [Control of fish-like robotic device for monitoring objects in the hydrosphere]. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya. Materialy Odinnadtsatoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [Promising management systems and objectives. Materials of the Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference "Information Management and Processing in Technical Systems"]. Rostov-na-Donu, 2016, pp. 208-222.

17. Porez M., Boyer F, Ijspeert A.J. Improved light hill fish swimming model for bio-inspired robots: Modeling, computational aspects and experimental comparisons. *Int. J. Robot. Res.* 2014; 33(10): 1322-41.
18. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*. 2000. 8(1): 7-24.
19. Miroshnik I.V., Shalaev A.N. Upravlenie traektornym dvizheniem avtonomnykh robotov [Autonomous Robot Trajectory Control]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPb GITMO (TU). Informatsionnye, vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy = Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg GITMO (TU). Information, Computing and Control Systems*. 2002, 6: 237-242.
20. Miroshnik I.V., Fradkov A.L. Nikiforov V.O. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg, NaukaPubl., 2000, 549 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лушников Борис Владимирович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: bvl_61@inbox.ru, ORCID: <https://orcid/0000-0003-2288-2991>, Researcher ID: G-8554-2013

Boris V. Lushnikov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bvl_61@inbox.ru, ORCID: <https://orcid/0000-0003-2288-2991>, Researcher ID: G-8554-2013

Трофимов Владимир Викторович, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovan.trofimov@inbox.ru

Vladimir V. Trofimov, Master's Student of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovan.trofimov@inbox.ru