

16. Nikolaev N.I., Ginda O.P., Zinenko N.N. Povyshenie effektivnosti toplivoispol'zovaniya glavnykh dvigateley [The increase in fuel efficiency of the main engines], *Morskoy flot* [Marine Fleet], 2011, No. 1, pp. 45-48.
17. Nikolaev N.I., Ginda O.P., Zinenko N.N. Povyshenie ekspluatatsionnoy toplivnoy ekonomichnosti glavnogo dvigatelya na chastichnykh nagruzkakh [Improving operational fuel efficiency of the main engine at partial loads], *Dvigatelistroenie* [Dvigatelistroyeniye], 2010, No. 4, pp. 22-24.
18. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
19. Goodman E.D. Introduction to genetic algorithms, *GECCO 2014 – Companion Publication of the 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2014*, pp. 205-225.
20. Rajkumar M., Mahadevan K., Kannan S., Baskar S. NSGA-II technique for multi-objective generation dispatch of thermal generators with nonsmooth fuel cost functions, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2014, Vol. 9, pp. 423-432.
21. Neumann F., Witt C. Bioinspired computation in combinatorial optimization. Springer, 2010, 216 p.
22. Ashlock D. Evolutionary computation for modeling and optimization. Springer, 2006, 571 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Полковникова Наталья Анатольевна – Южный федеральный университет; e-mail: prolkovnikova@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79525617317; кафедра дискретной математики и методов оптимизации; аспирант.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; тел.: +78634311487; кафедра дискретной математики и методов оптимизации; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Polkovnikova Natalia Anatolievna – Southern Federal University; e-mail: nprolkovnikova@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79525617317; the department of discrete mathematics and optimization methods; postgraduate student.

Kureichik Victor Mikhailovich – e-mail: kur@tgn.sfedu.ru; phone: ++78634311487; the department of discrete mathematics and optimization methods; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 62-503.51: 62-531.4: 62-531.6

Б.В. Гуренко

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СБЛИЖЕНИЯ И СТЫКОВКИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ПОДВОДНОЙ СТАНЦИЕЙ БАЗИРОВАНИЯ*

Рассматриваются алгоритмы стыковки АНПА с подводной станцией базирования. Приведено краткое описание технических решений в области подводной стыковки на подвижных и стационарных станциях базирования. Раскрыта актуальность выполнения данной операции в автоматическом режиме. Разработан обобщенный алгоритм выполнения операции стыковки, состоящий из двух основных этапов: приведение АНПА в зону стыковочной станции без требования к ориентации и скорости; позиционирования АНПА на станцию базирования с учетом требования к ориентации и скорости движения АНПА. Для каждого из этих этапов предложен свой алгоритм управления, основанный на позиционно-траекторном подходе к управлению подвижными объектами, но с учетом специфики объекта управления. Рассмотрен АНПА, у которого есть маршевый двигатель с управляемым вектором тяги и направлением в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также два подруливающих устройства (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) в носовой части аппарата. Разработаны регуляторы АНПА

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00249-а и НИР № 114041540005 по государственному заданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности.

при сближении и при стыковке с подводной станцией базирования. При стыковке АНПА решается задача позиционирования подвижного объекта с учетом ограничений на управление. Приведен критерий переключения между алгоритмами сближения и стыковки на основе ляпуновского критерия устойчивости по норме начальных условий. Доказана устойчивость замкнутой системы при использовании предложенных алгоритмов на основе теоремы устойчивости Ляпунова. Разработана структура системы управления АНПА, включающая предложенные автопилоты сближения и стыковки и необходимое навигационное оборудование. Разработан обобщенный алгоритм работы системы управления АНПА. Предложенные алгоритмические решения подтверждены результатами компьютерного моделирования. Проведено компьютерное исследование поведения замкнутой системы при решении задачи сближения и стыковки. Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предложенных алгоритмических решений.

АНПА; станция базирования; управление; ограничения; сближение; стыковка.

B.V. Gurenko

DEVELOPMENT HOMING AND DOCKING ALGORITHMS WITH AN UNDERWATER BASED STATION FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

The article deals with docking and homing algorithms with an Underwater Based Station for Autonomous Underwater Vehicle. A brief description of the technical solutions in the field of underwater connections to mobile and stationary based station. Relevance disclosed this operation automatically. The generalized algorithm docking operation consist of two main phases: the AUV to move into the zone of the docking station without requiring the orientation and speed; AUV to pose in point of based station with requirements for orientation and speed of the AUV. For each of these phases of their proposed control algorithm based on position-trajectory approach to the control of moving objects, but taking into account the specifics of the control object. In the article, AUV has a main engine with thrust vector control and direction in the horizontal and vertical planes, and two thrusters (horizontal and vertical) in the bow of the machine. AUV homing and docking regulators were developed. While AUV was docking regulator solve the problem of positioning the mobile object with limit of control. A criterion for switching between homing and docking algorithms based on the Lyapunov stability criterion in the norm of the initial conditions was developed. The stability of closed-loop system using the proposed algorithms based on the Lyapunov stability theorem. The structure of the control system of AUV, including the proposed homing and docking autopilots and navigation equipment, was conceded. Propose algorithmic solutions confirmed by computer simulation of the behavior of the closed-loop system for solving the problem of homing and docking. The results of computer simulation confirmed the efficiency of the proposed algorithmic solutions.

AUV; base station; control; constraint; homing; docking.

Введение. Для обслуживания и запуска автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) необходимо обеспечивать сопровождающее судно специальным оборудованием, при помощи которого экипаж спустит АНПА на воду. Однако существуют проекты по развитию системы стыковки АНПА и сопровождающего судна или подводной лодки под водой. Базирование АНПА может осуществляться на подводной лодке, надводном корабле или на подводном стыковочном узле. При этом стыковка АНПА с судном может осуществляться через специальные ниши в днище корабля носителя. В данной статье разработаны и исследованы алгоритмы работы системы управления АНПА при стыковке с подводной станцией базирования или доком.

Обзор существующих систем стыковки. В общем случае АНПА могут базироваться на подвижных и неподвижных доках. К подвижным – относится базирование АНПА на сопровождающих кораблях или подводных лодках, к неподвижным – донные станции или привязанные к стационарному объекту.

Пример неподвижных станций базирования приведен на рис. 1, 2. АНПА может стыковаться и с подвижными платформами. Идея базирования АНПА на подводных лодках особенно актуальна при боевых операциях. АНПА может выполнять широкий круг задач [1–4], а наличие АНПА на борту подводной лодки или надводного корабля существенно повышает тактические возможности такого комплекса.

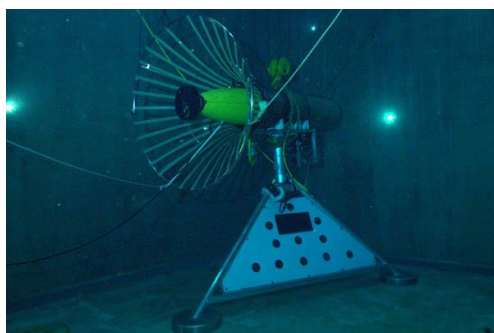


Рис. 1. Стыковка АНПА с донной станцией [5]

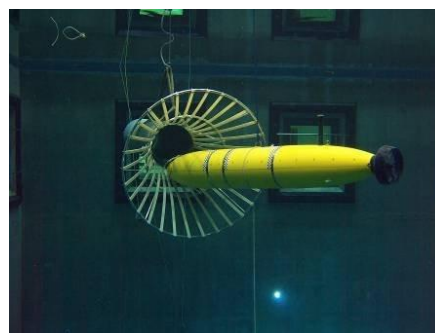


Рис. 2. Стыковка АНПА со станцией базирования [6]

В настоящее время известен ряд технических решений направленных на обеспечение базирования АНПА на подводных лодках (рис. 2, 3). Так в открытой печати много проектов [7–24] и разработок по базированию АНПА на подводных лодках, что, по мнению авторов проектов, существенно повышает боевые возможности подводных лодок. Существует две концепции базирования АНПА на подводных лодках: а) концепция «сухого базирования», когда АНПА хранится и обслуживается внутри прочного корпуса лодки или внутри специальных прочных контейнеров (например, модернизированных пусковых ракетных шахт ПЛ); б) концепция «мокрого базирования», когда АНПА в течение всего срока автономности подводной лодки хранится вне прочного корпуса в специально отведенном месте, заполненном забортной водой. Концепция «сухого» базирования требует переоборудования ПЛ, что влечет за собой высокую стоимость внедрения таких систем. Концепция «мокрого» базирования значительно дешевле, однако есть и свои минусы, связанные с отсутствием доступа к системам АНПА, чем значительно затрудняется обслуживание АНПА. Стоит отметить, что пока развиваются обе концепции, и ни одна из них не получила какого то преимущества.

В общем случае, процесс стыковки АНПА с подводной лодкой (ПЛ) может происходить в процессе движения ПЛ, а так же когда она не подвижна.

Таким образом, идея базирования необитаемых подводных аппаратов на донных сооружениях или на подводных лодках и надводных кораблей получила широкое распространение. Такой подход повышает эффективность использования АНПА и комплексов в целом.

Разработка обобщенного алгоритма управления при осуществлении стыковки АНПА с подводной станцией базирования. Исходя из анализа существующих систем стыковки, с точки зрения процесса управления, можно выделить два этапа стыковки АНПА с доком:

- ◆ Приведение АНПА в зону стыковочной станции без требования к ориентации и скорости.
- ◆ Позиционирования АНПА на станцию базирования с учетом требования к ориентации и скорости движения АНПА.



Рис. 3. Процесс загрузки системы AN/BLQ-11 на борт ПЛ [7]

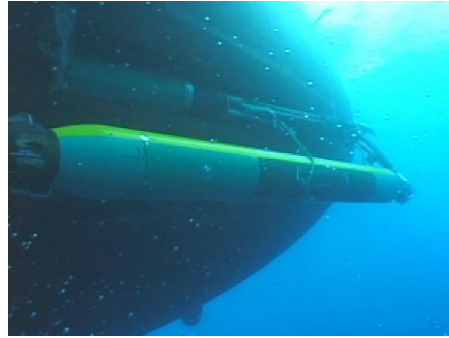


Рис. 4. Стыковка АНПА AN/BLQ-11 с ПЛ при помощи захвата-манипулятора [8]

Таким образом, можно сформировать обобщенный алгоритм управления АНПА при стыковки с доком. Пусть АНПА находится произвольной точке A_s . Система управления должна привести АНПА к доку, имеющему координаты A_d . В соответствии с ориентацией дока стыковка с ним должна осуществляться вдоль линии L_2 . Поэтому первым этапом, АНПА должен попасть на линию L_2 в точку A_1 , которая принадлежит прямой L_2 . Следующим этапом, АНПА должен двигаться вдоль линии L_2 в точку A_2 , которая достаточно близко расположена к доку. В точке A_2 включается алгоритм позиционирования АНПА. На этом этапе АНПА должен сблизиться с доком и занять необходимую ориентацию непосредственно для стыковки.

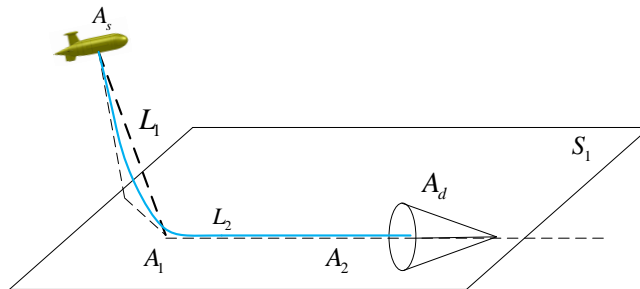


Рис. 5. Траектория движения АНПА соответствующая обобщенному алгоритму стыковки

Для приведения АНПА в зону стыковочной станции построим траекторный регулятор на основе законов позиционно-траекторного управления, разработанные Пшихоповым В.Х. [25–29], но с учетом специфики объекта управления [30]. Как показано в работе [30], математическая модель АНПА в матричном виде имеют следующий вид:

$$\dot{\bar{Y}} = \Sigma(\bar{\theta}, \bar{X}) = \Sigma \begin{pmatrix} \Sigma_p(\bar{\theta}, \bar{X}) \\ \Sigma_\theta(\bar{\theta}, \bar{X}) \end{pmatrix}$$

$$\tilde{M}\dot{\bar{X}} = [\bar{F}_d(\bar{P}, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_u(\bar{\delta}) + \bar{F}_v(G, A_{\Pi}, R_r)] \quad (1)$$

$$T_{wy} \frac{d\bar{\delta}}{dt} + \bar{\delta} = \bar{\Psi}_{wy}(\bar{\delta}, \bar{U})$$

где T_{iu} и $\bar{\Psi}(\bar{\delta}, \bar{U})$ – диагональная матрица постоянных времени ИУ и вектор нелинейных функций правых частей уравнений исполнительных устройств; $\bar{\delta}$ – вектор управляющих воздействий на элементы АНПА, формируемых исполнительными устройствами; \bar{U} – вектор управлений, формируемых системой управления АНПА; где x – m -вектор внутренних координат (координат состояния); M – $(m \times m)$ -матрица массо-инерционных параметров, элементами которой являются масса, моменты инерции, присоединенные массы АНПА; $F_u(x, Y, \delta, l)$ – m -вектор управляющих сил и моментов, здесь l – вектор конструктивных параметров; $F_d(x, Y, l)$ – m -вектор нелинейных элементов динамики АНПА; F_v – m -вектор измеряемых и неизменяемых внешних возмущений; $Y = (P, \Theta)^T$ – n -вектор положения P и ориентации Θ (выходных координат) связанной системы координат относительно базовой, $n \leq 6$; $\Sigma(\Theta, x)$ – n -вектор кинематических связей; $\Sigma_p(\Theta, x)$ – вектор линейных скоростей связанной системы координат относительно базовой; $\Sigma_\omega(\Theta, x)$ – вектор угловых скоростей связанной системы координат относительно базовой.

Для описанной модели (1) введем уравнения замкнутой системы:

$$\begin{aligned} \ddot{\Psi}_{ir} + T_1 \dot{\Psi}_{ir} + T_2 \Psi_{ir} &= 0 \\ \dot{\Psi}_{ck} + T_3 \Psi_{ck} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } \begin{cases} \Psi_{ir} = A_1 P + A_2 \Theta + A_3 \\ \Psi_{ck} = A_4 V + A_5 \end{cases} \quad (3)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -\varphi^* \\ -k_y H_3 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} \varphi \\ \psi \\ \gamma \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} \phi_3 \\ -k_y H_3 \end{bmatrix}, \varphi = \text{tg}(z - z^*/x - x^*) - \text{tg}(V_z/V_x),$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_5 = \begin{bmatrix} V_x - V_x^* \\ V_y - V_y^* \\ V_z - V_z^* \end{bmatrix}.$$

При этом $\left[V_x^* V_y^* V_z^* \right]^T$ – вектор задания требуемой скорости движения АНПА, причем $V_y^* = V_z^* = 0$ ввиду специфики объекта [30].

Подставив в (2) уравнения (3) с учетом математической модели АНПА (1) получим следующее выражение для управления:

$$F_u = -M \begin{bmatrix} A_4 & 0 \\ A_1 A' & A_2 A_w' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \Psi_{cr} \\ A_1 \dot{A}' V + A_2 \dot{A}_w' W + T_2 \Psi_{ir} + T_1 \dot{\Psi}_{ir} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Представленный подход к синтезу траекторного регулятора отличается разделением каналов управления, тем самым упрощается настройка регулятора. Осуществлена декомпозиция движения в горизонтальной и вертикальной плоскости с учетом особенностей объекта. Это обычная стандартная логика [34] управления подвижным объектом, но на основе позиционно-траекторного управления, т.е. в существующие системы такие алгоритмы проще внедрять. Стоит отметить, что применяемое разделение каналов управления и декомпозиция движения, при синтезе алгоритмов управление приводит к тому, что предложенные алгоритмы проигрывают позиционно-траекторным алгоритмам при сложном пространственном движении, где ощутимо влияние многосвязности.

Позиционирования АНПА на станцию базирования с учетом требования к ориентации и скорости движения АНПА. На основе математической модели (1) зададим требование к изменению координат АНПА в следующем виде:

$$\Psi_{tr} = A_1 Y + A_2. \quad (5)$$

Поведение замкнутой системы зададим в виде:

$$\dot{\Psi} + T_2 \Psi = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } \Psi = \dot{\Psi}_{tr} + T_1 \Psi_{tr} = A_1 \dot{R}X + T_1 (A_1 Y + A_0). \quad (7)$$

Подставим (5) в (6) с учетом математической модели АНПА (1) получим значение управления в виде:

$$F_u = -F_d - MR^{-1} A_1^{-1} (A_1 \dot{R}X + T_1 A_1 R X + T_2 \Psi), \quad (8)$$

Покажем, что система устойчива. Для этого подставим полученное выражение (8) в уравнение математической модели (1).

$$\begin{cases} \dot{Y} = R X \\ \dot{X} = -R^{-1} A_1^{-1} [A_1 \dot{R}X + (T_1 + T_2) A_1 R X + T_2 T_1 (A_1 Y + A_0)] \end{cases} \quad (9)$$

Выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(x) = \Psi^T Q \Psi, \quad (10)$$

где Q диагональная матрица соответствующего размера. Тогда производная от функции Ляпунова $V(x)$ будем иметь вид:

$$\dot{V}(x) = 2[A_1 R X + T_1 (A_1 Y + A_0)]^T Q [A_1 \dot{R}X + A_1 R \dot{X} + T_1 A_1 R X] \quad (11)$$

Подставим уравнение (9) в уравнение (11) получим

$$\dot{V}(x) = 2[A_1 R X + T_1 (A_1 Y + A_0)]^T Q [-T_2 A_1 R X - T_2 T_1 (A_1 Y + A_0)] \quad (12)$$

Выберем матрицу Q такую, что $Q T_2 = C$, где C диагональная матрица соответствующей размерности, получим следующее выражение для производной $\dot{V}(x)$:

$$\dot{V}(x) = -2[A_1 R X + T_1 (A_1 Y + A_0)]^T C [A_1 R X + T_1 (A_1 Y + A_0)] \quad (13)$$

Так как C положительно определенная матрица, то функция $\dot{V}(x)$ является отрицательно определенной. Таким образом, в соответствии с теоремой устойчивости Ляпунова, положение равновесия нашей системы является устойчивым по Ляпунову.

Определим устойчивость системы (1) и управлением (8) с учетом дополнения Барабашина-Красовского. Для этого покажем, что X в функции Ляпунова не является решением нашего дифференциального уравнения.

$$A_1 R X + T_1 (A_1 Y + A_0) = 0.$$

$$X = -R^{-1} A_1^{-1} T_1 (A_1 Y + A_0).$$

Тогда

$$\dot{X} = -R^{-1} A_1^{-1} T_1 A_1 R X.$$

Подставим выражения для X и \dot{X} в уравнение (9) получим

$$\dot{X} \neq R^{-1} \dot{R} R^{-1} A_1^{-1} T_1 (A_1 Y + A_0) + R^{-1} A_1^{-1} T_1^2 (A_1 Y + A_0) \quad (14)$$

Последнее выражение доказывает, что особая точка выражения (13) не является решением уравнения системы.

Оценка области достижимости с учетом ограничений. В реальной системе, управление значение управлений u ограничено из-за физических и энергетических ограничений исполнительных механизмов. Математически мы имеем следующее выражение для управления:

$$u_p = \begin{cases} u, \|u\| < u_{\max} \\ -u_{\max} \operatorname{sign}(u), \|u\| \geq u_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

Вполне очевидно, что при больших ограничениях управления, замкнутая система может стать не устойчивой, что недопустимо в реальных системах. Как показано в работах [25–26], такая ситуация особенно актуально при решении позиционной задачи, когда объект может находиться достаточно далеко от точки позиционирования или обладать скоростью, которую не смогут погасить исполнительные механизмы на заданном промежутке. Для решение этой проблемы предлагается разработать критерий, выполнение которого будет означать устойчивость замкнутой системы при выполнении позиционной задачи при имеющихся ограничениях u_{\max} . Вывод этого критерия произведем на основании метода, приведенного в [31]. С учетом того, что функция Ляпунова имеет вид (10), а ее производная – (13) и является отрицательно определенной, т.е. система является асимптотически устойчиво, то при ограниченной норме вектора начальных условий $\|\Psi_0\|$ вектора

$\Psi = R X + T_1 \Psi_{tr}$, где $\Psi_{tr} = \begin{bmatrix} P - P^* \\ \Theta - \Theta^* \end{bmatrix}$, можно записать следующее неравенство:

$$\|\Psi(t, y_0, x_0)\| \leq M < \infty, \lim_{t \rightarrow \infty} \Psi(t, y, x) = 0, \quad (15)$$

Фактически $\|\Psi_0\|$ определяет отклонения координат АНПА от точки позиционирования и скорости движения. С учетом того, что функция Ляпунова и ее производная имеют вид (10) и (11) соответственно, в силу свойств квадратичных форм, можем записать:

$$\begin{aligned} \lambda_1^Q \|\Psi\|^2 \leq V(x) = \Psi^T Q \Psi \leq \lambda_n^Q \|\Psi\|^2 \\ \lambda_n^C \|\Psi\|^2 \leq \dot{V}(x) = -2\Psi^T C \Psi \leq -\lambda_1^C \|\Psi\|^2, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\lambda_1^Q, \lambda_n^Q, \lambda_1^C, \lambda_n^C$ – наибольшие и наименьшие собственные числа матриц Q и C . В работе [32] показано, что по неравенствам (16) с учетом обозначения $\rho_0 = \sqrt{\lambda_n^Q / \lambda_1^Q}, \nu = \lambda_1^C / 2\lambda_n^C$ можно получить оценку нормы вектора Ψ в следующем виде:

$$\|\Psi\| \leq \rho_0 \|\Psi_0\| e^{-\nu t} \quad (17)$$

Сравнивая (15) и (17), можно положить $M = \rho_0 \|\Psi_0\|$. Преобразуем управление (8) к виду

$$\|F_u\| = \|K_u + K_\Psi \Psi\| < \|F_u^{\max}\|;$$

С учетом свойств нормы вектора получим:

$$\|\Psi\| \leq \frac{\|F_u^{\max}\| - \|K_u\|}{\|K_\Psi\|} \quad \text{или с учетом (17)} \quad \rho_0 \|\Psi_0\| \leq \frac{\|F_u^{\max}\| - \|K_u\|}{\|K_\Psi\|}, \quad \text{откуда}$$

получаем

$$\|\Psi_0\| \leq \frac{\|F_u^{\max}\| - \|K_u(x_0, y_0)\|}{\|K_\Psi(x_0, y_0)\| \rho_0}. \quad (18)$$

Положим в (18), что $F_u = Bu$, и получим окончательный вид ляпуновского критерия устойчивости по норме начальных условий.

$$\|\Psi_0\| \leq \frac{\|Bu_{\max}\| - \|K_u(x_0, y_0)\|}{\|K_\Psi(x_0, y_0)\| \rho_0}. \quad (19)$$

Таким образом, при выполнении полученного неравенства (19) система, описанная математической моделью (1), с алгоритмами управления (8) и ограничениями (14), выполнит задачу позиционирования, оставаясь при этом устойчивой. Предложенное неравенство может служить также критерием переключения алгоритма (4) на (8).

Обобщенная структура и алгоритм работы системы управления при выполнении стыковки автономного необитаемого подводного аппарата с подводной станцией базирования. Для реализации поставленной задачи стыковки АНПА с подводной станцией базирования предлагается структура системы управления, приведенная на рис. 6. Особенностью данной системы является то, что при такой задаче в виду особенностей получения навигационной информации под водой, необходимо использовать комплекс навигационных средств. Так для решения задачи приведения АНПА в зону станции базирования будет использована глобальная навигационная система, на основе ГАСН ДБ, КБ, УКБ и т.д., совместно с бортовой, а для позиционирования АНПА в доке, необходимо задействовать бортовую и локальную навигационную систему, например на базе видеокамер. В качестве алгоритмов оценивания внешних возмущений могут использоваться следующие алгоритмы [25, 27].

Обобщенный алгоритм функционирования автопилота при стыковки АНПА с подводной станцией базирования приведен на рис. 7.

Исследование предложенных алгоритмов методом компьютерного моделирования с Matlab. Исследуем выполнение критерия (19) при позиционировании АНПА в точке. Для этого проведем два эксперимента, в первом будем изменять норму Ψ_0 отклонением координат, во втором – отклонением скорости АНПА. Результаты представлены на рис. 8 и 9. Из результатов моделирования видно, что выполнения критерия (19) является достаточным для утверждения, что система будет устойчива при реализации алгоритмов (8) с ограничениями на управление u_{\max} . Исследуем методом компьютерного моделирования алгоритмы (4) – приведение АНПА в зону стыковочной станции без требования к ориентации и скорости. Результаты моделирования приведены на рис. 10–12.

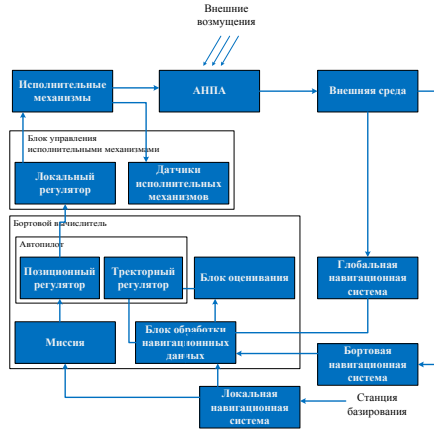


Рис. 6. Структура системы управления при выполнении стыковки АНПА с подводной станцией базирования

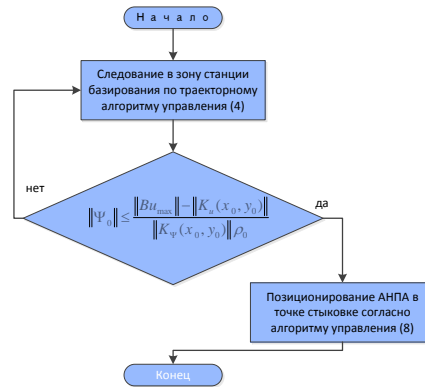


Рис. 7. Обобщенный алгоритм функционирования автопилота при стыковке АНПА с подводной станцией базирования

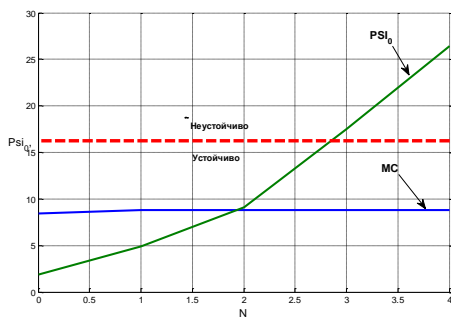


Рис. 8. Изменение устойчивости замкнутой системы при изменении координат АНПА

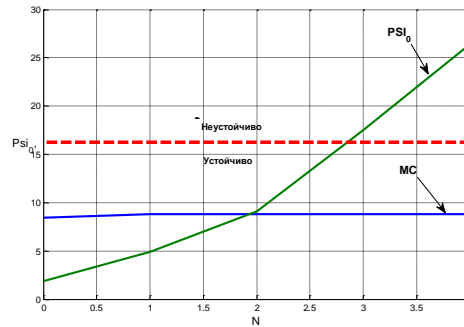


Рис. 9. Изменение устойчивости замкнутой системы при изменении скорости АНПА

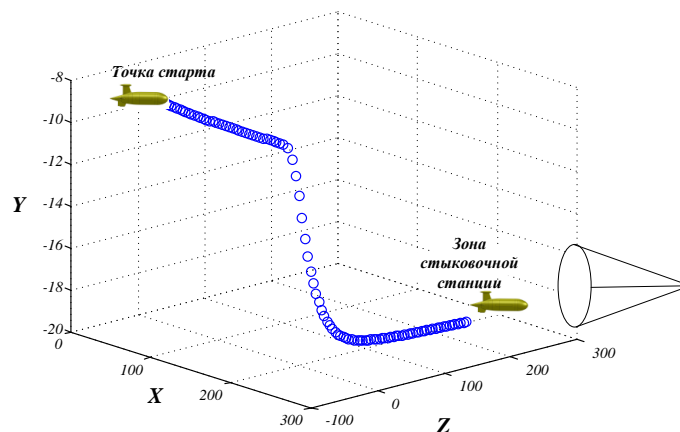


Рис. 10. Траектория движения АНПА в зону стыковочной станции

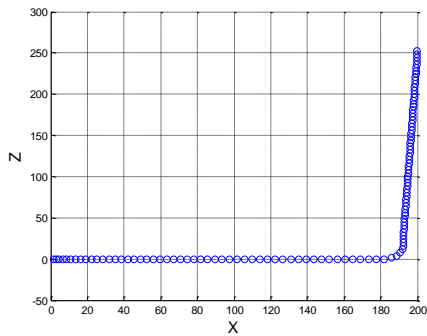


Рис. 11. Траектория движения АНПА в зону стыковочной станции(вид сверху)

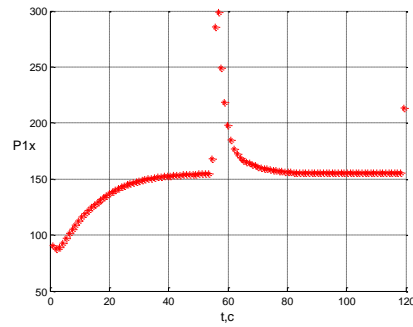


Рис. 12. Изменение управляющей силы P_{1x}

Результаты моделирования при использовании алгоритмов (8), позиционирования АНПА на станцию базирования с учетом требования к ориентации и скорости движения АНПА, приведены на рис. 13–17.

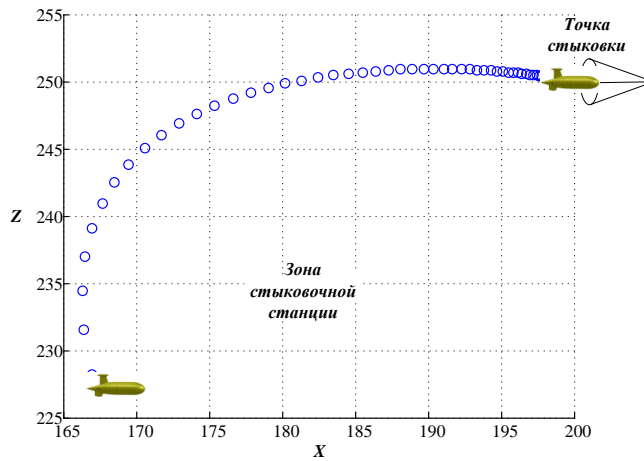


Рис. 13. Траектория движения АНПА при стыковке с доком

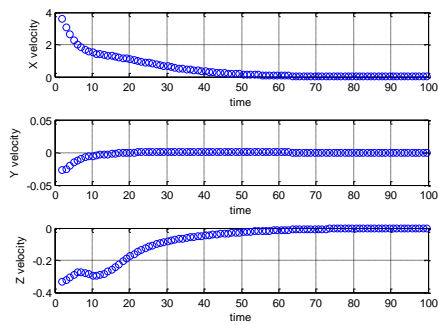


Рис. 14. Отклонения скорости движения от требуемого значения при стыковке

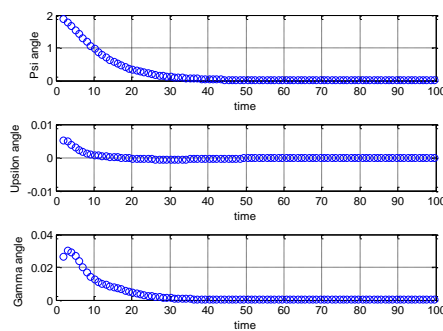


Рис. 15. Отклонения углов ориентации АНПА от требуемого значения при стыковке

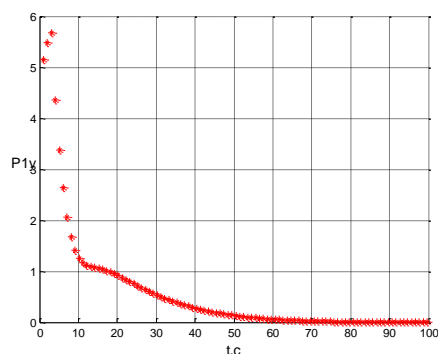
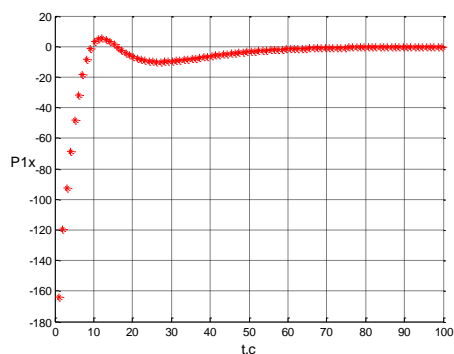


Рис. 16. Изменение управляющей силы P_{1x} Рис. 17. Изменение управляющей силы P_{1y}

Заключение. Рассмотрены алгоритмы управления АНПА при сближении и стыковки с подводной станцией базирования. Приведен критерий переключения между этими алгоритмами, на основе ляпуновского критерия устойчивости по норме начальных условий. Разработаны структура системы управления АНПА и обобщенный алгоритм работы. Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предложенных алгоритмических решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии / Под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
3. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Сидоренко В.В. Подводные роботы в минной войне: Монография. – Калининград: ОАО «Янтарный сказ», 2008. – 116 с.
4. Необитаемые подводные аппараты военного назначения / Под ред. акад. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 164 с.
5. Robert S. McEwen, Brett W. Hobson, and James G. Bellingham Docking Control System for A 21 Diameter AUV // IEEE Journal of Oceanic Engineering – IEEE J Oceanic Eng. – 2008. – Vol. 33, no. 4. – P. 550-562. DOI: 10.1109/JOE.2008.2005348.
6. Bluefin Develops Deep Sea Docking Stations URL: http://www.roboticsbusinessreview.com/article/bluefin_develops_deep_sea_docking_stations.
7. URL: <http://auvac.org/configurations/view/14>.
8. AN/BLQ-11 Autonomous Unmanned Undersea Vehicle URL: <http://www.navaldrones.com/AN-BLQ-11.html>.
9. Evans J., Redmond P., Plakas C., Hamilton K. and Lane D. Autonomous docking for intervention-style AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation // Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf. – 2003. – P. 2201-2210.
10. Fukasawa T., Noguchi T., Kawasaki T. and Baino M. Marine bird—A new experimental AUV with underwater docking and recharging system // Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf. – 2003. – P. 2195-2200.
11. Singh H., Bellingham J.G., Hover F., Lerner S., Moran B.A., Heydt K. and Yoerger D. Docking for an autonomous ocean sampling network // IEEE J. Ocean. Eng. – 2001. – Vol. 26, no. 4. – P. 498-513.
12. Allen B., Austin T., Forrester N., Goldsborough R., Kukulya A., Packard G., Purcell M. and Stokey R. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology // Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf. – 2006. – P. 1-6.
13. Stokey R., Allen B., Austin T., Goldsborough R., Forrester N., Purcell M. and Alt C.V. Enabling technology for REMUS docking: An integral component of an autonomous ocean sampling network // IEEE J. Ocean. Eng. – 2001. – Vol. 26, no. 4. – P. 487-497.
14. Cowen S., Briest S. and Dombrowski J. Underwater docking of an autonomous undersea vehicle using optical terminal guidance // Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf. – 1997. – P. 1143-1147.

15. Lee P.M., Jeon B.H. and Kim S.M. Visual servoing for underwater docking of an autonomous vehicle with one camera // Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf. – 2003. – P. 2195-2200.
16. Gertler M. Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies of revolution– For application to the design of high-speed submarines, 1950.
17. McEwen R.S. and Streitlien K. Modeling and control of a variable-length AUV // Proc. 12th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technol., 2001.
18. Fezoz M.D., Sorrel F.Y., Blankenship P.R. and Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance // IEEE J. Ocean. Eng. – 2001. – Vol. 26, no. 4. – P. 515-521.
19. Bellingham J.G., McEwen R.S. and Hobson B.W. The development of a docking station for a regional cabled observatory // Proc. 4th Int. Workshop Scientific Use of Submarine Cables, 2006. – P. 150-155.
20. Coulson R., Lambiotte J. and An E. A modular docking system for 12.75-inch class AUVs // Sea Technol. – 2005. – P. 49-54.
21. Jin-Yeong Park, Bong-huan Jun, Pan-mook Lee, Junho. Oh Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera // Ocean Engineering. – January 2009. – Vol. 36, Issue 1. – P. 48-61.
22. Panagiotis Sotiropoulos, Niccolo Tosi, Fivos Andritsos, Franck Geffard b Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: The DIFIS deployment case // Ocean Engineering 46 (2012) 33–4
23. Donghwa Lee, Gonyop Kimb, Donghoon Kimb, Hyun Myung, Hyun-Taek Choi. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots // Ocean Engineering. – 2012. – № 48. – P. 59-68.
24. Jin-Yeong Park, Bong-Huan Jun, Pan-Mook Lee, Fill-Youb Lee and Jun-ho. Oh Experiment on Underwater Docking of an Autonomous Underwater Vehicle 'ISiMI' using Optical Terminal Guidance // OCEANS 2007 – Europe. – P. 1-6.
25. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
26. Пицхопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
27. Пицхопов В.Х., Медведев М.Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.
28. Пицхопов В.Х. Организация репеллеров при движении с мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 34-41.
29. Пицхопов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В. Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред // Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. – 2006. – № 4. – С. 73-79.
30. Гуренко Б.В. Построение и исследование математической модели автономного необитаемого подводного аппарата // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. URL: // ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2626.
31. Гайдук А.Р. Управление группой беспилотных летательных аппаратов с ограничением на управление и переменные состояния // МАУ. Журн. в журн. «Управление и информатика в авиакосмических и морских системах». – 2012. – № 7. – С. 52-57.
32. Гайдук А.Р. Бесклубова К.В. Методы оценки переменных состояния линейных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 8-13.
33. Киселев Л.В. Код глубины. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 332 с.
34. Пузанов В.П. Алгоритмы управления подводным аппаратом в продольно-горизонтальной плоскости. Научно-технический отчет. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 59 с.

REFERENCES

1. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. – М.: Nauka, 2005. – 398 p.

2. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [The threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
3. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Sidorenko V.V. Podvodnye roboty v minnoy voyne: Monografiya [Underwater robots in war of mine: Monograph]. Kaliningrad: OAO «Yantarnyy skaz», 2008, 116 p.
4. Neobitaemye podvodnye apparaty voennogo naznacheniya [Unmanned underwater vehicles for military use], Under the editorship of acad. M.D. Ageeva. Vladivostok: Dal'nauka, 2005, 164 p.
5. Robert S. McEwen, Brett W. Hobson, and James G. Bellingham Docking Control System for A 21 Diameter AUV, *IEEE Journal of Oceanic Engineering – IEEE J Oceanic Eng.*, 2008, Vol. 33, No. 4, pp. 550-562. DOI: 10.1109/JOE.2008.2005348.
6. Bluefin Develops Deep Sea Docking Stations Available at: http://www.roboticsbusinessreview.com/article/bluefin_develops_deep_sea_docking_stations.
7. Available at: <http://auvac.org/configurations/view/14>.
8. AN/BLQ-11 Autonomous Unmanned Undersea Vehicle. Available at: <http://www.navaldrone.com/AN-BLQ-11.html>.
9. Evans J., Redmond P., Plakas C., Hamilton K. and Lane D. Autonomous docking for intervention-style AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation, *Proc. MTS/IEEE Oceans Conf.*, 2003, pp. 2201-2210.
10. Fukasawa T., Noguchi T., Kawasaki T. and Baino M. Marine bird—A new experimental AUV with underwater docking and recharging system, *Proc. MTS/IEEE Oceans Conf.*, 2003, pp. 2195-2200.
11. Singh H., Bellingham J.G., Hover F., Lerner S., Moran B.A., Heydt K. and Yoerger D. Docking for an autonomous ocean sampling network, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001, Vol. 26, No. 4, pp. 498-513.
12. Allen B., Austin T., Forrester N., Goldsborough R., Kukulya A., Packard G., Purcell M. and Stokey R. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology, *Proc. MTS/IEEE OCEANS Conf.*, 2006, pp. 1-6.
13. Stokey R., Allen B., Austin T., Goldsborough R., Forrester N., Purcell M. and Alt C.V. Enabling technology for REMUS docking: An integral component of an autonomous ocean sampling network, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001, Vol. 26, No. 4, pp. 487-497.
14. Cowen S., Briest S. and Dombrowski J. Underwater docking of an autonomous undersea vehicle using optical terminal guidance, *Proc. MTS/IEEE Oceans Conf.*, 1997, pp. 1143-1147.
15. Lee P.M., Jeon B.H. and Kim S.M. Visual servoing for underwater docking of an autonomous vehicle with one camera, *Proc. MTS/IEEE Oceans Conf.*, 2003, pp. 2195-2200.
16. Gertler M. Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies of revolution—For application to the design of high-speed submarines, 1950.
17. McEwen R.S. and Streitlien K. Modeling and control of a variable-length AUV, *Proc. 12th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technol.*, 2001.
18. Feezor M.D., Sorrel F.Y., Blankenship P.R. and Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001, Vol. 26, No. 4, pp. 515-521.
19. Bellingham J.G., McEwen R.S. and Hobson B.W. The development of a docking station for a regional cabled observatory, *Proc. 4th Int. Workshop Scientific Use of Submarine Cables*, 2006, pp. 150-155.
20. Coulson R., Lambiotte J. and An E. A modular docking system for 12.75-inch class AUVs, *Sea Technol.*, 2005, pp. 49-54.
21. Jin-Yeong Park, Bong-huan Jun, Pan-mook Lee, Junho Oh. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera, *Ocean Engineering*, January 2009, Vol. 36, Issue 1, pp. 48-61.
22. Panagiotis Sotiropoulos, Niccolo Tosi, Fivos Andritsos, Franck Geffard b Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: The DIFIS deployment case, *Ocean Engineering* 46 (2012) 33–4.
23. Donghwa Lee, Gonyop Kimb, Donghoon Kimb, Hyun Myung, Hyun-Taek Choi. Vision-based object detection and tracking for autonomous navigation of underwater robots, *Ocean Engineering*, 2012, No. 48, pp. 59-68.
24. Jin-Yeong Park, Bong-Huan Jun, Pan-Mook Lee, Fill-Youb Leeand, Jun-ho Oh. Experiment on Underwater Docking of an Autonomous Underwater Vehicle 'ISiMI' using Optical Terminal Guidance, *Oceans 2007 – Europe*, pp. 1-6.

25. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
26. *Pshikhopov V.Kh.* Pozitsionno-traektornoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami [Position-trajectory control of mobile]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 183 p.
27. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Strukturnyy sintez avtopilotov podvizhnykh ob"ektov s otsenivaniem vozmushcheniy [Structural synthesis of autopilots moving objects with the estimation of disturbances], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and Control Systems], 2006, No. 1, pp. 103-109.
28. *Pshikhopov V.Kh.* Organizatsiya repellerov pri dvizhenii s mobil'nykh robotov v srede s prepyatstviyami [Organization of repellere the motion of mobile robots in environment with obstacles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 2, pp. 34-41.
29. *Pshikhopov V.Kh., Sirotenko M.Yu., Gurenko B.V.* Strukturnaya organizatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya podvodnymi apparatami dlya apriori neformalizovannykh sred [Structural organization of systems of automatic control of underwater vehicles for a priori non-formal environments] *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. Intellektual'nye i adaptivnye roboty* [Information-measuring and Control Systems. Intelligent and adaptive robots], 2006, No. 4, pp. 73-79.
30. *Gurenko B.V.* Postroenie i issledovanie matematicheskoy modeli avtonomnogo neobi-taemogo podvodnogo apparata [Construction and investigation of mathematical models of Autonomous underwater vehicle], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2626>.
31. *Gayduk A.R.* Upravlenie gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ogranicheniem na upravlenie i peremennye sostoyaniya [Managing a group of unmanned aerial vehicles with restrictions on control and state variables], *MAU. Zhurn. v zhurn. «Upravlenie i informatika v aviakosmicheskikh i morskikh sistemakh»* [Mechatronics, automation, control. The journal in the journal "Management and Informatics in aerospace and marine systems"], 2012, No. 7, pp. 52-57.
32. *Gayduk A.R. Besklubova K.V.* Metody otsenki peremennykh sostoyaniya lineynykh sistem [Estimation methods of the linear system's state variables], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 2 (127), pp. 8-13.
33. *Kiselev L.V.* Kod glubiny [Code depth]. Vladivostok: Dal'nauka, 2011, 332 p.
34. *Puzanov V.P.* Algoritmy upravleniya podvodnym apparatom v prodol'no-gorizontal'noy ploskosti. Nauchno-tekhnicheskyy otchet. [The algorithms for control of underwater vehicle in the longitudinal-horizontal plane. Scientific technical report]. Moscow: MVTU im. N.E. Baumana, 2004, 59 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Глебов.

Гуренко Борис Викторович – Южный федерального университета; e-mail: boris.gurenko@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89281687212; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

Gurenko Boris Victorovich – Southern Federal University; e-mail: boris.gurenko@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281687212; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

УДК 004.4 422

И.П. Токарь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В КОМПИЛЯТОРЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ

Целью данной работы является нахождение техник компиляции, повышающих энергоэффективность программ. Данная задача формулируется как задача многокритериальной оптимизации производительности и энергопотребления, с ограничениями на время компиляции и падение производительности, где допустимое падение производительности