

Алгоритм управления малогабаритным беспилотным подводным комплексом

В. Е. Бондырев¹, С. И. Князев¹, В. И. Королев¹, С. Ф. Яцун¹ ✉

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Создание систем мониторинга водоемов позволяет оперативно оценивать экологическую ситуацию в различных точках района мониторинга. Одним из основных этапов исследования качества воды является отбор проб, который сегодня осуществляется на стационарных постах, что делает невозможным обеспечение оперативного контроля на различных участках объекта наблюдения. Решение проблемы возможно за счет применения мобильных роботизированных платформ. Целью работы является создание математической модели и алгоритма управления автономным движением подводного роботизированного устройства для сбора проб воды в водоеме.

Методы. Для этого решены следующие задачи: разработана структура устройства, которая состоит из блока силового каркаса, блоков винтовых электроприводов, блоков рулей глубины и направления. А также блока бортового источника питания, блока сенсоров, обеспечивающих взаимодействие подводного аппарата с окружающей средой. Сформулированы задачи управления, для этого разработана схема движения устройства в водоеме.

Результаты. Предложен модульный метод планирования траектории, основанный на понятии единичный цикл движения, который состоит из 2-х поворотов и 2-х прямолинейных этапов 2R2P, также предложена модель управляющего алгоритма и исследованы реакции аппарата на внешние возмущения. При решении задач применены общие теоремы динамики, метод синтеза алгоритма по обратной задаче динамики.

Заключение. В результате проведенных исследований рассмотрена реакция системы на возмущающие воздействия, действующие в продольном направлении, приведены графики возмущения, случайного типа с нормальным законом распределения и отклонение центра масс от заданного положения.

Ключевые слова: система мониторинга водоемов; малогабаритный беспилотный подводный комплекс; структурная схема; возмущающие воздействия; математическая модель; планирование траектории движения.

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

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90053.

Для цитирования: Алгоритм управления малогабаритным беспилотным подводным комплексом / В. Е. Бондырев, С. И. Князев, В. И. Королев, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 166-179. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-166-179>.

Поступила в редакцию 30.07.2020

Подписана в печать 17.08.2020

Опубликована 30.12.2020

© Бондырев В. Е., Князев С. И., Королев В. И., Яцун С. Ф., 2020

Small-size Unmanned Control Algorithm of an Underwater Complex

Vladimir E. Bondyrev ¹, Sergey I. Knyazev ¹, Vladimir I. Korolev ¹,
Sergey F. Jatsun ¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research: The creation of water bodies monitoring systems makes it possible to evaluate environmental situation in various points of monitoring area quickly. One of the main stages of water quality research is sampling, which is currently carried out at stationary posts, which makes it impossible to ensure operational control in various areas of an observation site. The problem can be solved by using mobile robotic platforms. The purpose of this study is to create mathematical model and algorithm for controlling autonomous movement of an underwater robotic device for collecting water samples in a reservoir.

Methods. The following problems were solved for this purpose: the structure of the device was developed, which consists of a power frame unit, units of screw electric drives, units of depth and direction rudders. On-board power supply unit, sensor unit providing interaction of underwater vehicle with environment were also developed. Control tasks are formulated. A scheme of device movement in a reservoir has been developed for this purpose.

Results. Modular method of trajectory planning is proposed. It is based on a single motion cycle concept, which consists of 2 turns and 2 straight-line stages of 2R2P. A model of control algorithm is also proposed and reactions of apparatus to external disturbances are studied. General dynamics theorems, method of algorithm synthesizing according to inverse dynamics problem were applied when solving problems.

Conclusion: As a result of conducted studies, the system response to disturbances acting in longitudinal direction is described, disturbance diagrams are also described, random type with normal distribution law and mass center deviation s from the given position are given.

Keywords: water bodies monitoring system; small unmanned underwater complex; structural diagram; disturbing effects; mathematical model; planning the motion path.

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

Funding: The study was carried out with the financial support of RFFI in the framework of as part of scientific project No. 19-33-90053.

For citation: Bondyrev V. E., Knyazev S. I., Korolev V. I., Jatsun S. F. Small-size Unmanned Control Algorithm of an Underwater Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 166-179 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-166-179>.

Received 30.07.2020

Accepted 17.08.2020

Published 30.12.2020

Введение

Современное развитие промышленности, и связанное с этим загрязнение окружающей среды, ряд масштаб-

ных техногенных аварий, вынуждают выдвигать проблемы экологии в число первоочередных. Создание систем мониторинга водоемов (СМВ) позволяет оперативно оценивать экологическую

ситуацию в различных точках района мониторинга.

Одним из основных этапов исследования качества воды является отбор проб, который осуществляется оператором на стационарных постах, укомплектованных соответствующим оборудованием. Однако стационарность таких постов делает невозможной обеспечение оперативного контроля на различных участках объекта наблюдения. Поэтому, существует проблема оперативного и безопасного получения информации, необходимой и достаточной для оценки качества водоема и принятия соответствующих ситуации мер.

В последние годы появляются роботизированные мобильные платформы (РМП) надводного и подводного базирования, позволяющие в автономном режиме обеспечить забор проб воды и передачу информации на пост наблюдения. Для системы мониторинга водоемов роботизированного типа (СМВРТ) требуется создать небольшие, но маневренные малогабаритные беспилотные подводные комплексы (МБПК), позволяющие осуществлять движение по заданным траекториям и производить забор проб воды в заданных точках [1-12].

Для реализации автономного или телеуправляемого движения МБПК необходимо разработать алгоритмы управления на основе математических моделей с учетом как детерминированных, так и случайных возмущений. Таким образом, повышение точности движения МБПК по заданной траектории за счет синтеза оптимальных

управляющих алгоритмов и совершенствования структурных связей элементов СМВРТ является актуальным направлением исследования.

Материалы и методы

Структура МБПК

Рассмотрим структуру МБПК, которая показана на рис.1. Система состоит из блока силового каркаса, блоков винтовых электроприводов, блоков рулей глубины и направления. Блока бортового источника питания, блока сенсоров, обеспечивающих взаимодействие МБПК с окружающей средой. МБПК также снабжен секвентальным блоком забора проб. В кассете может размещаться 10 или 20 емкостей.

Математическая модель

Схема МБПК при движении в водоеме приведена на рис. 2. МБПК движется относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. С центром масс связана подвижная система координат $SX_2Y_2Z_2$. На схеме приняты следующие обозначения: 1 – правый винтовой электропривод; 2 – корпус МБПК; 3 – левый винтовой электропривод; 4 – бортовой вычислитель; 5 – сенсоры; 6 – препятствие, расстояние между МБПК и препятствиями обозначим l . Для получения системы дифференциальных уравнений движения МБПК воспользуемся общими теоремами динамики. Для определения уравнений, описывающих движение центра масс МБПК, применим теорему об изменении количества движения механической системы в виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \bar{\Phi}, \tag{1}$$

где \bar{Q} – количество движения рассматриваемой механической системы определим по формуле:

$$\bar{Q} = \sum \bar{q}_i, \tag{2}$$

$$\bar{\Phi} = \bar{G} + \bar{P} + \bar{H} + \bar{F}. \tag{3}$$

$\bar{\Phi}$ – главный вектор внешних сил, приложенных к системе.

$$\bar{\Phi} = (\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z)^T.$$

1) $\bar{G} = -\sum m_i g \bar{j}$ – вес, \bar{j} – единичный вектор оси OY ;

2) $\bar{P} = \sum V_i \rho \bar{j}$ – сила Архимеда; V_i – объем элемента МБПК; ρ – плотность воды.

3) сила сопротивления \bar{H} , возникающая при движении МБПК, приложена в точке C , определяется по формуле:

$$\bar{H} = (1/2)\zeta S \rho \bar{V} |\bar{V}|,$$

где ζ – безразмерный коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность вязкой среды, S – эффективная площадь корпуса; \bar{V} – скорость движения относительно потока воды;

4) управляющие силы, вызванные взаимодействием винтовых движителей с водой, приложены к точкам C_1, C_3 соответственно. Эти силы направлены вдоль осей $O_i X_i$ соответствующих локальных систем координат. Векторы этих сил в неподвижной системе координат определим по формулам:

$$\bar{F}_1^{(0)} = T_{12} T_{20} \cdot \bar{F}_1^{(1)},$$

$$\bar{F}_3^{(0)} = T_{32} T_{20} \cdot \bar{F}_3^{(3)}.$$

Также, со стороны рулей действует сила, приложена:

$$\bar{F}_2^{(0)} = T_{20} F_2^{(2)}.$$

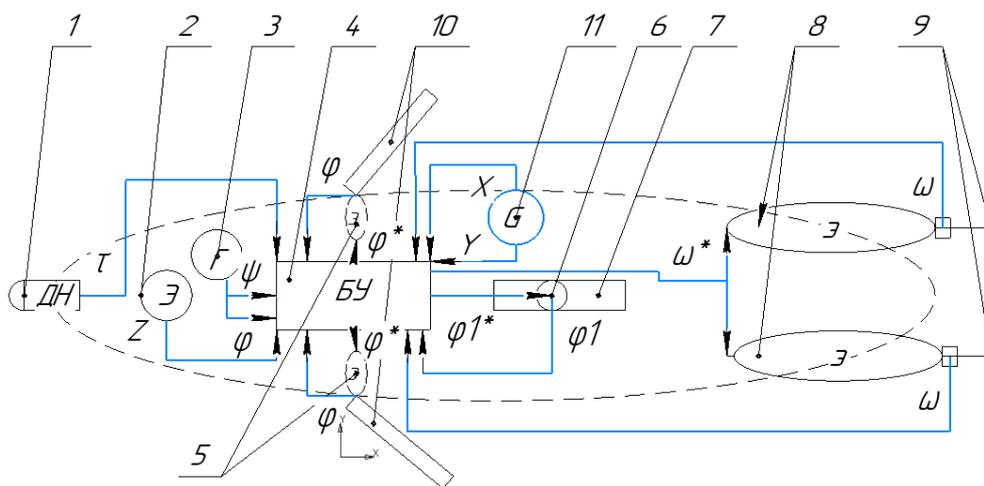


Рис. 1. Структура МБПК: 1 – датчик расстояния до препятствия; 2 – эхолот; 3 – гироскоп; 4 – блок управления; 5 – поворотные электроприводы левого и правого; 6 – клапан механизма забора воды; 7 – емкости для хранения проб воды; 8 – электродвигатели рулей поворота и глубины; 9 – рули направления и глубины; 10 – бортовые винтовые движители с переменным вектором тяги; 11 – GPS навигатор

Fig. 1. MUUK Structure: 1 – sensor the distance from obstacles; 2 – the sounder; 3 – gyro; 4 – control unit; 5 – turning left and right actuators; 6 – way valve mechanism water intake; 7 – capacity of storage of water samples; 8 – electric rudder and depth; 9 – rudders and depth; 10 – side-screw propulsion with variable thrust vector; 11 – GPS

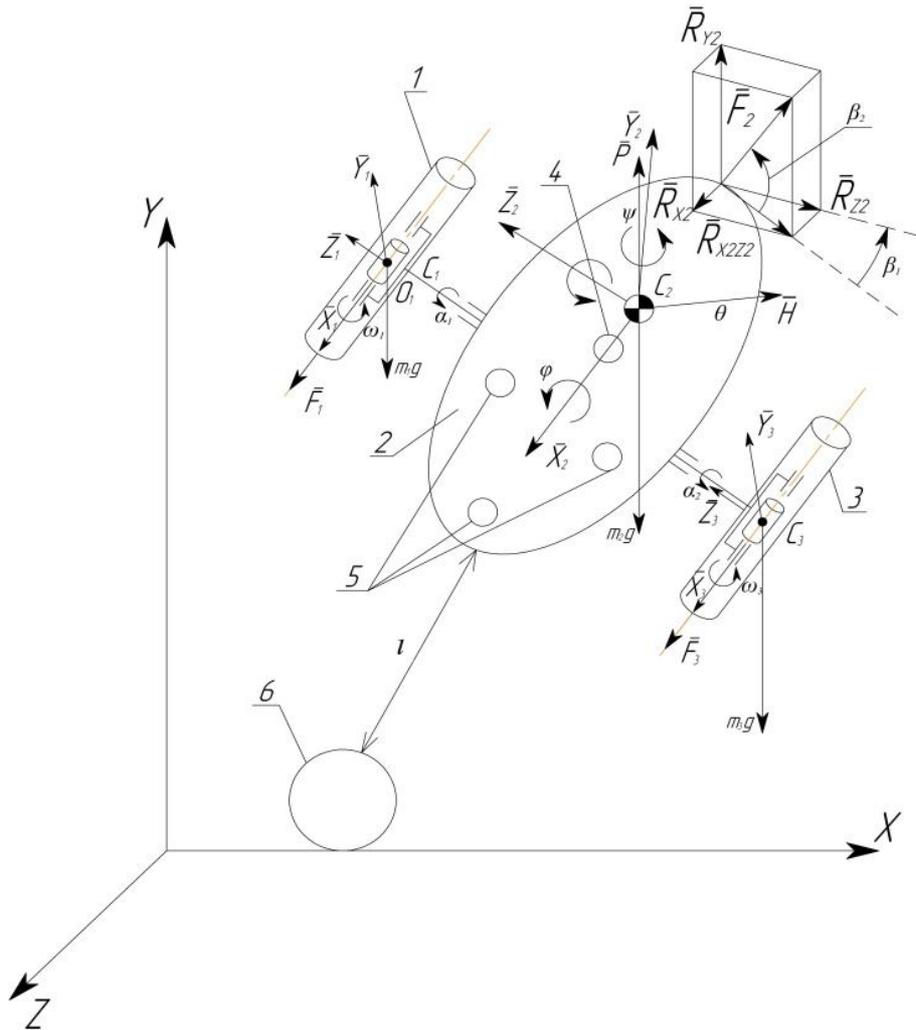


Рис. 2. Схема МУУК при движении в водоеме с учетом взаимодействия с препятствием:
 1 – правый винтовой электропривод; 2 – корпус МУУК; 3 – левый винтовой электропривод; 4 – бортовой вычислитель; 5 – сенсоры; 6 – препятствие

Fig. 2. Scheme of MUUK when moving in a reservoir, taking into account interaction with an obstacle.
 1 – right screw electric drive; 2 – MBPC case; 3 – left screw electric drive; 4 – on-board computer; 5 – sensors; 6 – obstacle

Матрицы, определяющие поворот винтового движителя относительно корпуса, представим в виде:

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 & 0 \\ \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{32} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_3 & -\sin\alpha_3 & 0 \\ \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица поворота второй системы координат относительно неподвижной имеет вид:

$$T_{20} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos f - \sin\theta \sin\psi \sin f & -\cos\theta \sin f & \cos f \sin\psi + \cos\psi \sin\theta \sin f \\ \cos\psi \sin f + \cos f \sin\theta \sin\psi & \cos\theta \cos f & \sin\psi \sin f - \cos\psi \cos f \sin\theta \\ -\cos\theta \sin\psi & \sin\theta & \cos\theta \cos\psi \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение (1), с учетом (2), (3) представим в виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = (m_1 + m_2 + m_3) \frac{d\bar{v}_c}{dt} = \bar{G} + \bar{H} + \bar{P} + T_{12}T_{20}\bar{F}_1^{(1)} + T_{32}T_{20}\bar{F}_3^{(3)} + T_{20}\bar{F}_2 \quad (4)$$

Для определения уравнений вращательного движения, воспользуемся теоремой об изменении момента количества движения в виде:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{L} \times \bar{\omega} = \bar{M}_c^e, \quad (5)$$

где \bar{L} – Кинетический момент МБПК; \bar{M}_c^e – главный момент внешних сил.

$\bar{L} = I\bar{\omega}$, где I – тензор инерции;

$$I = \begin{vmatrix} J^x & J^{xy} & J^{xz} \\ J^{yx} & J^y & J^{yz} \\ J^{zx} & J^{zy} & J^z \end{vmatrix}; \quad \bar{\omega} - \text{угловая скорость.}$$

рость.

$$\bar{\omega} = (\omega_{x2} + \omega_{y2} + \omega_{z2})^T. \quad (6)$$

Если система координат $CXYZ$ является главной, то:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{L} \times \bar{\omega} = \begin{vmatrix} J^x \dot{\omega}_x \\ J^y \dot{\omega}_y \\ J^z \dot{\omega}_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \omega_y \omega_z (J^z - J^y) \\ \omega_x \omega_z (J^x - J^y) \\ \omega_x \omega_y (J^y - J^x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M_{x2} \\ M_{y2} \\ M_{z2} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Формулы (4) и (7) с учетом кинематических уравнений Эйлера образуют систему дифференциальных уравнений, описывающих движение МБПК в пространстве. Управляющие силы, создаваемые винтовыми движителями и рулями глубины и направления в первой, второй и третьей системах координат, имеют вид:

$$\bar{F}_1^{(1)} = \begin{vmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad \bar{F}_3^{(3)} = \begin{vmatrix} F_3 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Величина сил $\bar{F}_1^{(1)}$, $\bar{F}_3^{(3)}$ зависит от угловой скорости вращения винтов. Далее примем, что $F_i = b_i \omega_i^2$, b_i – эмпирический коэффициент. Определим математическую модель управляющей силы, связанной с изменением угла поворота рулей поворота β_1 и глубины β_2 .

$$F_2^{(2)} = (R_0, R_0 \sin \beta_2, R_0 \sin \beta_1)^T$$

$$F_2^{(0)} = F_2^{(2)}; \quad R_0 = r_0 v_x |v_x|, \quad (9)$$

где r_0 – экспериментально определяемая постоянная; v_x – продольная скорость. Определим моменты сил, возникающих со стороны правого движителя относительно центра масс корпуса:

$$\vec{M}(F_1) = \vec{r}_{CC1}^{(2)} \times \vec{F}_1^{(2)} = \dot{r}_{CC1}^{(2)} \times T_{12} \cdot \vec{F}_1$$

$$\vec{M}(\bar{F}_1) = \begin{bmatrix} -a \\ b \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

a, b, c – геометрические размеры, определяющие положение центра винтового движителя. Аналогично определим момент, создаваемый силой левого движителя относительно центра масс корпуса:

$$\vec{M}(\bar{F}_3) = \begin{bmatrix} -a \\ b \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

С применением уравнений (4), (7) построена программа расчета движения МБПК в режиме автономного движения и телеуправления, позволяющая вычислять изменение положения, ориентации и скоростей центра масс МБПК, в про-

странстве под действием системы внешних сил и моментов (8), (9).

Планирование траектории движения

Рассмотрим модульный метод планирования траектории, основанный на понятии единичный цикл движения МБПК, который состоит из 2-х поворотов и 2-х прямолинейных этапов 2R2P (рис.3). Используя понятие цикл движения можно построить различные траектории движения МБПК.

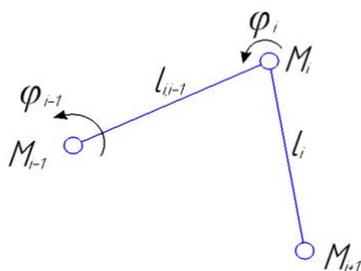


Рис. 3. Схема модуля планируемой траектории (цикл 2R2P)

Fig. 3. Diagram of the planned trajectory module (2R2P cycle)

Примеры траекторий приведены на рис.4 и рис.5.

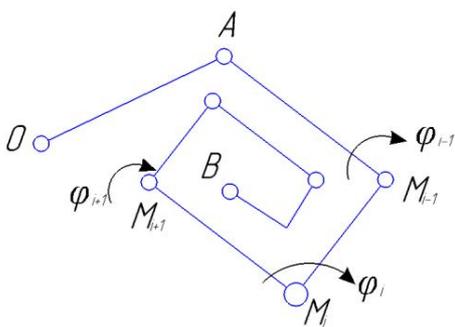


Рис. 4. Траектория движения МБПК типа «Спираль»

Fig.4. The trajectory of the MBPK type "Spiral"

$$\varphi_{i-1} = \varphi_i; l_i = l_{i-1} - \Delta l$$

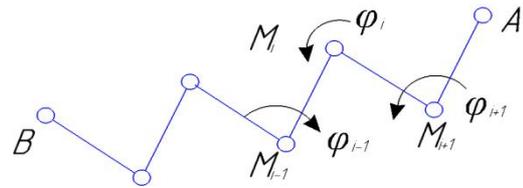


Рис. 5. Траектории движения МБПК типа «Дорожка»

Fig. 5. Trajectory of the MBPK of the "Track" type

$l_i - \varphi_{i-1} = -\varphi_i; l_i = l_{i-1}; l_i$ – длина i -го отрезка траектории.

Результаты и их обсуждение

Широко использован структурно-логический подход, когда система представляется структурой из блоков, а количественные характеристики системы выражаются через аналогичные характеристики блоков с помощью алгебры логики. Решаются следующие типы задач: расчет характеристик систем с различной структурой; качественный анализ работы систем различной структуры при вариациях характеристик блоков; оптимальное управление работой системы с различной структурой. Анализируются программы для ЕС ЭВМ, реализующие предложенные алгоритмы.

Вопросам синтеза систем автоматического управления в условиях неопределенности ряда параметров уделяется большое внимание в работах [13-20].

Преобразуем систему дифференциальных уравнений (4), (7) к виду:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \bar{\Phi}_1(\bar{\xi}) + B(\bar{\xi})\bar{U}. \tag{10}$$

Управление движением МБПК осуществляется шестью управляющими

напряжениями u_i , вектор управляющих воздействий имеет вид:

$$\bar{U} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)^T, \quad (11)$$

система управления МБПК имеет замкнутый вид. В качестве управляемых параметров, примем:

$$\xi = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T.$$

Тогда система управления МБПК содержит шесть каналов обратных связей. Закон управления получен с применением метода синтеза управляющего алгоритма на основе решения задачи обратной динамики в виде:

$$\bar{U} = \bar{U}(\xi, \ddot{\bar{r}}(t), \dot{\bar{r}}(t), \bar{r}(t), W, t). \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что для создания требуемого сигнала управления необходимо измерять управляемую величину $\xi(t)$, внешние возмущения W ,

а также функцию, определяющую желаемое положение ЦМ МБПК $\bar{r}(t)$ и ее производные.

Далее рассмотрена реакция системы на возмущающие воздействия случайного типа, действующие в продольном направлении МБПК, вдоль оси SX_2 . На рис.6-9 приведен график возмущения, случайного типа с нормальным законом распределения и реакция системы на это воздействие в виде ошибки по X .

Полученные диаграммы показывают зависимость реакции системы на характер возмущения (см. рис.7 и рис.9.). Так наличие ненулевого математического ожидания приводит к появлению значительной динамической ошибки, которая после снятия возмущения стремится к нулю.

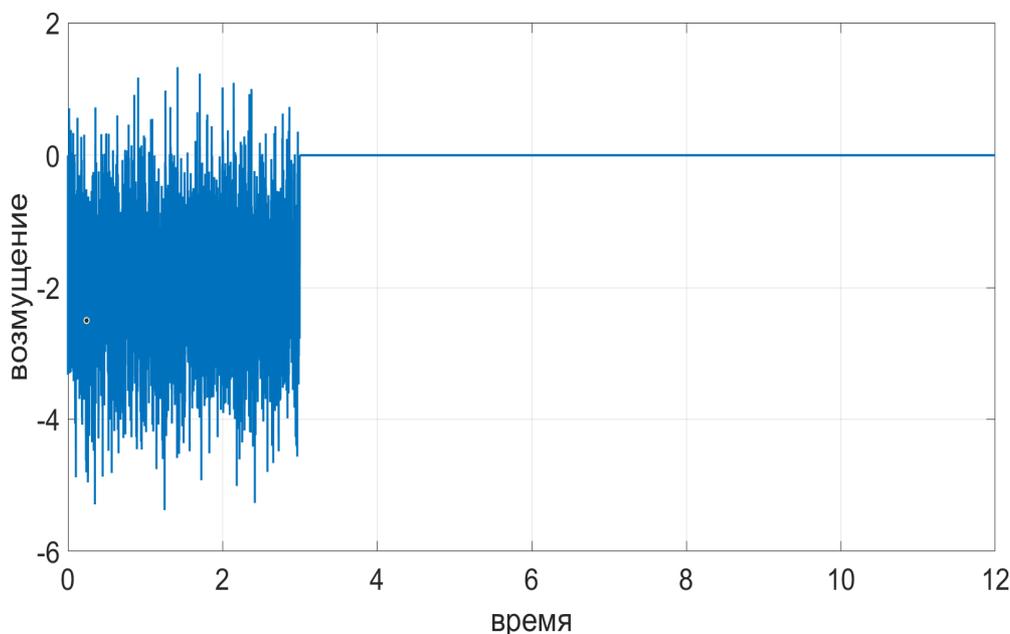


Рис. 6. Случайное воздействие с параметрами; $m = -2$, $\sigma = 1$

Fig. 6. Graph of random perturbation on the X-axis $m = -2$, $\sigma = 1$

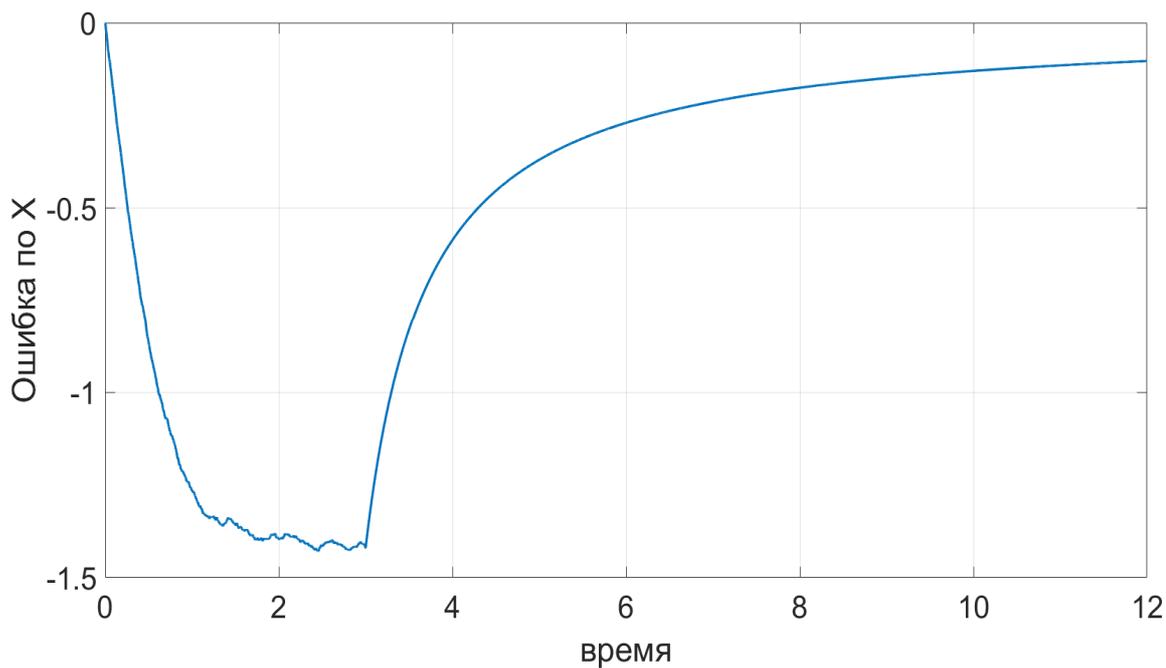


Рис. 7. Ошибка по оси X с параметрами случайного воздействия $m = -2, \sigma = 1$

Fig. 7. Graph of error on the X-axis during random perturbation $m = -2, \sigma = 1$

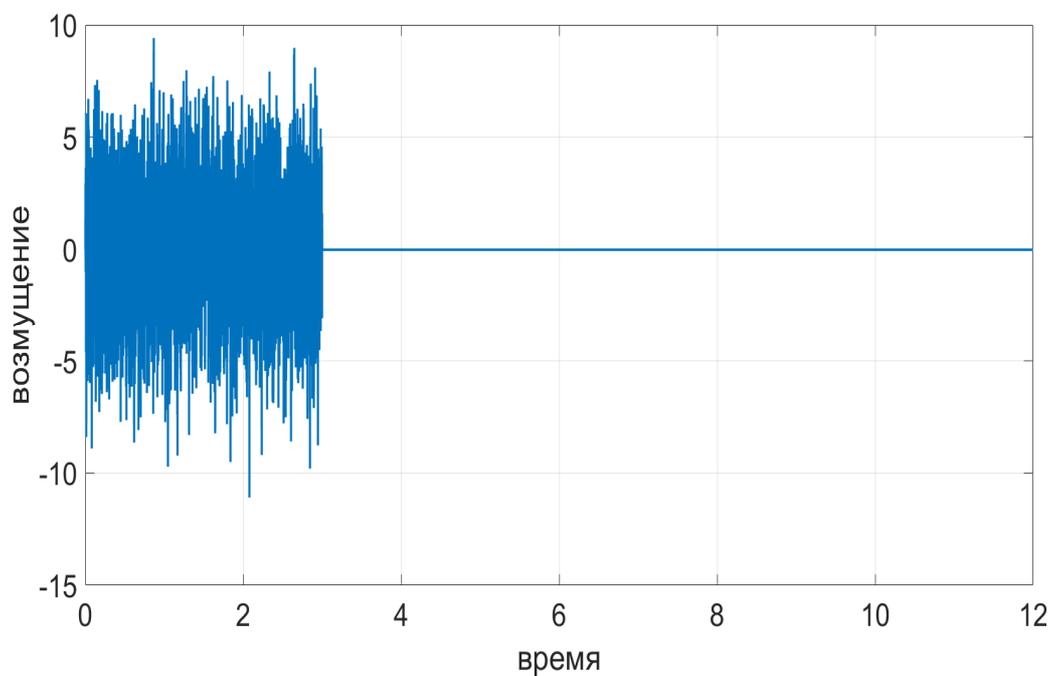


Рис. 8. Случайное воздействие с параметрами $m = 0, \sigma = 3$

Fig. 8. Graph of random perturbation on the X-axis $m = 0, \sigma = 3$

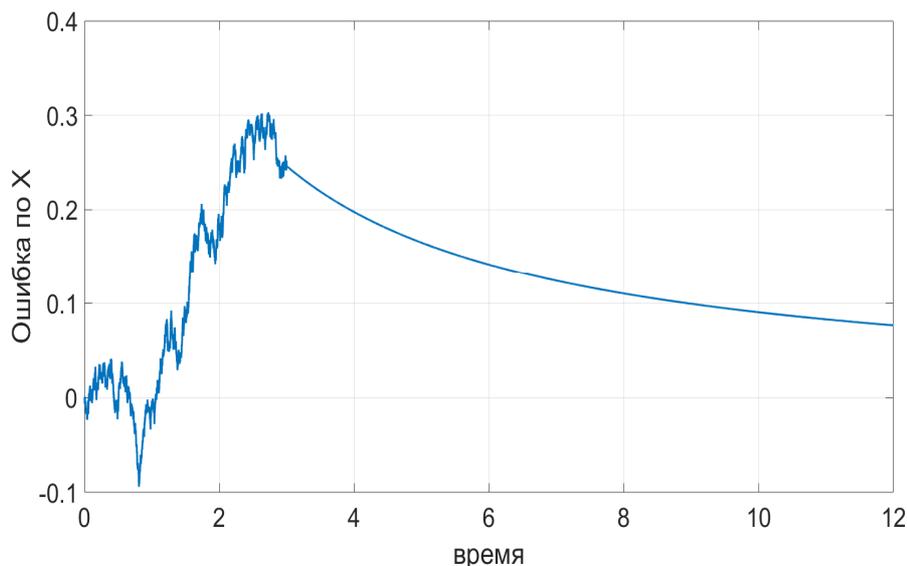


Рис.9. Ошибка по оси X с параметрами случайного воздействия $m = 0$, $\sigma = 3$

Fig. 9. Graph of error on the X-axis during random perturbation $m = 0$, $\sigma = 3$

С ростом дисперсии величина ошибки также возрастает, однако система, в исследуемом диапазоне параметров, остается устойчивой.

Выводы

1. Разработана структура малогабаритного беспилотного мобильного комплекса (МБПК), управление движением которого осуществляется винтовыми движителями с переменным вектором тяги и рулей направления и глубины, для высокоточного перемещения по траектории для забора проб воды в за-

данных точках водоема, как на поверхности, так и на заданной глубине.

2. Предложен метод модульного планирования траектории движения в виде кусочно-линейных отрезков траектории на основе модуля 2R2P, состоящего из двух прямолинейных движений и двух вращений в характерных точках траектории.

3. Исследована реакция МБПК для различных внешних возмущений. Показано, что система устойчива в широком диапазоне изменения параметров.

Список литературы

1. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 4–16.
2. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' RealTime Behavior / S. Melman, V. Bobkov, A. Inzartsev, A. Pavin // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference. Monterey, USA, 2016.

4. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.

5. Reconfigurable Webbased Simulation Environment for AUV / A. Pavin, A. Inzartsev, G. Eliseenko, O. Lebedko, M. A. Panin // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

6. Реконфигурируемая кроссплатформенная среда моделирования поведения необитаемого подводного аппарата / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеенко, Д.Н. Родькин, А.В. Сидоренко, О.А. Лебедко, М.А. Панин // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 28–34.

7. Pavin A. Underwater Object Recognition in Photo Images // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

8. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, О.А. Лебедко, М.А. Панин // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 36–43.

9. Князев С. И., Маслов А. А., Яцун С. Ф. Математическая модель малогабаритного беспилотного подводного комплекса для экологического мониторинга водоемов // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2019). М., 2020. С. 480-483.

10. Князев С.И., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Управляемое движение малогабаритного подводного робототехнического комплекса (МБПК) // Балтийский морской форум. Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2019. С. 40-45.

11. Князев С. И., Яцун А. С., Яцун С. Ф. Управляемое движение малогабаритного подводного робототехнического комплекса (МБПК) // Балтийский морской форум. Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2019. С. 40-45.

12. Ефимов С. В., Князев С. И., Яцун С. Ф. Изучение управляемого движения малогабаритного подводного комплекса – анализатора загрязнений акватории // Cloud of Science. 2020. Т.7, №3. С.488-497.

13. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.

14. Лурье Б.Я., Энрайт П. Дж. Классические методы автоматического управления / под ред. А.А.Ланнэ. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 640 с.

15. Schweppe F. Uncertain dynamic systems. Englewood Cliffs; N.J.: Prentice Hall, 1973. 563 с.
16. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1977. 392 с.
17. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988. 321с.
18. Солодовников В.В. Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Мир, 1999. 495 с.
19. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. М.: Наука, 1987. 304 с.
20. Левин В. И. Оптимальное проектирование в условиях неопределенности. Метод детерминизации // Онтология проектирования. 2013. № 3 (9). С. 41–52.

References

1. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitsky A.V. Planirovanie i osushchestvlenie deistvii obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of actions of a survey underwater robot based on behavioral methods]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2013, no. 1 (15), pp. 4-16 (In Russ.).
2. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' RealTime Behavior. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.
3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform). *Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference*. Monterey, USA, 2016.
4. Kostenko V. V., Pavin A.M. Avtomaticheskoe pozitsionirovanie neobitaemogo podvodnogo apparata nad ob"ektami morskogo dna s ispol'zovaniem fotoizobrazhenii [Automatic positioning of an uninhabited underwater vehicle over objects of the sea floor using photo images]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2014, no. 1(17), pp. 39-47 (In Russ.).
5. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M. A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.
6. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Eliseenko G. D, Rodkin D. N., Sidorenko A.V., Lebedko O. A., Panin M. A. Rekonfiguriruemaya krossplatformennaya sreda modelirovaniya povedeniya neobitaemogo podvodnogo apparata [Reconfigurable cross-platform environment for modeling the behavior of an uninhabited underwater vehicle]. *Podvodnye issledo-*

7. Pavin A. Underwater Object Recognition in Photo Images. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.

8. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Lebedko O. A., Panin M. A. Raspoznavanie i obsledovanie malorazmernykh podvodnykh ob"ektov s pomoshch'yu avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Recognition and survey of small-sized underwater objects using Autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2016, no. 2 (22), pp. 36–43 (In Russ.).

9. Knyazev S. I., Maslov A. A., Yatsun S. F. [Mathematical model of a small-sized unmanned underwater complex for environmental monitoring of reservoirs]. *XXXI Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS-2019)* [XXXI international innovative conference of young scientists and students on machine science (MICMUS-2019)]. Moscow, 2020, pp. 480-483 (In Russ.).

10. Knyazev S. I., Yatsun A. S., Yatsun S. F. [Controlled movement of a small-sized underwater robotic complex (MBPC)]. *Baltiiskii morskoi forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma* [Collection "Baltic sea forum". Materials of the VII international Baltic sea forum]. Kaliningrad, 2019, pp. 40-45 (In Russ.).

11. Knyazev S. I., Yatsun A. S., Yatsun S. F. [Controlled movement of a small-sized underwater robotic complex (MBPC)]. *Baltiiskii morskoi forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma* [Collection "Baltic sea forum". Materials of the VII international Baltic sea forum]. Kaliningrad, 2019, pp. 40-45 (In Russ.).

12. Efimov S. V., Knyazev S. I., Yatsun S. F. Izuchenie upravlyaemogo dvizheniya malogabaritnogo podvodnogo kompleksa - analizatora zagryaznenii akvatorii [Study of controlled movement of a small-sized underwater complex-water pollution analyzer]. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 488-497 (In Russ.).

13. Basharin A.V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. *Upravlenie elektroprivodami* [Management of electric drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p. (In Russ.)

14. Lurie B. Ya., Enright P. J. *Klassicheskie metody avtomaticheskogo upravleniya* [Classical methods of automatic control]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2004. 640 p. (In Russ.).

15. Schweppe F. *Uncertain dynamic systems*. Englewood Cliffs; N. J.: Prentice Hall, 1973. 563 p.

16. Kurzhansky A. B. *Upravlenie i nablyudenie v usloviyakh neopredelennosti* [Management and observation in conditions of uncertainty]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1977. 392 p. (In Russ.).

17. Chernousko F. L. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Estimation of the phase state of dynamical systems]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 321 p. (In Russ.).

18. Solodovnikov V. V. *Avtomaticheskoe upravlenie i vychislitel'naya tekhnika* [Automatic control and computer technology]. Moscow, Mir Publ., 1999. 495 p. (In Russ.).

19. Levin V. I. *Strukturno-logicheskie metody issledovaniya slozhnykh sistem s primeneniem EVM* [Structural and logical methods of studying complex systems using computers]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p. (In Russ.).

20. Levin V. I. Optimal'noe proektirovanie v usloviyakh neopredelennosti. Metod determinizatsii [Optimal design under uncertainty. The method of determinization]. *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*, 2013, no. 3 (9), pp. 41-52 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондырев Владимир Евгеньевич, доктор педагогических наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЭС, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Vladimir E. Bondyrev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Leading Researcher of the Research Institute of RES, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Князев Сергей Иванович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey I. Knyazev, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Королёв Владимир Иванович, аспирант, вице-президент Объединённой судостроительной компании по военному кораблестроению, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Vladimir I. Korolev, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Vice-President of the United Shipbuilding Company for Military Shipbuilding Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>