

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196>

Управляемое движение малогабаритного подводного комплекса (МБПК)

Яцун С.Ф.¹, Князев С.И.¹, Яцун А.С.¹ ✉

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В статье проведено математическое моделирование и исследование движения малогабаритного подводного робота, предназначенного для мониторинга загрязнения объектов гидросферы. Современные методы мониторинга окружающей среды предполагают наличие стационарных постов наблюдения. Задача подвижного управляемого мониторинга в настоящее время остается нерешенной. Одним из путей решения данной проблемы является переход к системам управления, обеспечивающим заданное движение водного комплекса как по поверхности, так и под водой. Поэтому целью данной статьи является изучение и задание основных закономерностей и алгоритмов на основе математических моделей, описывающих управляемое движение малогабаритных подводных комплексов.

Методы. При разработке алгоритма управления движением МБПК использована математическая модель, позволяющая определять пространственно-временное расположение МБПК с переменным вектором тяги. Получены основные математические выражения, определяющие движение МБПК по заданной траектории. Особое внимание уделено той части алгоритма, которая обеспечивает движение МБПК по заданной траектории в подводном режиме при отсутствии связи с глобальной навигационной системой с учетом подводной GPS и расстояния до дна и препятствий. В качестве основного критерия качества управления использована величина отклонения реального положения МБПК от заданного.

Результаты. Для выбора направления движения при мониторинге водоема разработан метод планирования траектории, построенный на кусочно-линейных отрезках, позволяющий зондировать пространство водоема таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса мониторинга при минимальном количестве точек отбора проб. Для этого каждый новый отрезок траектории и точки забора проб планируются с учетом информации о концентрации загрязняющих веществ на предыдущем этапе, а также береговой линии и глубины водоема.

Заключение. В статье рассмотрен метод мониторинга водоемов с применением малогабаритного беспилотного подводного комплекса. Разработана кинематическая и динамическая модели движения МБПК. Предложен метод планирования траектории движения на основе кусочно-линейных отрезков. Разработан алгоритм управления автономным движением подводного аппарата.

Ключевые слова: гидромониторинг; водоем; мобильный подводный комплекс; система управления.

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

© Яцун С.Ф., Князев С.И., Яцун А.С., 2019

Для цитирования: Яцун С.Ф., Князев С.И., Яцун А.С. Управляемое движение малогабаритного подводного комплекса (МБПК) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(5): 185-196. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196>.

Статья поступила в редакцию 13.06.2019

Статья подписана в печать 22.07.2019

Статья опубликована 25.10.2019

Controlled movement of portable underwater system (PUS)

Sergei F. Yatsun ¹, Sergey I. Knyazev ¹, Andrey S. Yatsun ¹ ✉

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The article contains mathematic simulation and research of movement of a portable underwater robot designed to monitor pollution of hydrosphere objects. Modern methods of environmental monitoring suggest the presence of stationary sites. The task of mobile controlled monitoring remains unresolved currently. One of the ways to solve this problem is the transition to control systems that provide a given movement of the water system both on the surface and under water. Therefore, the purpose of this article is to study and set the basic laws and algorithms based on mathematical models that describe the controlled movement of portable underwater systems.

Methods. When developing the motion control algorithm for PUS, a mathematical model was used to determine the spati-temporal location of PUS with a variable thrust vector. The basic mathematical expressions that determine the movement of PUS in a predetermined path are obtained. Particular attention is paid to that part of the algorithm that ensures the movement of PUS in a predetermined path in underwater mode if there is no contact with the global navigation system, taking into accounts the underwater GPS and the distance to the bottom and obstacles. As the main criterion of quality of control system we have used the deviation of the actual position of PUS from the position datum.

Results. To select the direction of movement when monitoring water, a method of planning the trajectory, built on piecewise linear sections, has been developed that allows probing the space of water in such a way as to ensure maximum efficiency of the monitoring process with a minimum number of sampling points. For this, each new segment of the trajectory and sampling points are planned taking into account information on the concentration of pollutants at the previous stage, as well as the coastline and the depth of water.

Conclusion The article discusses the method for monitoring water bodies using a portable unmanned underwater system. The kinematic and dynamic models of the PUS movement are developed. It is proposed a method of planning a trajectory of motion based on piecewise linear segments. We have developed an algorithm of controlling the autonomous movement of the underwater vehicle.

Key words: hydromonitoring; water; mobile underwater complex; 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: Yatsun S. F., Knyazev S. I., Yatsun A. S. Controlled movement of portable underwater system (PUS). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(5): 185-196 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-5-185-196>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

Введение

Промышленные предприятия, в ходе ведения хозяйственной деятельности, часто оказывают негативное воздействие на качество воды в водоемах, осуществляя сбросы загрязненных сточных вод в водные объекты суши. Основным механизмом, позволяющим отследить состояние природных и природно-антропогенных объектов, а также предотвратить их загрязнение, служит система мониторинга, позволяющая выявить превышение концентрации химических, бактериологических и механических загрязнений в воде, что становится основанием для проверки всех источников загрязнений водного объекта, в том числе и промышленных предприятий [1, 2, 3, 4]. Сегодня для гидромониторинга применяются стационарные посты наблюдения. Очевидно, что точечный контроль за состоянием водных ресурсов не обеспечивает полную картину загрязнений водоемов как по площади, так и по глубине [1,2]. Поэтому последние годы все большее распространение получают мобильные беспилотные подводные комплексы, позволяющие автономно перемещаться в воде по заданному маршруту и производить забор проб воды в заданных точках акватории [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Однако в большинстве случаев управление таким объектом производится оператором по определенным каналам связи, что приводит к значительному отклонению аппарата от желаемой траектории, а

иногда и к потере аппарата. Одним из путей решения этой проблемы является переход к системам управления, которые должны обеспечить автономное движение как по поверхности водоема, так и под водой, исключая столкновения с препятствиями. При этом планирование заданной траектории необходимо производить с учетом карты водоема и обеспечивать приемлемую для задач гидромониторинга точность движения. Поэтому разработка алгоритмов управления автономным движением подводного аппарата является актуальной задачей.

Материалы и методы

Описание малогабаритного беспилотного подводного комплекса

Для решения проблемы по повышению эффективности гидромониторинга [10, 5, 1] необходимо разработать малогабаритный беспилотный подводный комплекс (МБПК) для автономного мониторинга водоемов. МБПК представляют собой небольшие, но очень маневренные аппараты, позволяющие длительное время находиться в воде. Наиболее подходящим техническим решением для этого являются МБПК с винтовым приводом и переменным вектором тяги, так как это позволяет осуществлять вертикальное погружение на заданную глубину, зависание, движение по заданной как горизонтальной, так и наклонной траекториям [6,1,9,11].

Одним из основных элементов МБПК является система управления, ко-

торая обеспечивает заданное автономное движение и взаимодействие МБПК с окружающей средой, за счет наличия сенсоров концентрации вредных веществ, сенсоров локальной и глобальной навигации, а также бортового вычислителя, на котором реализованы блок обработки информации, блок принятия решений, блок передачи информации.

Блоки системы управления базируются на силовом каркасе, на котором также расположены винтовые электроприводы с переменным вектором тяги, бортовой источник питания, система технического зрения. МБПК периодически при всплытии передает информацию о своем местоположении на центральный и стационарные посты наблюдения и получает корректирующие сигналы со стороны центрального поста. В подводном положении аппарат

ориентируется с помощью датчиков. Структура исследуемого объекта в пространстве и времени представлена совокупностью измерительных и вычислительных устройств, приведена на рис.1. Бортовой вычислитель системы управления МБПК обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, анализирующих экологическую ситуацию в водоеме, определяет местоположение МБПК относительно заданной траектории, формирует управляющие воздействия [12,13,14,4].

При разработке алгоритма управления движением МБПК использована математическая модель, позволяющая определять пространственно-временное расположение МБПК с переменным вектором тяги. Получены основные математические выражения, определяющие движение МБПК по заданной траектории.

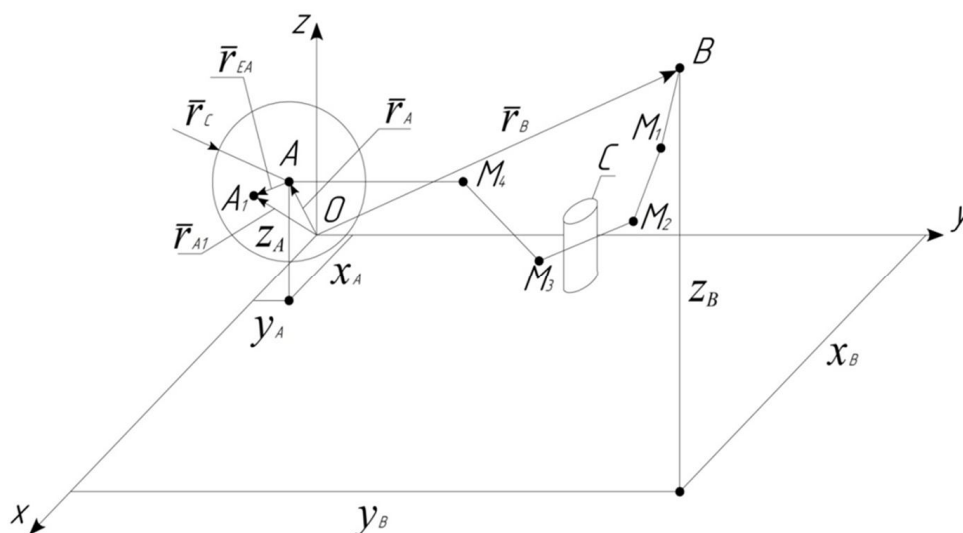


Рис. 1. Схема движения МБПК при мониторинге водоемов:
A – конечное положение МБПК; B – начальное положение МБПК

Fig. 1. The motion scheme of PUS during monitoring of water bodies:
A — final position of PUS; B - the initial position of PUS

Особое внимание уделено той части алгоритма, которая обеспечивает движение МБПК по заданной траектории в подводном режиме при отсутствии связи с глобальной навигационной системой с учетом подводной GPS и расстояния до дна и препятствий. В качестве основного критерия качества управления использована величина отклонения реального положения МБПК от заданного.

Для выбора направления движения при мониторинге водоема разработан метод планирования траектории, построенный на кусочно - линейных отрезках, позволяющий зондировать пространство водоема таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса мониторинга при минимальном количестве точек отбора

проб. Для этого каждый новый отрезок траектории и точки забора проб планируются с учетом информации о концентрации загрязняющих веществ на предыдущем этапе, а также береговой линии и глубины водоема.

На рис. 2 приведена схема движения МБПК в водоеме. Пусть положение МБПК в начальный момент времени определяется точкой B , которая определена радиус- вектором \vec{r}_B , а точка конечного положения МБПК A задается радиус-вектором \vec{r}_A . Задача управления состоит в том, чтобы переместиться из точки B в точку A , не столкнувшись с препятствием C и при этом, отклониться от заданного положения точки A на расстояние, не превышающее величину, определяемую вектором \vec{r}_C .

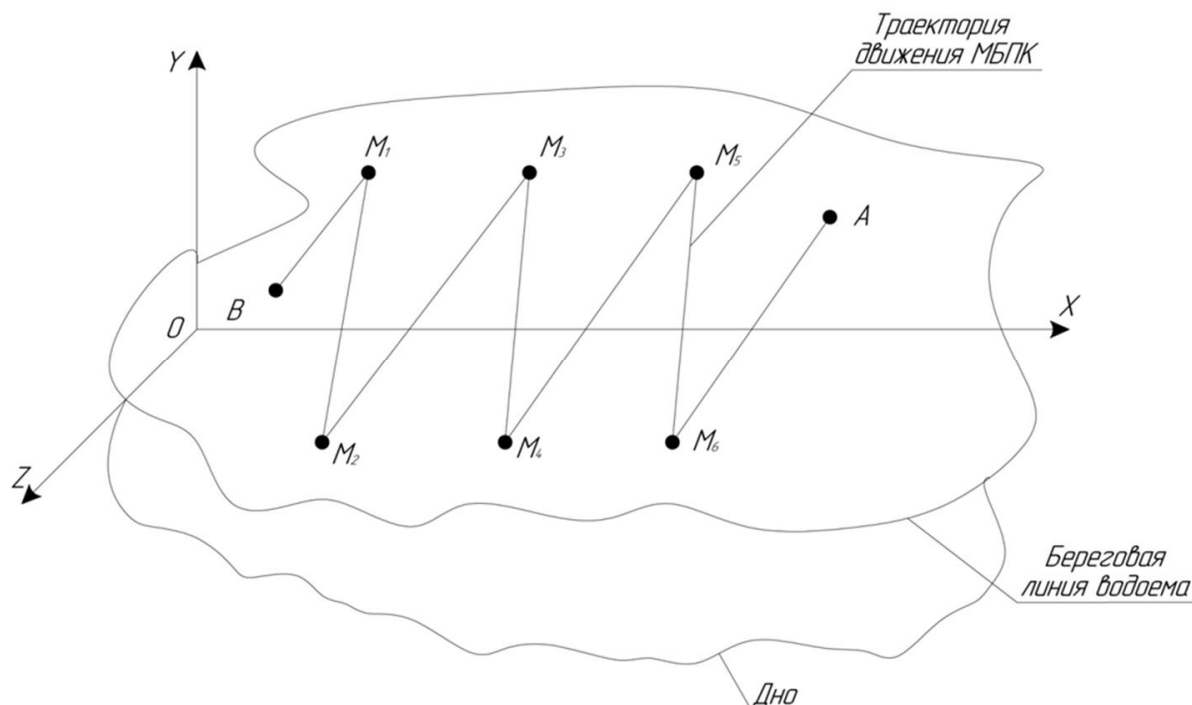


Рис. 2. Схема кусочно-линейной траектории движения МБПК в водоеме

Fig. 2. The layout of coordinate systems of unmanned underwater system PUS

Движение МБПК начинается из точки B . Далее происходит автономное движение по отрезку траектории BM_1 , спланированному на основе информации о глубине и положении МБПК в пространстве, измеряемого навигационной системой при идентификации препятствий происходит корректировка положения МБПК. Система управления должна обеспечивать отклонение от заданной траектории, не превышающее заданные параметры. По мере приближения к конечной точке отрезка траектории M_1 осуществляется планирование нового отрезка прямой $M_1 M_2$, уравнение которого строится по координатам точек M_1 и M_2 , выбранным по результатам замера положения МБПК относительно береговой линии, дна и препятствий.

Процесс мониторинга завершается, если МБПК оказывается в точке A^I , определяемой радиус-вектором $\vec{r}_{AI} = \vec{r}_A + \vec{r}_{EA}$. Модуль радиус-вектора $\vec{r}_{EA} < \vec{r}_C$ определяет допустимую погрешность, возникающую при определении положения точки A в пространстве.

Математическая модель МБПК

Рассмотрим модель движения беспилотного подводного комплекса МБПК (рис. 3). Для проведения кинематического анализа будем считать, что рассматриваемый объект представляет собой систему трех твердых тел: корпус и электроприводы винтов, которые связаны с корпусом цилиндрическими шарнирами, положение и ориентация корпуса в пространстве определяется шестью обобщенными координатами.

Относительное положение электроприводов винтов определяется соответствующими углами поворота α_1, α_3 . Соответствующие матрицы поворотов имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{12} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{32} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

Тело движется относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. Центр масс тела обозначим C . С телом связана подвижная система координат $CX_2Y_2Z_2$. С приводами связаны подвижные системы координат $C_1X_1Y_1Z_1$ и $C_3X_3Y_3Z_3$. Координаты X, Y, Z задают положение точки C в пространстве. Ориентацию тела задают корабельные углы Крылова. Переход от осей неподвижной системы координат $CXYZ$ к системе $CX_2Y_2Z_2$, неизменно связанной с корпусом МБПК, выполняется с помощью трех поворотов.

Выбранным углам соответствуют следующие матрицы поворотов: Поворот на угол ψ относительно оси OZ (поворот определяется матрицей $R(Z, \psi)$). Поворот на угол θ вокруг оси OX^I (поворот определяется матрицей $R(X^I, \theta)$). Поворот на угол φ относительно OY_2 (поворот определяется матрицей $R(Y_2, \varphi)$). Результирующая матрица поворота системы координат $C_2X_2Y_2Z_2$ относительно $OXYZ$ получается путем перемножения трёх основных матриц вращения.

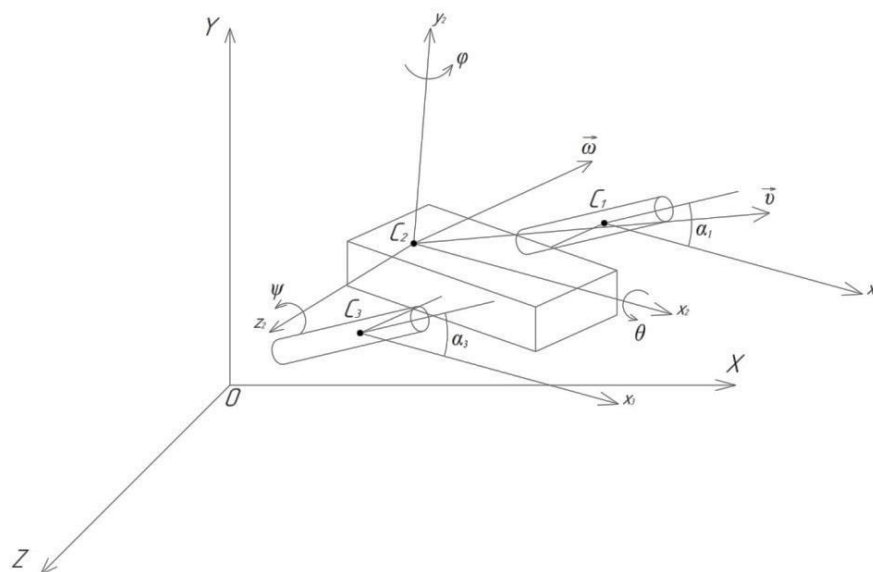


Рис. 3. Схема расположения систем координат беспилотного подводного комплекса МБПК

Fig. 3. The scheme of the piecewise linear trajectory of PUS in water

В данной системе координат O принадлежит точке с максимальной для этого водоема глубиной, поэтому $Y > 0$. Величина Y определяется глубиномером, расстояние до дна и препятствий, соответственно, эхолотом. Координаты X и Z определяются в надводном положении с помощью GPS навигатора, в подводном использованием подводной GPS, реализованной с помощью USBL навигационной системы. Вектор скорости центра масс корпуса в неподвижной системе координат определим следующим образом:

$$\bar{v} = (v_x v_y v_z)^T. \quad (2)$$

Соответственно, вектор угловой скорости:

$$\bar{\omega} = (\omega_x \omega_y \omega_z)^T. \quad (3)$$

Проекция угловой скорости $\bar{\omega}$ в неподвижной системе координат определяются по формулам:

$$\bar{\omega} = \begin{cases} \omega_x = \dot{\theta} \cos \psi - \dot{\phi} \cos \theta \sin \psi \\ \omega_y = \dot{\phi} \cos \theta \cos \psi + \dot{\theta} \sin \psi \\ \omega_z = \dot{\psi} + \dot{\phi} \sin \theta. \end{cases} \quad (4)$$

Для описания управляемого движения робота, дополнительно к системе кинематических уравнений получены дифференциальные уравнения, описывающие движение МБПК.

Планирование траектории движения

При планировании движения МБПК в водоеме принята кусочно-линейная форма траектории (см. рис.2).

На карте водоема выбираются отрезки прямой вдоль которых МБПК должен пройти и произвести забор воды в заданных точках с учетом глубины погружения робота. Для планирования отрезков прямой важно контролировать исходную и конечную точки отрезка траектории.

Планирование отрезков траектории осуществляется в форме параметриче-

ских уравнений на основе приоритетов задачи мониторинга и заданных координат точек A , B и M_j . Начальная и конечная точки траектории соответствуют $M_0=B$ и $M_n=A$. На основании этих данных происходит формирование уравнений отрезков прямой $M_j M_{j-1}$. Ориентация прямой в пространстве определяется вектором $\bar{\alpha}$, образованным направляющими косинусами. Далее происходит движение МБПК по заданным отрезкам прямых $M_j M_{j-1}$.

Результаты и их обсуждение

Система управления МБПК

Желаемое положение МБПК на прямой $M_j M_{j-1}$ обозначается точкой D , определяемой радиус-вектором \bar{r} , а реальное – точкой D' задается вектором \bar{r}' (рис.4).

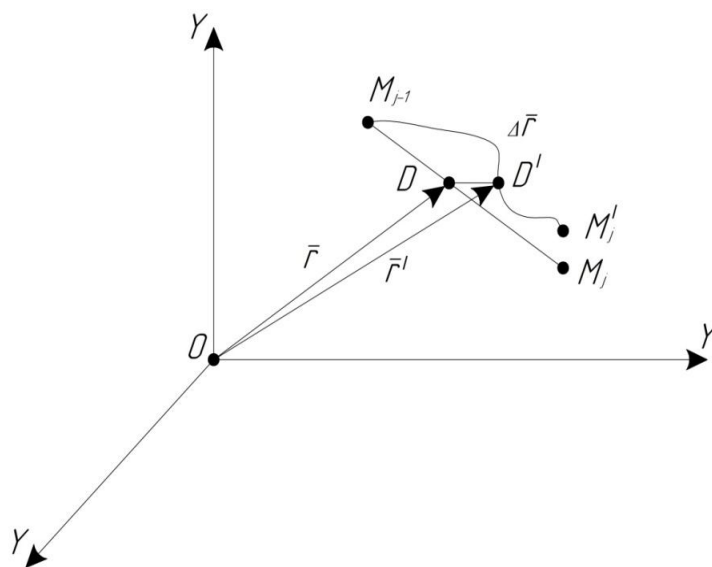


Рис. 4. Схема движения МБПК по прямолинейному отрезку траектории в водоеме

Fig. 4. The motion scheme of PUS along a rectilinear segment of the trajectory in water

В результате действия ряда факторов возникает отклонение реального положения от заданного на величину

$$DD' = \Delta \bar{r}.$$

На компенсацию этого отклонения направлены действия системы управления МБПК. Структурная схема системы управления МБПК показана на рис.5.

Информация о желаемом положении и ориентации $\bar{r}, \bar{\alpha}$ поступает в блок сравнения, сюда же приходит информация о реальном положении МБПК. Многоканальный блок сравнения определяет отклонение от траектории $\Delta \bar{r}$ и ориентации $\Delta \bar{\alpha}$. Эта информация поступает в многоканальный логический регулятор, который вырабатывает вектор управляющих напряжений \bar{U} , которые поступают на соответствующие электроприводы ЭП, в результате чего формируются корректирующие значения угловых скоростей винтов $\bar{\omega}_1$ и углов отклонения рулей $\bar{\beta}$.

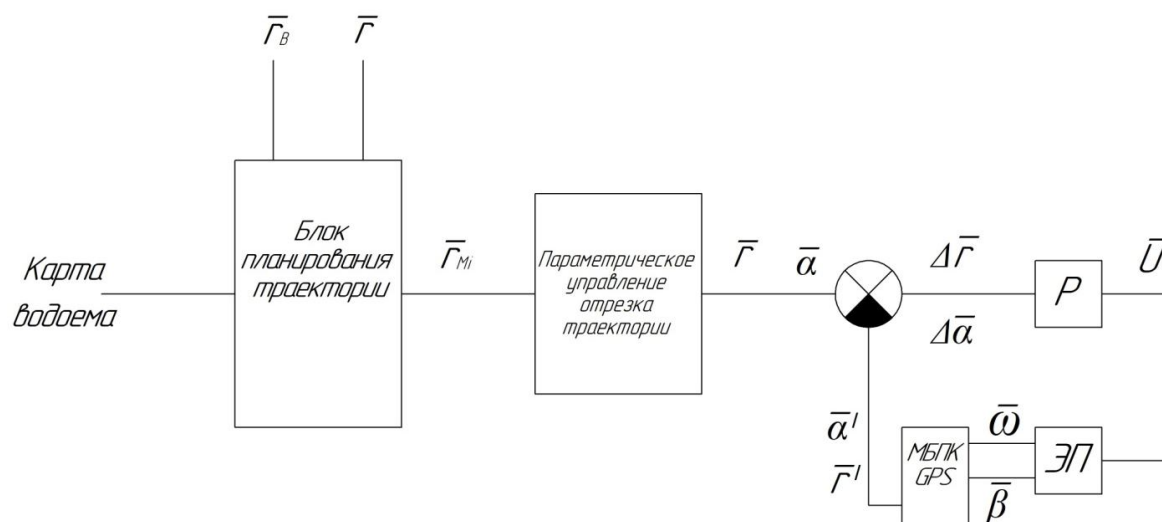


Рис. 5. Структурная схема системы управления МБПК

Fig. 5. The structural diagram of control system of PUS

Реальные координаты МБПК в надводном положении $\bar{r}^1, \bar{\alpha}^1$ задает глобальная навигационная система, включающая GPS навигатор, а для подводного положения - подводный GPS, глубиномер, магнитометр. Для работы подводной GPS создают координатную систему из ГИВ-буев с длиной базы 1-3 километра, принимающую сигналы пингеров подводных объектов, синхронизированных с часами GPS и распределенных во времени. ГИВ-буи с помощью корреляционного приема определяют времена запаздывания от каждого объекта и ретранслируют эти данные на станцию контроля [2].

Станция контроля на основе времен запаздывания и данных о гидростатиче-

ском давлении на подводном объекте осуществляет расчет координат и визуализацию положения каждого объекта.

Выводы

В статье рассмотрен метод мониторинга водоемов с применением малогабаритного беспилотного подводного комплекса.

Разработана кинематическая и динамическая модели движения МБПК. Предложен метод планирования траектории движения на основе кусочно-линейных отрезков.

Разработан алгоритм управления автономным движением подводного аппарата.

Список литературы

1. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Б.В. Лушников, С.И. Савин, К.Г. Казарян, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]. Курск: ЮЗГУ, 2012. Ч. 2. С. 107-111.

2. Ляхов Д. Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. 2012. №. 1. С. 15-23.
3. Робот для диагностики загрязнения воды [электронный ресурс]. URL: <http://aquavitro.org/2010/12/24/ryba-robot-dlya-dagnostiki-zagryazneniya-vody/>.
4. Цариченко С. Г., Николаев В. С. Применение приборных поисковых комплексов для обследования подводных объектов // Пожарная безопасность. 2017. №. 1. С. 67-68.
5. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.]; под общ. ред. М.Д. Агеева; Институт проблем морских технологий. М.: Наука, 2005. 398 с.
6. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Ю.А. Боженков, В.М. Гаврилов, Ю.И. Жуков, И.Б. Иконников [и др.]. Л.: Судостроение, 1986. 185 с.
7. Гафуров С.А., Салмина В.А. Классификация автономных необитаемых подводных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: матер. 11 Всеросс. науч.-практ. конф.: в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 110-128.
8. Необитаемые подводные аппараты военного назначения / под ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2005. 164 с.
9. Яцун С. Ф. [и др.] Развитие малых и средних автономных необитаемых подводных аппаратов на основе бионических (рыбоподобных) принципов движения для решения задач подразделений специального назначения ВМФ РФ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. №. 1. С. 98-109.
10. Jatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov E.N., 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, ed.: A. Ronzhin and V. Shishlakov. 2017. С. 02014.
11. Яцун С.Ф., Лушников Б.В., Политов Е.Н. Управление рыбоподобным робототехническим устройством для мониторинга объектов в гидросфере // Перспективные системы и задачи управления: матер. одиннадцатой Всеросс. науч.-практ. конф.: в 2 т. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 1. С. 208-222.
12. Подводный GPS на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате: опыт использования. URL: unavlab.com
13. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.
14. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. С. 272.

References

1. Lushnikov B.V., Savin S.I., Kazaryan K.G., Yatsun A.S., Mal'chikov A.V. [Bionic floating robot for monitoring natural and technogenic objects in the hydrosphere]. *Uprav-*

lyayemyye vibratsionnyye tekhnologii i mashiny. Sb. nauch. st. [Controlled vibration technologies and machines. Sat. scientific Art.], Kursk, 2012, pt. 2, pp. 107-111 (In Russ.).

2. Lyakhov D. G. Sovremennyye zadachi podvodnoy robototekhniki [Modern tasks of underwater robotics.]. *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*, 2012, no. 1, pp. 15-23 (In Russ.).

3. Robot dlya diagnostiki zagryazneniya vody [Robot for the diagnosis of water pollution]. Available at: <http://aquavitro.org/2010/12/24/ryba-robot-dlya-diagnostiki-zagryazneniya-vody/>.

4. Tsarichenko S. G., Nikolayev V. S. Primenenie pribornyykh poiskovykh kompleksov dlya obsledovaniya podvodnykh ob"ektov [Application of instrument search systems for underwater objects survey]. *Pozharnaya bezopasnost' = Fire safety*, 2017, no. 1, pp. 67-68 (In Russ.).

5. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. at all. *Avtonomnyye podvodnyye roboty: sistemy i tekhnologii; Institut problem morskikh tekhnologiy* [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005 (In Russ.).

6. Bozhenov YU.A., Gavrilov V.M., Zhukov YU.I., Ikonnikov I.B. i dr. *Samokhodnyye neobitayemyye podvodnyye apparaty* [Self-propelled uninhabited underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1986, 185 p. (In Russ.).

7. Gafurov S.A., Salmina V.A. [Classification of autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya. Mater. 11 Vseross. nauch.-prakt. konf.* ["Promising systems and control task". Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical conf.]. Rostov-na-Donu, 2016, vol. 1, pp. 110-128 (In Russ.).

8. *Neobitayemyye podvodnyye apparaty voyennogo naznacheniya* [Uninhabited underwater vehicles for military purposes]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005, 164 p. (In Russ.).

9. Yatsun S. F. i dr. Razvitiye malykh i srednikh avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov na osnove bionicheskikh (rybopodobnykh) printsipov dvizheniya dlya resheniya zadach podrazdeleniy spetsial'nogo naznacheniya VMF RF [Development of small and medium autonomous uninhabited underwater vehicles based on bionic (fish-like) principles of movement for solving the tasks of special forces of the Russian Navy]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = News of SFU. Technical science*, 2019, no. 1, pp. 98-109 (In Russ.).

10. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov E.N., Knyazev S. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modeling and full-scale tests of the prototype. MATEC Web of Conferences, ed.: A. Ronzhin and V. Shishlakov. 2017, pp. 02014.

11. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Politov Ye.N. [Control of a fish-like robotic device for monitoring objects in the hydrosphere]. *Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya. Mater. 11 Vseross. nauch.-prakt. konf.* ["Promising systems and control tasks". Mater. Eleventh All-Russian. scientific-practical Conf.]. Rostov-na-Donu, 2016, vol. 1, pp. 208-222 (In Russ.).

12. Podvodnyy GPS na teleupravlyayemom neobitayemom podvodnom apparate: opyt ispol'zovaniya. [Underwater GPS on a remote-controlled unmanned underwater vehicle]. Available at: unavlab.com.

13. Sosonkin V.L., Martinov G.M. *Sistemy chislovogo programmnoy upravleniya* [Systems of numerical program control]. Moscow, Logos Publ., 2005, 296 p. (In Russ.).

14. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroystva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* [Devices and control systems for underwater robots]. Moscow, Nauka Publ., 2005, 272 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

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

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

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru