

Изучение управляемого движения малогабаритного подводного комплекса- анализатора загрязнений акватории

С. В. Ефимов, С. И. Князев, С. Ф. Яцун

*Юго-Западный государственный университет,
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94*

e-mail: teormeh@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам применения малогабаритных беспилотных подводных комплексов (МБПК) для оперативной разведки и мониторинга акваторий промышленных предприятий. По сравнению с традиционным подходом мониторинга водоема предлагается заменить сеть экологического мониторинга, включающую стационарные пункты наблюдения на робототехнические МБПК. Такой подход к мониторингу предъявляет определенные требования к функционированию роботов, и в первую очередь к алгоритмам автономного управления движением в процессе мониторинга окружающей среды. Остальные функции системы управления (работа бортовой аппаратуры, расход ресурса) являются вспомогательными, обеспечивающими решение главной задачи.

Ключевые слова: подводный робот, анализ загрязнения, экологический мониторинг, автономное управление, беспилотный комплекс.

1. Введение

На сегодняшний день существует проблема повышения качества мероприятий по контролю за водными ресурсами, и в первую очередь для водоемов-охладителей АЭС. Площадь таких водоемов составляет десятки километров, а его водная экосистема не уступает по разнообразию экосистеме природных водоемов и соответствует понятию природно-техногенного объекта. Деградация такого объекта сопровождается ухудшением качества воды создает трудности в эксплуатации АЭС за счет повышения интенсивности накипеобразования, органических отложений и т. д. Поэтому вода должна иметь заданные технические характеристики. Температурный режим водоема-охладителя, существенно влияющий на качество воды, характеризуется отсутствием закономерного изменения температур с глубиной и довольно высокой температурой придонных слоев воды из-за интенсивного ее перемешивания под действием ветровых и стоковых течений, а также сезонной динамики. Температурные условия на разных участках водоема весьма неоднородны и требуют точечного оперативного контроля.

Также одной из задач мониторинга является проведение инвентаризации источников загрязнения, определение мощности выбросов и сбросов загрязнителей окружающей среды.

Во многих промышленно развитых странах создаются автоматизированные системы локального контроля загрязнения воды, которые оснащены датчиками концентраций основных загрязнителей и гидрометеопараметров, аппаратурой для сбора и обработки их показателей.

Обычно, в отдельных точках водоема устанавливаются датчики автоматизированных систем точечного контроля состава и других параметров воды, относящиеся к системе объектового контроля источников загрязнения. Однако применение стационарных постов контроля оказывается неэффективным.

Более перспективным является применение малогабаритных беспилотных подводных комплексов (МБПК) для оперативной разведки и мониторинга акваторий промышленных предприятий обеспечивающих контроль за состоянием воды и позволяющим выявить источники загрязнения в автоматическом режиме. Кроме этого, создается возможность производить непрерывный мониторинг в реальном масштабе времени с учетом сложного рельефа дна и береговой линии водоема. В качестве транспортной платформы МБПК, особенно эффективными могут оказаться малогабаритные подводные аппараты, позволяющие осуществлять движение по поверхности, а также погружение и зависание над объектом в подводном положении, а также горизонтальное движение под водой на заданной глубине. Любое загрязнение сопровождается распространением отравляющих веществ в воде. Применение высокочувствительных полупроводниковых сенсоров анализаторов отравляющих веществ (АОВ), позволит повысить эффективность методов раннего обнаружения источников загрязнений.

2. Описание работы системы мониторинга водоемов на основе мобильного подводного комплекса

Рассмотрим применение МБПК, оснащенные АОВ на примере мониторинга пруда — охладителя Курской АЭС (см. рис. 1). Этот водоем, созданный и функционирующий как неотъемлемая часть технологического процесса производства электроэнергии на атомной станции. Использование воды из него обеспечивает работу теплообменного оборудования, а также технических систем защиты АЭС. «Произдукция» (а именно, вода) должна иметь определенные технические параметры. Ее качество обеспечивается биомелиоративными мероприятиями, включающими направленное рыбозаведение и сохранение аборигенной ихтиофауны. Все это обуславливает приоритет производственной функции пруда-охладителя над дру-

гой — рекреационной, т. е. над использованием водоема в качестве места отдыха населения.

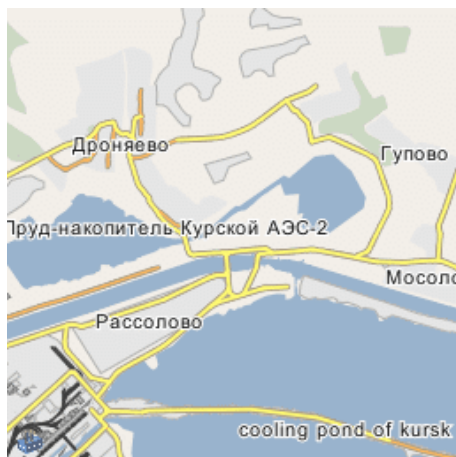


Рисунок 1. Искусственный пруд-охладитель для Курской АЭС. Площадь — 21.5 кв. км

Основными объектами контроля и наблюдения за состоянием водных экосистем в регионе Курской АЭС в рамках экологического мониторинга являются природные водотоки Сейм и Реут, а также водоем-охладитель I и II очереди.

По сравнению с традиционным подходом мониторинга водоема предлагается заменить сеть экологического мониторинга, включающую стационарные пункты наблюдения на группу МБПК.

В этом случае пробы воды отбираются по всей акватории действующего водоема-охладителя с учетом местоположения его характерных участков, которые различаются по глубине, проточности и конфигурации берегов, интенсивности и направленности распространения транзитного потока сбросных вод АЭС.

В случае фиксирования экстремально высоких показателей загрязнения воды служба эксплуатации выявляет причину и требует от водопользователей выполнения мероприятий по предотвращению дальнейшего загрязнения водоема-охладителя, а также сообщает органам госводконтроля о необходимости срочного принятия соответствующих мер. По сути МБПК представляет собой мобильную робототехническую систему (РТС).

Для выбора направления движения при заборе проб воды разработан алгоритм, позволяющий планировать траекторию МБПК и зондировать пространство в заданных точках M_i (см. рис. 1). Далее предполагается, что траектория состоит из отрезков прямых. Конечный пункт траектории определяется точкой A (точка конечного положения МБПК), а положение МБПК в начальный момент времени B ,

соответственно, радиус-вектором r_B определяет текущее положение МБПК. Забор проб воды происходит в запланированных точках траектории M_i . Реальное положение МБПК в этих точках не должно отклоняться на величину $\bar{r}_{EM_i}$ ($|\bar{r}_{EM_i}| < \varepsilon$), где ε — параметр, определяющий точность позиционирования МБПК. Процесс мониторинга завершается, если МБПК оказывается в точке A_1 , определяемой радиус-вектором $\bar{r}_{A_1}$, положение которой определяется радиус-вектором $\bar{r}_{A_1} = \bar{r}_A + \bar{r}_{EA}$. Модуль радиус-вектора $\bar{r}_{EA}$ определяет погрешность, возникающую при определении положения точки A в пространстве [1–7]. Задача управления состоит в том, чтобы переместиться из точки B в точку A , определяемую $\bar{r}_A$, но при этом реальное положение МБПК (точка A_1 , определяемая $\bar{r}_{A_1}$) должна находиться внутри сферы с радиусом $\bar{r}_C$.

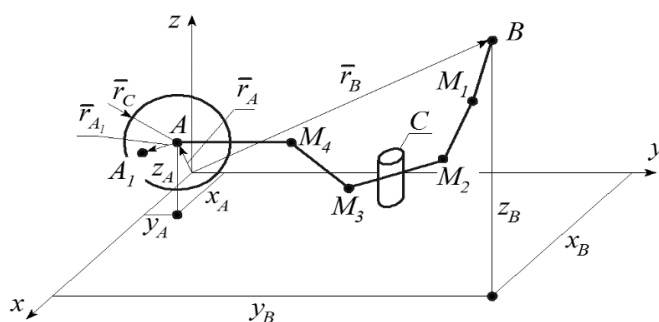


Рисунок 2. Схема движения МБПК при мониторинге водоемов.
 A — конечное положение МБПК; B — начальное положение МБПК

Функционирование РТС выделяет его как объект, задачи управления которым принципиально отличаются от традиционных. В данном случае главную роль играет управление движением в процессе мониторинга окружающей среды, остальные функции РТС (работа бортовой аппаратуры, расход ресурса) являются вспомогательными, обеспечивающими решение главной задачи.

В роли объекта управления может выступать как отдельная РТС, так и система РТС (однородная или разнородная). Последний случай характерен для мониторинга больших по площади территорий [1–3, 5].

3. Описание МБПК

Для решения задач мониторинга водоемов АЭС разработан аппарат, общий вид которого представлен на рис. 2. МБПК состоит из управляемой пары винтов с электроприводами — 2, управляемых боковых плавников с электроприводами — 3 и

нижнего плавника — 4 с электроприводом, корпус для крепления приводов — 1, блока питания, платы управления, датчиков — 7, приемник сигнала.

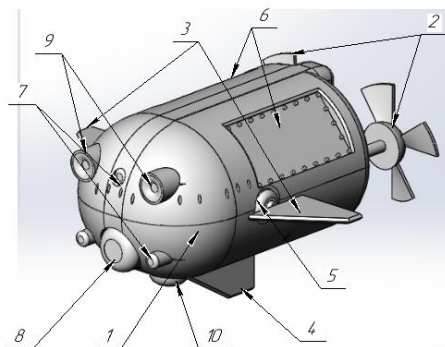


Рисунок 2. Общая 3D - модель автономного необитаемого подводного аппарата:
1 — корпус; 2 — левый и правый винт; 3 — левый и правый рули глубины; 4 — нижний плавник; 5 — изоляция электроприводов; 6 — крышки герметизации; 7 — датчик нефти; 8 — камера; 9 — фонари; 10 — эхолот

В корпусе находятся электроприводы, устройство управления, датчики. Левый и правый рули глубины на корпусе служат для подъема или спуска подводного аппарата, нижний плавник служит для управления по углу рысканья. Винты, которые находятся сзади аппарата, и создают полезную тяговую силу, которая и приводит робота в движение. С помощью эхолота и магнитометра определяется положение МБПК под водой. С помощью рулей глубины осуществляется управление углом дифферента МБПК. При повороте рулей на угол φ_1 , образуется дополнительная гидродинамическая сила, опускающая носовую часть аппарата относительно центра масс на некоторый угол φ_2 (рис. 3а), а при повороте на угол φ_3 — поднимающая носовую часть относительно центра тяжести МБПК на угол φ_4 (рис. 3б). В результате в первом случае аппарат осуществляет погружение, а во втором — всплытие.

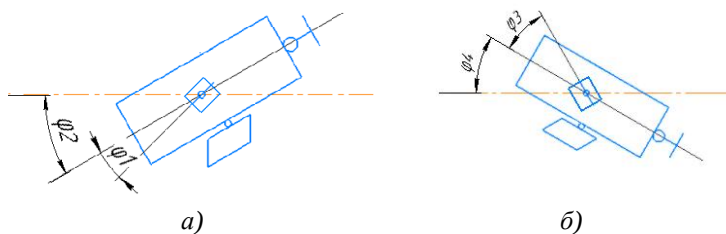


Рисунок 3. Изменение положения МБПК при повороте рулей на угол φ_1 (а) и на угол φ_3 (б) определяется величиной углов φ_2 , φ_4

Чтобы привести МБПК в движение с постоянной скоростью, нужно приложить к ней движущую силу, которая смогло бы преодолеть сопротивление жидкости. Для таких целей используются гребные винты установленные на валах электроприводов.

4. Постановка задачи управления движением по заданной траектории

Одним из модулей системы управления является бортовой вычислитель, который в реальном масштабе времени решает целый ряд задач, в том числе происходит определение азимута по которому необходимо двигаться МБПК к по заданной траектории. Основным измерителем здесь выступает датчик загрязнений и собственные координаты робота. Для этого применяются магнитометр, глубиномер, эхолот, GPS-навигатор, ультразвуковые дальнометры. Данные с датчиков, поступают в бортовую вычислительную систему. С учетом анализа полученной информации по специально разработанному алгоритму происходит определение глубины, азимута, угла рыскания, расстояние до дна и препятствий.

Функциональная схема системы управления приведена на рис. 4. Система управления состоит из трех основных модулей: модели электроприводов, модели управляющих воздействий и динамической модели МБПК.

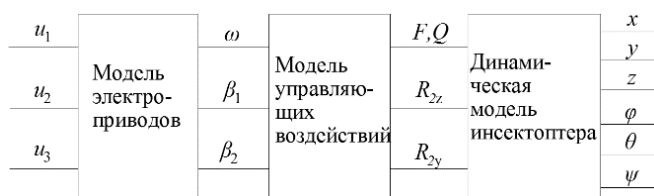


Рисунок 4. Функциональная схема системы автоматического управления движением МБПК

Задачей системы управления является определение значений обобщенных координат, которые представим в виде вектора $\bar{q} = \bar{q}(t) = (X, Y, Z, \varphi, \psi, \theta, \omega_1, \omega_2, \beta_1, \beta_2)^T$ в различные моменты времени для известных управляющих напряжений $u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$, поступающих на электроприводы и являющихся заданными функциями времени t .

Другая задача, решаемая системой управления, состоит в определении значений управляющих напряжений $u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$, обеспечивающих изменение обобщенных координат $\bar{q} = \bar{q}(t)$ по заданному закону. Измеряется положение робота в пространстве и сравнивается с заданными координатами. По величине отклонения

регулятором рассчитываются угловые скорости ω_1, ω_2 и управляющие углы β_1, β_2 , и далее рассчитываются значения $X, Y, Z, \varphi, \psi, \theta$.

Для решения этой задачи модули системы управления связаны между собой обратными связями и блоком обработки информации.

После выхода робота на заданную глубину начинается горизонтальное движение робота по заданному направлению. Для этого с помощью магнитометра происходит определение угла рыскания ψ , сравнение с заданным углом и его корректировка за счет включения подачи на привод руля направления управляющего напряжения u_2 и поворота его на угол β_1 до момента, когда угол рыскания ψ станет равен заданному значению, после этого таймер начинает отсчитывать время движения по заданному направлению.

Принято, что угол β_2 изменяется в интервале $-\pi/4 < \beta_2 < \pi/4$. Величина управляющего напряжения u_2 изменяется в зависимости от величины $\Delta\psi = \psi - \psi_0$, где ψ, ψ_0 — реальный и заданный угол рыскания.

Исследовались два алгоритма вычисления напряжения:

1) *пропорционально-дифференциальный регулятор* $u_2 = u_0 + k_p \Delta\psi + k_d \Delta\dot{\psi}$:

вычисление угла β_1 в зависимости от управляющего напряжения u_2 производится по формуле:

$$\dot{\beta}_1 = -C_1 \cdot \beta_1 + k_1 \cdot u_2$$

2) *логический импульсный регулятор*:

если $\Delta\psi$ по модулю больше некоторого значения ε , то $u_2 = u_0$ и $\beta_2 = \pi/4 \operatorname{sign}(\Delta\psi)$,

если $\Delta\psi < \varepsilon$, то $u_2 = 0$ и $\beta_2 = 0$.

Величина Z контролируется двумя методами. Если $Z < Z_1$, то применяется ультразвуковой дальномер. Если $Z > Z_1$, то используется альтиметр. Рассмотрим подробнее структурную схему системы автоматического управления инсектоптером. В состав системы управления входят микроконтроллер (микрокомпьютер), логический многоканальный регулятор, объект управления и обратные связи.

Управляющее напряжение питания от микроконтроллера, через драйвер, подается на двигатель ОУ1 и сервоприводы (ОУ2, ОУ3), используемые для изменения направление движения инсектоптера. Управление приводами генерируется бортовой системой управления по соответствующим алгоритмам.

В качестве датчиков обратной связи используются: акселерометр, GPS-навигатор, гироскоп, акселерометр, магнитометр, альтиметр. Акселерометр показывает изменение скорости движения трикоптера в пространстве, GPS-навигатор — изменение координат X, Y , гироскоп определяет значение угловых скоростей, а углы поворота φ, ψ определяются акселерометром и угол θ — магнитометром.

В настоящее время необходимы точные и доступные технологии обнаружения вредных веществ для обеспечения непрерывного контроля качества воды и раннего предупреждения загрязнений. Важнейшим инструментом экологического мониторинга водоемов являются датчики для анализа вредных веществ в воде. Любой портативный тестер измеряет количество тяжелых частиц в воде (total dissolved solids — TDS) в PPM (part per million) от 0 до 1000 (иногда до 10000). Чем выше значение — тем хуже вода и тем менее она пригодна для использования в пищу. Допустимая норма — 100–300.

Датчик температуры HEL-775-A-U-0 имеет погрешность 2% и вес порядка 1 гр. Ультразвуковые датчики расстояния US40-16ST/R (сплит) работают в диапазоне 0.2–3 м с погрешностью 10 мм. Результаты проведенных экспериментов сравнивались с теоретическими данными и подтвердили адекватность предложенных моделей.

5. Выводы

1. Разработан метод экологического мониторинга водоемов АЭС на базе малогабаритного беспилотного подводного комплекса МБПК.

2. Разработана конструкция МБПК повышенной маневренности за счет применения винтов с переменным вектором тяги.

3. Бортовая система управления МБПК позволяет автономно двигаться как в надводном, так и подводном положении, что позволяет производить забор проб в заданных точках.

4. Бортовая система навигации включает модули локальной и глобальной навигации, позволяя МБПК двигаться автономно в надводном и подводном положении с высокой точностью. Абсолютная погрешность определения координат точек составляет 0.3–0.7 м.

Литература

- [1] Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Савин А. И., Стуканева С. П. Моделирование полета конвертоплана в различных режимах движения // *Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии*. 2015. № 1(14). С. 55–66.
- [2] Павловский В. Е., Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Стуканева С. П. Математическое моделирование робота с переменным вектором тяги // *Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта* (БТС-ИИ-2015). Труды Второго всероссийского научно-практического семинара. — Санкт-Петербург : Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С. 99–106.

- [3] Павловский В. Е., Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Савицкий А. В. Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2014. № 4(5). С. 49–57.
- [4] Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Савин А. И. Моделирование движения квадрокоптера при отклонении осей несущих винтов относительно корпуса // *Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины*. Сб. науч. ст. в 2 ч. Ч. 1. Юго-Западный государственный университет. Курск, 2014. С. 329–338.
- [5] Яцун С. Ф., Емельянова О. В., Савин А. И. Математическое моделирование конвертоплана с центрально расположенным управляемым приводом // *Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии*. 2015. № 4(17). С. 31–37.
- [6] Павловский М. А., Акинфеев Л. Ю., Бойчук О. Ф. Теоретическая механика. Динамика. — Киев : Выща шк., 1990. С. 480.
- [7] Атиенсия Вильягомес Х. М., Дивеев А. И. Метод сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления динамическим объектом // *Cloud of Science*. 2014. Т. 1. № 2. С. 191–201.

Авторы:

Сергей Венедиктович Ефимов — аспирант кафедры мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

Сергей Иванович Князев — аспирант кафедры мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

Сергей Федорович Яцун — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет

Investigation of Controlled Movement of the Small-Size Underwater Vehicle for Water Pollution Analyse

S. V. Efimov, S. I. Knyazev, S. F. Jatsun

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya, Kursk, Russian Federation, 305040
e-mail: teormeh@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the description of small-sized unmanned underwater vehicles (SSUUV) for operational exploration and monitoring of industrial enterprises water areas and reservoirs. In comparison with the traditional approach of reservoir monitoring, it is proposed to replace the environmental monitoring network, which includes stationary observation points, with a group of robotic SSUUV. This approach to the functioning of robots distinguishes it as an object whose management tasks are fundamentally different from traditional ones. In this case, the main role is played by traffic control in the process of environmental monitoring, the other functions of the RTC (operation of onboard equipment, resource consumption) are auxiliary, providing the solution of the main task.

Keywords: underwater robot, pollution analysis, environmental monitoring, autonomous control, unmanned systems.

References

- [1] Yatsun S. F., Yemel'yanova O. V., Savin A. I., Stukaneva S. P. (2015) *Izvestiya YUZGU. Seriya Tekhnika i tekhnologii*, (14):55–66. [Rus]
- [2] Pavlovskiy V. Ye., Yatsun S. F., Yemel'yanova O. V., Stukaneva S. P. (2015) Matematicheskoye modelirovaniye robota s peremennym vektorom tyagi. In *Bespilotnyye transportnyye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta» (BTS-II-2015)*. Trudy Vtorogo vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo seminar. (Saint-Petesburg, Izd-vo «Politehnika-servis»), pp. 99–106. [Rus]
- [3] Pavlovskiy V. Ye., Yatsun S. F., Yemel'yanova O. V., Savitskiy A. V. (2014) *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, (5):49–57. [Rus]
- [4] Yatsun S. F., Yemel'yanova O. V., Savin A. I. (2014) Modelirovaniye dvizheniya kvadrokoptera pri otklonenii osey nesushchikh vintov otnositel'no korpusa. In *Vibratsionnyye tekhnologii, mekhatronika i upravlyayemye mashiny. Sb. nauch. st.* (Kursk, Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, Vol. 1). pp. 329–338. [Rus]
- [5] Yatsun S. F., Yemel'yanova O. V., Savin A. I. (2015) *Izvestiya YUZGU. Seriya Tekhnika i tekhnologii*, 4(17):31–37. [Rus]
- [6] Pavlovskiy M. A., Akinfeyev L. Yu., Boychuk O. F. (1990) *Teoreticheskaya mekhanika. Dinamika*. (Kiyev, Vyshcha shk.). [Rus]
- [7] Atiencia Villagomez J. M., Diveev A. I. (2014) *Cloud of science*, 1(2):191–201. [Rus]