

Разработка и прототипирование распределенной системы управления геологоразведывательным необитаемым подводным аппаратом

И. М. Новожилов¹✉, М. Ю. Шестопапов¹,
Д. Д. Котов², Т. В. Кухарова²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. Описывается процесс разработки системы управления (СУ) автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) для небольших глубин. Проведено исследование перспективы применения АНПА. Описаны работы по разработке и тестированию модуля регулятора для системы управления. Разработана лабораторная установка для демонстрации работы разработанной системы управления, которая может быть установлена на автономный необитаемый подводный аппарат или использоваться в образовательных целях.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, система управления, архитектура системы управления, Arduino

Для цитирования: Разработка и прототипирование распределенной системы управления геологоразведывательным необитаемым подводным аппаратом / И. М. Новожилов, М. Ю. Шестопапов, Д. Д. Котов, Т. В. Кухарова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 4. С. 17–28. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-17-28.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development and Prototyping of a Distributed Control System for an Uninhabited Underwater Exploration Vehicle

I. M. Novozhilov¹✉, M. Yu. Shestopalov¹,
D. D. Kotov², T. V. Kukharova²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Management of St. Petersburg Mining University., Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. Describes the process of developing a control system (CS) for an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUUV) for shallow depths. A study of the prospects for the use of AUUV has been conducted. The work on the development and testing of the controller module for the control system is described. A laboratory installation has been developed to demonstrate the operation of the developed control system, which can be installed on an autonomous uninhabited underwater vehicle or used for educational purposes

Keywords: autonomous uninhabited underwater vehicles, control system, control system architecture, Arduino

For citation: Development and Prototyping of a Distributed Control System for an Uninhabited Underwater Exploration Vehicle / I. M. Novozhilov, M. Yu. Shestopalov, D. D. Kotov, T. V. Kukharova // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 4. P. 17–28. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-17-28.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Исследования океанов, рек и озер – задача сложная и дорогостоящая. Для обследования дна, сбора проб воды на разных глубинах и проведения других видов деятельности, связанных с научными или инженерными работами, требуется использование судов, водолазов или батискафов. Благодаря развитию технологий появились подводные аппараты, способные упростить и удешевить научные исследования океана [1].

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) – это класс аппаратов, выполняющих работы под водой без связи с оператором (в некоторых случаях возможна кратковременная связь для принятия решения в критической ситуации либо для обновления маршрута следования). АНПА все больше заменяют традиционные методы исследования океана [2].

АНПА сегодня являются одним из перспективных направлений развития робототехники [3], однако уровень современной техники и технологии, применяемых при разработке и создании АНПА, не позволяет реализовать все потенциальные возможности аппаратов этого класса. Их автономность из-за низкой энергоемкости источников энергии мала, система манипуляторов слабо развита, уровень использования искусственного интеллекта (ИИ) в системах управления низок. Для развития АНПА актуальна разработка системы управления [4]. Неопределенность пространства и сильные внешние возмущения делают разработку системы управления для автономного необитаемого аппарата сложной и интересной задачей.

Важным входным параметром для регулятора системы управления является позиция аппарата в глобальной системе координат.

Динамика совершенствования СУ АНПА позволяет определить концептуальный подход к их развитию.

Среди направлений автоматизации АНПА, по мнению специалистов, наиболее перспективно проведение фундаментальных и прикладных исследований в области внедрения средств и методов ИИ в СУ АНПА [5]. Интеллектуальный АНПА должен эффективно действовать в условиях частичной и полной неопределенности в недетерминированной среде. При этом СУ АНПА,

независимо от его функционального назначения, должна обеспечивать движение по маршруту, выбор оптимальных режимов движения в зависимости от поставленной задачи и внешних условий, принятие решения о выполнении задачи, распознавание образов, донесение о выполняемой работе, возвращение в заданную точку.

В данной статье описан процесс разработки системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом для небольших глубин. Проведено исследование перспективы применения АНПА. Описаны работы по разработке и тестированию модуля регулятора для системы управления. Разработана лабораторная установка для демонстрации работы разработанной системы управления, которая может быть установлена на автономный необитаемый подводный аппарат или использоваться в образовательных целях.

Постановка задачи. В статье ставятся следующие задачи:

- разработка модуля регулятора и его тестирование;
- проектирование электрической схемы для системы управления;
- разработка лабораторной установки;
- разработка программного модуля для управления установкой;
- анализ работы лабораторной установки.

Существующие исследования. Разработка подводных необитаемых аппаратов в настоящий момент времени является быстроразвивающейся областью. Разработка систем управления для необитаемых подводных аппаратов есть сложная и малоизученная задача.

Проводятся множественные исследования по улучшению алгоритмов управления. В исследовании [6] описана версия алгоритмов функционирования системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом, базирующаяся на мультиагентной структуре системы управления АНПА. Их отличие от известных алгоритмов заключается в принципах, заложенных в их основу и направленных на обеспечение универсальности алгоритмов, позволяющей использовать их в системах управления АНПА различного назначения.

Современные технологии дают возможность реализовывать сложные системы управления, поз-

воляющие одновременно контролировать большое количество необитаемых подводных аппаратов [7], [8]. В [9] представлен подход для организации группового управления подводных аппаратов на основе многоконтурного алгоритма адаптации позиционно-траекторной системы управления подвижными объектами с контуром оценивания неизмеримых параметров, эталонной моделью и контуром обеспечения астатизма 2-го порядка. Разрабатываются подводные аппараты класса микро с функцией группового управления [10].

Системы управления верхнего уровня различным образом совершенствуются. В [11] разрабатывается поведенческая система управления автономным необитаемым аппаратом.

В [12], [13] рассмотрена нелинейно связанная динамическая модель АНПА, на основе которой синтезируется СУ движением по методу позиционно-траекторного управления. Система управления решает задачи перемещения по заданной траектории с заданной скоростью, перемещения от точки к точке, позиционирования. Для адаптации системы управления проектируется надежный датчик отклонений, который обеспечивает асимптотическую оценку аддитивных возмущений заданного класса. Предлагается метод распределения сил и моментов на исполнительные механизмы АНПА. Приведены результаты компьютерного моделирования интеллектуальной системы управления и навигации, полученные с помощью разработанного имитационного комплекса.

Значительная часть исследований посвящена системам управления АНПА и применению теории автоматического управления к управлению АНПА.

Создаются различные адаптивные системы управления [14], [15]. В [16] описывается контроллер, позволяющий компенсировать интегральную ошибку при резком изменении входного сигнала. Разработаны самонастраивающиеся ПИД-регуляторы для АНПА [17]. Адаптивность и самонастройка регуляторов для АНПА – это ключевые направления исследований, так как за счет неопределенностей окружающей среды и наличия внешних возмущений невозможно точно настроить систему управления заранее.

Широко используется машинное обучение для контроллеров. Применяются нейронные сети для регулятора АНПА вместо ПИД-регулятора, в некоторых аспектах наблюдается улучшенная производительность [18]. Сложность задачи при-

менения нейронных сетей для управления АНПА заключается в невозможности непосредственной оценки работы системы [19]. Данное направление – это один из методов адаптации систем управления к неопределенностям, с которыми сталкивается АНПА.

В исследовании [4] описаны алгоритмы адаптивных систем управления мобильными объектами, рассмотрена задача позиционирования в точке в предположении параметрической неопределенности и влияния неизмеримых возмущений на подводный объект. С помощью метода управления позиционной траекторией синтезированы основные алгоритмы расчета управляющих сил и моментов.

Синтез регулятора. В разрабатываемой системе управления регулятор необходим для управления углом рысканья или тангажа:

- объект управления – это сам необитаемый подводный аппарат;
- угол рысканья или тангажа задается оператором за пультом управления аппаратом;
- управляющее воздействие на объект управления задается изменением оборотов двигателя;
- с датчика положения передаются текущие значения регулируемого параметра;
- вычисления управляющего сигнала осуществляются на плате Arduino. Опишем поэтапно алгоритм для вычисления управляющего воздействия:

$$A = P \times K_p + I \times K_i + D \times K_d,$$

где A – вычисляемый управляющий сигнал; P – пропорциональная составляющая ПИД-регулятора; I – интегральная составляющая ПИД-регулятора; D – дифференциальная составляющая ПИД-регулятора; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной, дифференциальной составляющих ПИД-регулятора;

$$P = SP - IN$$

(SP – заданное значение; IN – значения с датчика положения);

$$I = I + (SP - IN) \times dt,$$

где dt – период дискретизации системы

$$\begin{aligned} \text{ERROR} &= SP - IN, \\ \text{ERROR} &= \frac{(\text{ERROR} - \text{PRERROR})}{dt} \end{aligned}$$

(PRERROR – ошибка на предыдущей итерации).

Для простого вычисления коэффициентов используется метод Циглера–Никольса. Это – приближительный метод настройки. Принцип вычисления следующий: необходимо довести систему до границы устойчивости и появления устойчивых колебаний в контуре. Автоколебания достигаются за счет нулевого значения интегральной и дифференциальной составляющих и выбора коэффициента передачи. Установив значение коэффициента передачи, периода автоколебаний и амплитуды, настройки регулятора рассчитывают по эмпирическим формулам. Достоинство метода заключается в его простоте, а основной недостаток – в том, что не учитываются требования к запасу устойчивости. В табл. 1 приведены эмпирические формулы.

Табл. 1. Расчет коэффициентов регулятора с использованием метода Циглера–Никольса
Tab. 1. Calculation of regulator coefficients using the Ziegler–Nichols method

Тип регулятора	K_p	K_i	K_d
P	$0.50 K_u$	–	–
PI	$0.45 K_u$	$0.54 K_u/T_u$	–
PID	$0.6 K_u$	$1.2 K_u/T_u$	$3 K_u T_u/40$

Логика работы регулятора реализована в виде алгоритма на плате Arduino Nano.

Исследование регулятора. Для отладки и проверки работы регулятора используется связка Arduino Nano и датчика положения MPU-6050.

Для разработки используем IDE MS Visual Studio Code с расширением Platform IO, позволяющим прошивать платы Arduino.

Далее приведено описание алгоритма работы программы по управлению рысканьем аппарата.

Библиотека, разработанная для работы с ПИД-регулятором на контроллерах Arduino, позволит упростить разработку.

В начале работы создаем классы для работы с библиотекой.

```
PID left_motor_pid(&input, &output_left, &setpoint, Kp, Ki, Kd, REVERSE);
```

```
PID right_motor_pid(&input, &output_right, &setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

В конструктор класса передаются:

- адрес переменной, хранящей значение с датчика положения;
- адрес переменной для записи регулирующего воздействия;
- адрес переменной, хранящей требуемое значение;

- коэффициенты ПИД-регулятора, пропорциональный, интегральный и дифференциальный соответственно;

- направление движения к требуемому значению.

Устанавливаем автоматический режим работы:

```
left_motor_pid.SetMode(AUTOMATIC);
right_motor_pid.SetMode(AUTOMATIC);
```

Каждую итерацию считываем значение с датчика и запускаем вычисление управляющего воздействия:

```
input = mpu.getAngleZ();
left_motor_pid.Compute();
right_motor_pid.Compute();
```

При взаимодействии с датчиком положения используется библиотека MPU6050_light, предоставляющая простой интерфейс для работы.

При инициализации программы запускаем процесс калибровки датчика положения:

```
mpu.begin();
mpu.calcOffsets();
```

Алгоритм управления тангажом аппарата аналогичен алгоритму, описанному ранее.

Доработаем программный модуль регулятора для вывода мощности движителей в плоттер по последовательному соединению, входящий в комплект IDE Arduino.

Требуемое значение регулятора по углу рысканья установлено на 20°, регулятор начинает работу из положения 0°.

На рис. 1 приведен график работы при ручном изменении значений датчика положения по вертикальной оси.

На графике можно наблюдать корректную работу регулятора. При отклонении в левую сторону видно изменение мощности левого движителя. При отклонении в правую сторону изменяется мощность правого движителя.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что работа регулятора корректна.

На рис. 2 приведен график работы регулятора при управлении рулями глубины и изменении положения датчика по тангажу при требуемом значении 5°.

Разработка лабораторной установки. Тестирование и отладка реального оборудования – утомительная задача. В частности, в случае с подводными аппаратами необходимо каждый раз выполнять его транспортировку и спуск на воду. Также рискованно экспериментировать с еще не полностью работоспособным прототипом под-

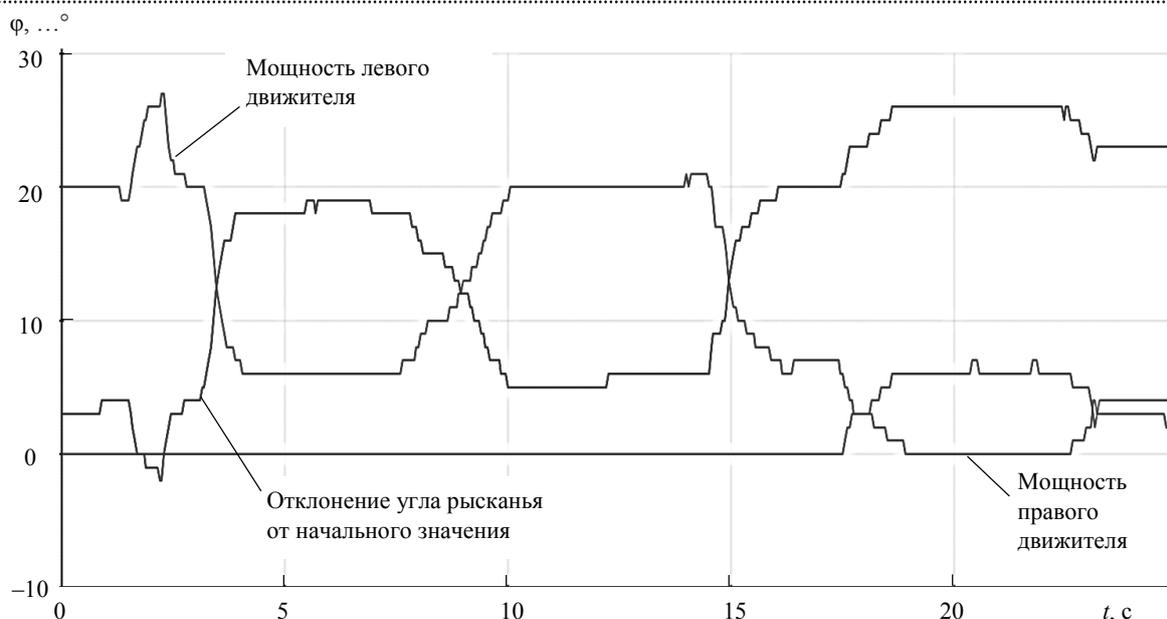


Рис. 1. Работа регулятора по рысканью

Fig. 1. Operation of the yaw control

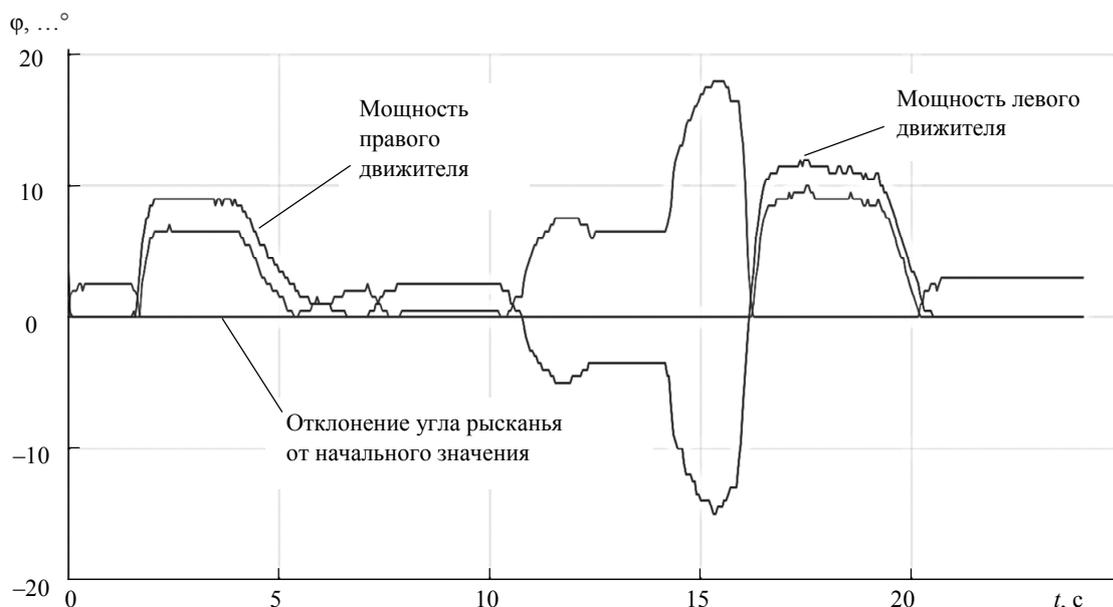


Рис. 2. Работа регулятора по тангажу

Fig. 2. Operation of the pitch control

водного аппарата, оснащенного дорогостоящим оборудованием. В данном контексте использование лабораторной установки необходимо для ускорения разработки робототехнических систем, а также позволяет разработке быть доступной по затратам на рабочую силу и тестирование.

Моделирование и проектирование экспериментальных моделей для проверки систем являются основой для разработки автономного необитаемого подводного аппарата.

В исследовании лабораторная установка необходима для качественной отладки системы управления, смоделированной математически.

Двигатель и рули глубины. В качестве двигателя будет использоваться двигатель с бесщеточным двигателем и магнитной муфтой для передачи тяги на винт, для его работы требуется электронный регулятор скорости.

Бесщеточный двигатель работает от напряжения 12 В; потребление тока и скорость вращения управляются электронным регулятором скорости. На максимальной скорости двигателю требуется 20 А.

Взаимодействие с электронным регулятором скорости осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Электронный регулятор скорости – это электронная схема, которая контролирует и регулирует скорость электродвигателя. Он также может обеспечивать реверс двигателя и динамическое торможение.

Электронный регулятор скорости получает питание от батареи и в зависимости от ШИМ сигнала регулирует скорость движителей. Максимальный непрерывный ток на выходе регулятора 30; 40 А до 10 с. На входе требуется 12 В.

Для управления рулями глубины используются два сервопривода и вал для передачи изменения угла с сервоприводов на руль глубины.

В качестве вала используется простой металлический стержень к винтам для крепления на концах.

Выбран сервопривод модели MG996R. Сервопривод MG996R – это улучшенная версия сервопривода MG995, он часто используется для установки на радиоуправляемые модели. По сравнению с предыдущей моделью обладает повышенным крутящим моментом при стандартном напряжении 4.8...7.2 В; виброустойчив.

Аккумуляторные батареи и преобразователи напряжения. Для питания демонстрационной установки необходимы автономные источники питания. Для движителей требуются аккумуляторы, способные выдавать большой ток, поэтому стоит использовать литий-полимерный аккумулятор.

Выбран аккумулятор, состоящий из трех литий-полимерных ячеек и способный выдавать на выходе до 12.6 В при полном заряде. Его емкость составляет 6000 мА · ч. Для питания микроконтроллеров требуется напряжение 5 В и ток 1 или 2 А, поэтому необходимо использовать понижающий преобразователь напряжения.

В статье будет использоваться преобразователь напряжения с подстроечными резисторами, позволяющими гибко настраивать выходное напряжение. Также преобразователь поддерживает протокол UART и способен передавать по нему текущие значения тока и напряжения, что позволяет оперативно следить за питанием установки.

Контроль положения и передача параметров. Для контроля положения самый очевидный вариант – это использование датчика MPU-6050.

MPU6050 – это микроэлектромеханическая система (MEMS), которая состоит из 3-осевого акселерометра и 3-осевого гироскопа внутри нее. С его помощью можно измерять ускорение, скорость, ориентацию, смещение и многие другие параметры, связанные с движением системы или объекта. Этот модуль имеет внутри себя цифро-

вой процессор движения (DMP), который достаточно мощен для выполнения сложных вычислений и освобождает подключенный к нему микроконтроллер от необходимости дополнительных вычислений.

Для передачи данных с демонстрационного стенда на компьютер требуется радиопередатчик. Радиопередатчик необходим, так как оборудование со стенда может быть установлено в модель необитаемого автономного подводного аппарата, и, соответственно, требуется возможность удаленно получать и передавать данные.

Выбор частот для передатчика ограничен диапазоном, доступным для гражданских работ. Ограничения накладывает и небольшой выбор устройств в свободной продаже. Исходя из этого, выбран передатчик HC12 с частотой работы 433 МГц.

HC-12 – это полудуплексный передатчик 20 дБм (100 мВт), соединенный с приемником, который имеет чувствительность 117 дБм ($2 \times (10...15) \text{ Вт}$) при скорости передачи 5000 бит/с.

В сочетании с внешней антенной этот передатчик способен передавать данные на расстояние до 1 км на открытом воздухе.

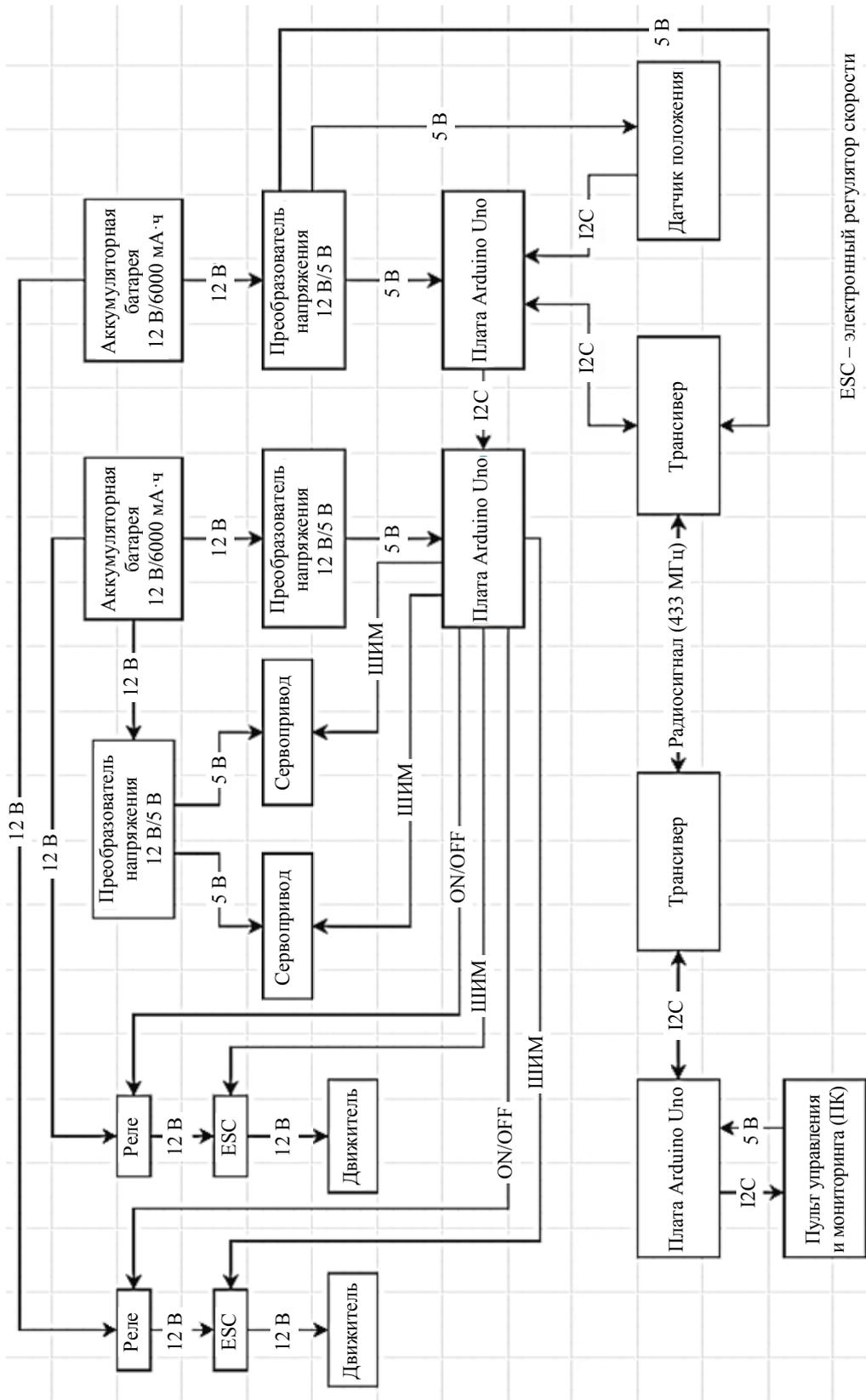
Электрическая схема и информационные каналы будут описаны в виде блок-схемы установки. Схема подключения устройств с обозначением линий питания и каналов передачи сигналов представлена на рис. 3.

В список компонентов демонстрационной установки входят:

- 2 аккумуляторные батареи;
- 3 понижающих преобразователя напряжения;
- 2 электромеханических реле;
- 2 движителя;
- 2 сервопривода;
- 2 трансивера;
- 2 электронных регулятора скорости;
- 3 платы Arduino Uno;
- 1 датчик положения MPU 6050.

Схема установки состоит из трех модулей, каждый из которых содержит в себе плату управления и вспомогательные устройства.

Первый модуль отвечает за получение и обработку сигналов с датчика положения, отправку данных о положении на модуль взаимодействия с движителями и сервоприводами, получение и передачу данных по радиоканалу от модуля управления и мониторинга.



ESC – электронный регулятор скорости

Рис. 3. Блок-схема установки
Fig. 3. Block diagram of the installation

Второй модуль генерирует управляющие воздействия для сервоприводов и двигателей на основе входных данных, полученных от модуля положения.

Третий получает данные о положении и передает их на пульт управления и мониторинга для графического отображения положения устройства, а также получает команды управления с пульта и передает их на модуль связи по радиоканалу.

Питание сервоприводов осуществляется с помощью преобразователя напряжения, который преобразует напряжение 12 В с аккумулятора в 5 В, нужных для работы. Управляются сервоприводы с помощью ШИМ-сигнала, модулируемого микроконтроллером Arduino UNO.

Два микроконтроллера, не связанные с пультом управления, также питаются от преобразователя напряжения. Микроконтроллер, передающий данные на пульт управления, получает питание через USB-порт, в который отправляет данные по протоколу I2C.

Запуск двигателей осуществляется с помощью реле, управляемого с Arduino. Двигатели и электронные регуляторы скорости питаются от батареи напрямую.

Подключение датчика положения. Данные от датчика положения передаются по протоколу I2C с использованием SCL и SDA. Схема подключения датчика положения к Arduino показана на рис. 4. На ней SCL – контакт для синхронизации по протоколу I2C, SDA – контакт для передачи данных по протоколу I2C.

Рабочее напряжение датчика от 2.4 до 3.5 В. На модуле стоит стабилизатор напряжения поэтому возможно питание от 5 В.

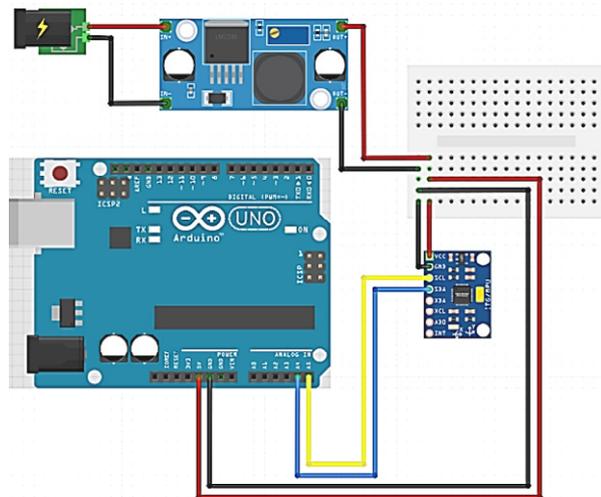


Рис. 4. Блок-схема «Подключение датчика положения»

Fig. 4. Block diagram Encoder connection

Для управления MPU 6050 используется библиотека MPU6050_light – она предоставляет интерфейс для калибровки датчика и получения углов отклонения от начального положения, полученного при калибровке, и библиотека Wire для работы по протоколу I2C. Для подключения используем директиву include:

```
#include <MPU6050_light.h>
#include <Wire.h>
```

При настройке добавим команды для вычисления коэффициентов отклонения и инициализируем работу по I2C-протоколу:

```
byte status = mpu.begin();
mpu.calcOffsets();
Wire.begin();
```

Постоянно иницилируем обновление данных на датчике положения и записываем их в переменную каждую секунду:

```
mpu.update();
if ((millis() - timer) > 1000)
{
    _angles.x = static_cast<int16_t>
(mpu.getAngleX());
    _angles.y = static_cast<int16_t>
(mpu.getAngleY());
    _angles.z = static_cast<int16_t>
(mpu.getAngleZ());
}
```

Подключение трансивера HC-12. Для работы лабораторной установки требуется два трансивера. Первый трансивер установлен непосредственно на установке. В его функции входит передача данных о положении установки и получении команд управления. Второй установлен на пульте управления установкой и используется для получения данных о положении установки и отправки команд управления.

Согласно документации на модуль, необходимо подключить конденсатор емкостью от 22 мкФ до 1 мФ в цепь параллельно контактом питания и земли – так необходимо подключить выпрямительный диод между питанием и контактом платы. Схема подключения продемонстрирована на рис. 5.

Для работы с модулем не требуются специальных библиотек, данные передаются просто по протоколу Serial.

Необходимо создать две переменные и инициализировать ими класс для работы с Serial-портом:

```
const byte HC12RxdPin = 4; // Линия приема
данных на HC12
```

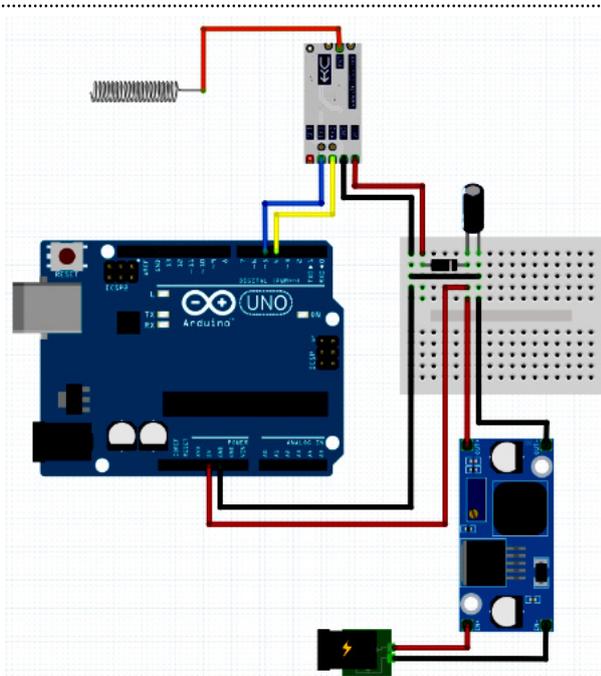


Рис. 5. Подключение трансивера HC-12
Fig. 5. Connecting the HC-12 transceiver

```
const byte HC12TxdPin = 5; // Линия передачи данных на HC12
```

```
SoftwareSerial HC12(HC12TxdPin, HC12RxdPin);
```

Также в начале работы нужно запустить Serial-порт.

```
Serial.begin(115200);
```

Подключение сервоприводов и двигателей. Управление как двигателями, так и сервоприводами осуществляется с помощью ШИМ-модуляции. Для генерации ШИМ-сигнала с платы Arduino используются цифровые выходы, поддерживающие ШИМ-модуляцию, и библиотека Servo.h. Схема подключения показана на рис. 6.

В начале работы с электронным регулятором скорости требуется его откалибровать. Калибровка заключается в установке минимального и максимального значений ШИМ-сигнала, которые в дальнейшем будут использоваться для управления скоростью двигателей.

Создаем переменную для каждого мотора и задаем коннектор на плате Arduino для управления:

```
Servo left_motor, right_motor;  
right_motor.attach(6);  
left_motor.attach(9);
```

Проводим калибровку. Для этого передаем ШИМ-сигнал максимальной скважности, ожидаем 5 с и передаем ШИМ-сигнал минимальной скважности (исходя из документации на электронный регулятор, это 2300 и 800 мкс соответственно):

```
left_motor.writeMicroseconds(2300);  
right_motor.writeMicroseconds(2300);  
delay(5000);  
left_motor.writeMicroseconds(800);  
right_motor.writeMicroseconds(800);  
delay(5000);
```

Для взаимодействия с сервоприводами необходимо также задать переменную для работы и закрепить эти переменные за определенными контактами на плате:

```
Servo left, right;  
left.attach(3);  
right.attach(5);
```

Разработка протокола для передачи управляющих сигналов. При передаче сигнала с помощью передатчика возможна потеря пакета – полностью или частично. Для компенсации этого

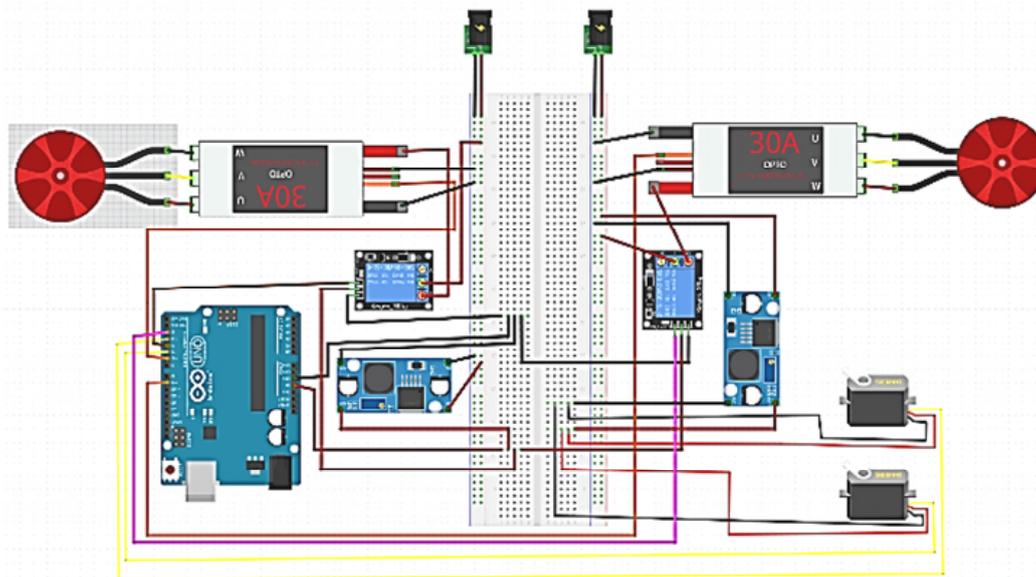


Рис. 6. Схема подключения сервоприводов и двигателей
Fig. 6. Wiring diagram for servo drives and propulsors

недостатка необходимо разработать протокол, задающий начало пакета, его тип и значение.

Для управления лабораторной установкой передаются следующие пакеты:

- мощность левого движителя;
- мощность правого движителя;
- угол поворота левого сервопривода;
- угол поворота правого сервопривода.

С лабораторной установки на пульт управления передаются следующие пакеты:

- отклонение по оси X ;
- отклонение по оси Y ;
- отклонение по оси Z ;

Формат пакета для управления установкой представлен в табл. 2, а пакета передачи данных о положении – в табл. 3.

Табл. 2. Формат пакета с управляющими командами
Tab. 2. Packet format with control commands

Тип устройства	Заголовок 2 байта	Значение 1 байт
Левый движитель	0×B5; 0×53	0–255
Правый движитель	0×5B; 0×35	
Левый сервопривод	0×3F; 0×97	
Правый сервопривод	0×F3; 0×79	

Табл. 3. Формат пакета с данными о положения
Tab. 3. Packet format with position data

Заголовок 2 байт	Отклонение по оси X 2 байт	Отклонение по оси Y 2 байт	Отклонение по оси Z 2 байт
0×5C 0×9E	[–32768, 32767]	[–32768, 32767]	[–32768, 32767]

Разработка программного модуля управления и мониторинга. Для разработки программного модуля выбран язык программирования C++ и фреймворк Qt. Для написания и отладки используется Qt Creator, IDE для разработки на фреймворке Qt.

Для разработки используются: версия C++17; версия Qt фреймворка 5.15.2; версия Qt Creator 4.14.0; компилятор MSVC C++ 16.8.30907.

В начале программы, необходимо задать точку входа, в программу, создать объекта типа CMainPanel и использовать метод show для запуска графического интерфейса программы:

```
int main(int argc, char *argv[]){
    QApplication a(argc, argv);
    CMainPanel w;
    w.show();
    return a.exec();}
```

Ниже приведен алгоритм работы программы для управления и мониторинга параметрами установки:

1. Создание окна в Windows.
2. Добавление графических сцен на окно.
3. Добавление в графическую сцену объекта (изображение необитаемого подводного аппарата).
4. Добавление модулей для управления движителями и рулями глубины на сцену.
5. Обновление положения объекта в сцене в зависимости от получаемых данных с COM-порта.

В результате применения алгоритмов получаем систему, которая графически отображает положение макета необитаемого подводного аппарата в пространстве и имеет возможность удаленно управлять лабораторной установкой.

Заключение. Автономные необитаемые подводные аппараты являются перспективными устройствами для исследования океана. Разработка СУ АНПА для таких аппаратов – важная составляющая проектирования.

В данной работе рассмотрен процесс разработки системы управления АНПА. Подробно описан процесс тестирования и разработки регулятора системы управления аппаратом.

Спроектирована и сконструирована лабораторная установка, с помощью которой демонстрируется работа разработанной системы управления.

Выполнены следующие задачи:

- разработка модуля регулятора и его тестирование;
- проектирование электрической схемы для системы управления;
- разработка лабораторной установки;
- разработка программного модуля для управления установкой;
- анализ работы лабораторной установки.

Список литературы

1. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5, № 2. С. 124–128.
2. Leonard J. J., Bahr A. Autonomous Underwater Vehicle Navigation // Handbook of Ocean Engineering. Springer, 2016. P. 341–358. doi: 10.1007/978-3-319-16649-0_14.
3. Бахарев С. А., Карасев В. В., Карасев А. В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана // Науч. тр. Дальрыбвтуза. 2015. № 35. С. 41–51.
4. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гуренко Б. В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. 2015. № 4. С. 66–75.

5. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата / В. Х. Пшихопов, Ю. В. Чернухин, А. А. Федотов, В. Ф. Гузик, М. Ю. Медведев, Б. В. Гуренко, А. О. Пьявченко, Р. В. Сапрыкин, В. А. Переверзев, А. А. Приемко // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3. С. 87–101.

6. Методы экологических исследований: учебник под ред. Н. Е. Рязановой. М.: ИНФРА-М, 2020. 474 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1063255> (дата обращения 20.02.2022).

7. Интеллектуальные технологии в беспилотных системах: учебник / под ред. В. А. Гвоздевой. М.: ИНФРА-М, 2021. 176 с. DOI 10.12737/1083296.

8. Yang Y., Xiao Y., Li T. A Survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 815–841.

9. Моделирование перемещения подвижного объекта с адаптивным позиционно-траекторным управлением и контуром оценивания неизмеряемых параметров модели / А. Е. Кульченко, М. Ю. Медведев, В. А. Шевченко, В. С. Лазарев // Инженерный вестн. Дона. 2017. № 44. С. 15.

10. Разработка автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро с функцией группового управления / В. Ю. Занин, И. В. Кожемякин, Ю. П. Потехин, И. А. Путинцев, В. А. Рыжов, Н. Н. Семенов, М. Н. Чемоданов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1. С. 55–74.

11. Маевский А. М., Занин В. Ю., Кожемякин И. В. Разработка комбинированной системы управления резидентным/интервенционным АНПА на основании поведенческих методов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1. С. 119–133.

12. Trajectory tracking for autonomous underwater vehicle: An adaptive approach / J. Guerrero, J. Torres, V. Creuze, A. Chemori // Ocean Engineering. 2019. Vol. 172. P. 511–522.

13. Shen C., Shi Y., Buckham B. Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, no. 7. P. 5796–5805.

14. Tabataba'i-Nasab F. S., Keymasi K. A., Moosavian S. A. Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2019. Vol. 41, no. 11. P. 3121–3131.

15. Control system design for autonomous underwater vehicle / V. K. Pshikhopov, M. Y. Medvedev, A. R. Gaiduk, B. V. Gurenko // Latin American Robotics Symp. and Competition. Arequipa, Peru: IEEE, 2013. P. 77–82.

16. Sarhadi P., Noei A. R., Khosravi A. Model reference adaptive PID control with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 83. P. 87–93.

17. Rout R., Subudhi B. Inverse optimal self-tuning PID control design for an autonomous underwater vehicle // Intern. J. of Systems Science. 2017. Vol. 48, no. 2. P. 367–375.

18. Deep reinforcement learning based optimal trajectory tracking control of autonomous underwater vehicle / R. Yu, Z. Shi, C. Huang, T. Li, Q. Ma // 36th Chinese Control Conf. (CCC), Dalian, China: IEEE, 2017. P. 4958–4965.

19. Deep interactive reinforcement learning for path following of autonomous underwater vehicle / Q. Zhang, J. Lin, Q. Sha, B. He, G. Li // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 24258–24268.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Шестопалов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: shestopalov_08@mail.ru

Котов Дмитрий Дмитриевич – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета.

E-mail: s215027@stud.spmi.ru

Кухарова Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета.

E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

References

1. Bardachevskij N. N., Bezsudnov E. YU. Sostoyanie i perspektivy primeneniya neobitaemykh podvodnykh apparatov v oblasti gidrograficheskikh issledovaniy i podvodnoj

navigacii // Interekspo Geo-Sibir'. 2013. T. 5, № 2. S. 124–128. (In Russ.).

2. Leonard J. J., Bahr A. Autonomous Underwater Vehicle Navigation // Handbook of Ocean Engineering. Springer, 2016. P. 341–358. doi: 10.1007/978-3-319-16649-0_14.
3. Baharev S. A., Karasev V. V., Karasev A. V. Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov v processe izucheniya Mirovogo okeana // Nauchn. tr. Dal'rybvтуza. 2015. № 35. S. 41–51. (In Russ.).
4. Pshihopov V. H., Medvedev M. YU., Gurenko B. V. Algoritmy adaptivnykh pozicionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami // Problemy upravleniya. 2015. № 4. S. 66–75. (In Russ.).
5. Pshihopov V. H., Chernuhin YU. V., Fedotov A. A., Guzik V. F., Medvedev M. YU., Gurenko B. V., Pyavchenko A. O., Saprykin R. V., Pereverzev V. A., Priemko A. A. Razrabotka intellektual'noy sistemy upravleniya avtonomnogo podvodnogo apparata // Izv. YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2014. № 3. S. 87–101. (In Russ.).
6. Metody ekologicheskikh issledovaniy: uchebnik pod red. N. E. Ryazanovoj. M.: INFRA-M, 2020. 474 s. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1063255> (accessed: 20.02.2022). (In Russ.).
7. Gvozdeva V. A. Intellektual'nye tekhnologii v bespilotnykh sistemah. M.: INFRA-M, 2021. 176 s. doi: 10.12737/1083296. (In Russ.).
8. Yang Y., Xiao Y., Li T. A Survey of Autonomous Underwater Vehicle Formation: Performance, Formation Control, and Communication Capability // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 815–841.
9. Kul'chenko A. E., Medvedev M. YU., Shevchenko V. A., Lazarev V. S. Modelirovanie peremeshcheniya podvizhnogo ob'ekta s adaptivnym pozicionno-traektornym upravleniem i konturom ocenivaniya neizmeryаемых parametrov modeli // Inzhenernyj vestn. Dona. 2017. № 44. S. 15. (In Russ.).
10. Zanin V. YU., Kozhemyakin I. V., Potekhin YU. P., Putincev I. A., Ryzhov V. A., Semenov N. N., Chemodanov M. N. Razrabotka avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov klassa mikro s funkciej gruppovogo upravleniya // Izv. YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2017. № 1. S. 55–74. (In Russ.).
11. Maevskij A. M., Zanin V. YU., Kozhemyakin I. V. Razrabotka kombinirovannoj sistemy upravleniya rezidentnym/intervencionnym ANPA na osnovanii povedencheskikh metodov // Izv. YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2020. № 1. S. 119–133. (In Russ.).
12. Guerrero J., Torres J., Creuze V., Chemori A. Trajectory Tracking for Autonomous Underwater Vehicle: An Adaptive Approach // Ocean Engineering. 2019. Vol. 172. P. 511–522.
13. Shen C., Shi Y., Buckham B. Trajectory Tracking Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using Lyapunov-Based Model Predictive Control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, no. 7. P. 5796–5805.
14. Tabataba'i-Nasab F. S., Keymasi K. A., Moosavian S. A. Adaptive Nonlinear Control of an Autonomous Underwater Vehicle // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2019. Vol. 41, no. 11. P. 3121–3131.
15. Pshihopov V. K., Medvedev M. Y., Gaiduk A. R., Gurenko B. V. Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle / Latin American Robotics Symp. and Competition // Arequipa, Peru: IEEE, 2013. P. 77–82.
16. Sarhadi P., Noei A. R., Khosravi A. Model Reference Adaptive PID Control with Anti-Windup Compensator for an Autonomous Underwater Vehicle // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 83. P. 87–93.
17. Rout R., Subudhi B. Inverse optimal Self-Tuning PID Control Design for an Autonomous Underwater Vehicle // Intern. J. of Systems Sci. 2017. Vol. 48, no. 2. P. 367–375.
18. Yu R., Shi Z., Huang C., Li T., Ma Q. Deep Reinforcement Learning Based Optimal Trajectory Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicle // 36th Chinese Control Conf. (CCC), Dalian, China: IEEE, 2017. P. 4958–4965.
19. Zhang Q., Lin J., Sha Q., He B., Li G. Deep Interactive Reinforcement Learning for Path Following of Autonomous Underwater Vehicle // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 24258–24268.

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Mikhail Ju. Shestopalov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control, Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: shestopalov_08@mail.ru

Dmitry D. Kotov – post-graduate student of the Department of System Analysis and Management of St. Petersburg Mining University.

E-mail: s215027@stud.spmi.ru

Tatyana V. Kukharova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of System Analysis and Management of St. Petersburg Mining University.

E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

Статья поступила в редакцию 20.01.2022; принята к публикации после рецензирования 06.03.2022; опубликована онлайн 28.04.2022.

Submitted 20.01.2022; accepted 06.03.2022; published online 28.04.2022.
