

УДК 629.55; 681.52
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).1](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).1)

DESIGN OF A WINCH CONTROL SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WITH A RADIO BUOY

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛЕБІДКОЮ АВТОНОМНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ

Anatoliy Ya. Kazariev¹
KazarievAnatoli1950@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8586-5596
Andrii M. Voitasyk²
andrii.voitasyk@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9409-6108

А. Я. Казарєзов¹,
докт. техн. наук, професор
А. М. Войтасик²,
канд. техн. наук, доцент

¹ Mykolaiv Scientific Research Forensic Center, Mykolaiv

² Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

¹ Миколаївський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр, м. Миколаїв

² Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* Design of a winch control system for an autonomous vehicle with a radio buoy, which provides a controlled change in the length of the tow cable, operability in variable hydrodynamic conditions, and is also suitable for maintaining the radio buoy at a given distance from the vehicle during underwater missions. *Method.* The research used complex modeling to develop the design of the electric drive mechanism of the cable tug winch and its combination with the onboard systems of the device, which includes the construction of 3D models of the main components and elements. Analytical calculation methods were used to determine the parameters of the electric drive, assess the loads on the cable tug, and justify the operating modes of the system. Empirical analysis was used to take into account the influence of hydrodynamic factors, the features of operation in near-surface and underwater modes, as well as to form algorithms for controlling the processes of winding and unwinding the cable tug. *Results.* Based on the use of the proposed equipment set, a winch control system for an autonomous underwater vehicle with a radio beacon has been designed, capable of performing autonomous underwater missions lasting 2 hours at operating depths of up to 15 m. The functioning of the electric winding/unwinding mechanism of the towing cable winch with a diameter of 7,6 mm is ensured by the use of a unipolar stepper motor, which, in combination with the control module, reduces the towing cable distance between the autonomous underwater vehicle and the radio beacon when exchanging information signals with a shore or ship control post, which favorably distinguishes them among other tethered underwater systems. *Scientific novelty.* The work first obtained the structure of the control system for the cable towing winch of an autonomous underwater vehicle with a radio buoy, which is based on the use of a stepper motor without gearing and external length sensors. The proposed solution provides discrete positioning of the cable towing with an accuracy determined by the motor step of 1,8 degrees with a torque of 4,5 N m and allows working with a cable towing with a diameter of 7,6 mm under conditions of variable hydrodynamic loads at working depths of up to 15 m. The method of controlling the processes of winding / unwinding the cable towing was further developed by using the step principle of length measurement, which allowed eliminating the use of additional measuring devices when building the underwater winch control system. *Practical importance.* The designed winch control system of an autonomous underwater vehicle is intended for controlling the winding/unwinding processes of a cable tug with a radio buoy, ensuring the functioning of the complex at an operating depth of up to 15 m. The proposed winch control system provides uniform winding/unwinding of a cable with a diameter of 7,6 mm and a length of 25 m with an adjustable speed, which is determined by the parameters of the stepper motor. The system is focused on ensuring reliable operation with limited overall dimensions of the control module 80 × 80 × 25 mm placed in a sealed housing and taking into account the speed modes necessary for coordinated operation with the movement of the underwater vehicle up to 2 m/s. The use of the designed winch control system of an autonomous underwater vehicle with a radio beacon based on the developed control module and the executive unipolar stepper motor allows you to quickly change the length of the towing cable and maintain stable communication between the autonomous underwater vehicle and the radio beacon via the RS-485 interface and using an Ethernet cable. The system is controlled both in automatic mode using microcontroller algorithms and remotely via a wireless communication channel from a shore or ship control post.

Key words: design; control system; autonomous underwater vehicle; radio buoy.

Анотація. *Мета.* Проектування системи керування лебідкою автономного апарата з радіобуєм, що забезпечує керувану зміну довжини кабель-буксиру, працездатність у змінних гідродинамічних умовах, а також придатна для утримання радіобуя на заданій відстані від апарата під час виконання підводних місій. *Методика.* В рамках дослідження застосовано комплексне моделювання для розробки конструкції електроприводного механізму лебідки кабель-буксиру та поєднання її з бортовими системами апарата, що включає побудову 3D моделей основних вузлів і елементів. Використано методи аналітичних розрахунків для визначення параметрів електропривода, оцінки навантажень на кабель-буксир та обґрунтування режимів роботи системи. Емпіричний аналіз застосовано для врахування впливу гідродинамічних факторів, особливостей експлуатації у приповерхневих і підводних режимах, а також для формування алгоритмів керування процесами намотування та розмотування кабель-буксира. *Результати.* На базі використання комплексу запропонованого обладнання спроектовано систему керування лебідкою автономного підводного апарата з радіобуєм здатного виконувати в автономному режимі підводні місії тривалістю 2 год при робочих глибинах занурення до 15 м. Функціонування електроприводного механізму намотування / розмотування лебідки кабель-буксира діаметром 7,6 мм забезпечується застосуванням уніполярного крокового двигуна, який у поєднанні з модулем керування реалізує зменшення дистанції кабель-буксира між автономним підводним апаратом та радіобуєм при обміні інформаційними сигналами з береговим або судновим постом керування, що вигідно вирізняє їх серед інших прив'язних підводних систем. *Наукова новизна.* У роботі вперше отримано структуру системи керування лебідкою кабель-буксиру автономного підводного апарата з радіобуєм, що базується на використанні крокового електропривода без редукторних передач і зовнішніх сенсорів довжини. Запропоноване рішення забезпечує дискретне позиціонування кабель-буксиру з точністю, що визначається кроком двигуна 1,8 градуси з крутним моментом 4,5 Н·м і дозволяє працювати з кабель-буксиром діаметром 7,6 мм в умовах змінних гідродинамічних навантажень на робочих глибинах до 15 м. Набув подальшого розвитку метод керування процесами намотування / розмотування кабель-буксиру за рахунок використання крокового принципу вимірювання довжини, що дозволило виключити застосування додаткових вимірювальних пристроїв при побудові системи керування підводною лебідкою. *Практична значимість.* Спроектвана система керування лебідкою автономного підводного апарата призначена для керування процесами намотування / розмотування кабель-буксира з радіобуєм, забезпечуючи функціонування комплексу на робочій глибині до 15 м. Запропонована система керування лебідкою забезпечує рівномірне намотування / розмотування кабелю діаметром 7,6 мм та довжиною 25 м із регульованою швидкістю, що визначається параметрами крокового електродвигуна. Система орієнтована на забезпечення надійної роботи при обмежених габаритних розмірах модуля керування $80 \times 80 \times 25$ мм розміщеного у герметичному корпусі та з урахуванням швидкісних режимів, необхідних для узгодженої роботи з рухом підводного апарата до 2 м/с. Застосування спроектованої системи керування лебідкою автономного підводного апарата з радіобуєм на базі розробленого модуля керування та виконавчого уніполярного крокового двигуна дозволяє оперативно змінювати довжину кабель-буксира та підтримувати стабільний зв'язок між автономним підводним апаратом і радіобуєм через інтерфейс RS-485 та за умови використання Ethernet кабелю. Керування системою реалізується як у автоматичному режимі за алгоритмами мікроконтролера, так і дистанційно через бездротовий канал зв'язку від берегового чи суднового поста керування.

Ключові слова: проектування; система керування; автономний підводний апарат; радіобуй.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

З метою належного функціонування морської інфраструктури варто залучати до роботи сучасні підводні технічні засоби, які здатні забезпечити контроль стану акваторій, гідротехнічних споруд та підводних комунікацій. Це особливо актуально для портів, прибережних зон та промислових об'єктів, де необхідно оперативно отримувати достовірну інформацію про підводне середовище. Застосування підводних апаратів дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу, зменшити витрати часу та мінімізувати участь людини у небезпечних умовах.

За функціональним призначенням підводні апарати поділяються на пошукові, обстежуючі, робочі, добувні, науково-дослідні, спортивно-туристичні та спеціальні. Кожен із зазначених типів має свої пріоритетні характеристики та особливості проектування.

Зокрема, пошукові апарати орієнтовані на забезпечення високої продуктивності обстеження та точності навігації, обстежуючі – на достовірність збору та передачі інформації про технічний стан підводних об'єктів, а робочі – на виконання складних підводно-технічних операцій із високою точністю позиціонування. Водночас більшість сучасних підводних апаратів проектується як багатоцільові системи, здатні виконувати широкий спектр задач завдяки гнучкості конфігурації та можливості адаптації обладнання.

Для вирішення ж задач комплексного моніторингу підводної обстановки в портових акваторіях доцільним є застосування автономних підводних апаратів (АПА), оснащених радіобуєм (РБ). Така конфігурація дозволяє поєднати автономність підводного руху з можливістю забезпечення стабільного зв'язку з береговим або судновим постом керування. Запропонований

архітектурно-конструктивний тип апарата передбачає використання буксированого РБ, який розташовується у верхній кормовій частині та здатен автоматично відстикуватися, переміщуватись по поверхні моря для передачі інформації, а також повторно пристиковуватись після завершення місії.

Важливим елементом такої системи є кабель-буксир, який з'єднує підводний апарат із РБ. Керування його довжиною здійснюється за допомогою автоматичної лебідки (ЛБ), розташованої на борту апарата. Застосування лебідкового механізму дозволяє реалізувати різні режими роботи – від буксирування буя до його автономного функціонування на поверхні. Водночас наявність кабель-буксира суттєво впливає на динаміку руху апарата, енергетичні витрати та загальну надійність системи, що потребує розробки ефективних алгоритмів керування процесами змотування та розмотування.

Впровадження автоматизованих систем керування ЛБ дозволяє підвищити ефективність експлуатації підводного апарата, знизити енергоспоживання та мінімізувати ризики, пов'язані з заплутуванням кабель-буксира. Автоматизація процесу також дає можливість виключити рутинні операції оператора, забезпечити стабільність натягу троса та адаптацію системи до змінних умов експлуатації. Тому, набуває актуальності задача проєктування системи керування ЛБ АПА з РБ, яка здатна забезпечити керовану зміну довжини кабель-буксира, узгоджену роботу з рухом апарата, стабілізацію натягу та ефективне функціонування системи в умовах реального морського середовища.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наразі актуальним науковим напрямком є проєктування та розробка АПА та їх різноманітних систем забезпечення [1, 2, 3]. А саме, прив'язних підводних систем із РБ (рис. 1), які забезпечують передачу даних, визначення координат та взаємодію апарата з поверхнею в умовах підводного зв'язку [4, 5].

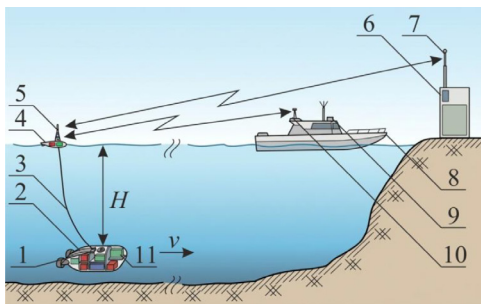


Рис. 1.1. Структура системи АПА-РБ

1) – ЛБ; 2) – криплення РБ; 3) – кабель-буксир (КБ); 4) – РБ; 5) – антена РБ; 6) – береговий пост керування (БПК); 7) – антена БПК; 8) – судно забезпечення; 9) – судовий пост керування (СПК); 10) – антена СПК; 11) – АПА; H – робоча глибина занурення; v – швидкість руху АПА з РБ

На ранніх етапах розвитку таких систем широкого застосування набули прості лебідкові механізми з ручним або напівавтоматичним керуванням, призначені для змотування та розмотування троса, що з'єднує підводний апарат із радіобуєм [6, 7]. У подібних конфігураціях керування здійснювалося на базі елементарних електромеханічних схем, а контроль параметрів роботи обмежувався базовими засобами вимірювання без можливості оперативного реагування на зміну умов експлуатації [8, 9]. Зазначені рішення, попри конструктивну простоту, мають ряд суттєвих недоліків. Зокрема, відсутність адаптивного керування призводить до нестабільності натягу троса, підвищеного зношування механічних елементів та ризику виникнення аварійних ситуацій при змінних гідродинамічних навантаженнях [10, 11, 12]. Крім того, неефективне узгодження роботи ЛБ з рухом апарата обумовлює додаткові енергетичні витрати та зниження загальної автономності системи [13, 14].

У зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки, сенсорних систем та засобів цифрового керування, сучасні дослідження спрямовані на створення інтелектуальних систем керування ЛБ, об'єднаних у загальну архітектуру підводного апарата [15, 16]. Новітні підходи передбачають використання регульованих електроприводів у поєднанні з програмованими контролерами, що дозволяє реалізувати гнучке керування швидкістю намотування троса, моментом привода та параметрами натягу в режимі реального часу [17, 18].

Як правило, останні дослідження в цьому напрямку демонструють зростання уваги до питань надійності та безпеки функціонування таких систем. Застосування датчиків натягу, швидкості та положення, а також алгоритмів діагностики дозволяє здійснювати постійний моніторинг стану ЛБ та своєчасно виявляти відхилення від заданих режимів [19, 20]. В умовах морського середовища, де на систему впливають хвильові процеси, течії та змінні навантаження, це є критично важливим для забезпечення стабільної роботи апарата.

Окремі дослідження акцентують увагу на енергетичній ефективності систем керування ЛБ, зокрема на оптимізації режимів роботи електропривода та мінімізації втрат енергії при змотуванні та розмотуванні троса [21, 22]. Врахування взаємодії між рушійним комплексом апарата та лебідковим механізмом дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити тривалість автономної роботи, що позитивно впливає на ефективність сучасних підводних роботизованих систем.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У галузі виконання підводних інспекційних та моніторингових робіт в Україні спостерігається обмежений рівень автоматизації та технічного

оснащення, що ускладнює ефективний контроль стану гідротехнічних споруд, підводної інфраструктури та акваторій загалом. Для вирішення таких задач традиційно застосовуються водолази або прив'язні підводні апарати, які забезпечують візуальний огляд та виконання допоміжних операцій.

Використання водолазів пов'язане зі значними фінансовими витратами, залежністю від погодних умов та підвищеним ризиком для здоров'я людини, особливо в умовах обмеженої видимості, течій або наявності сторонніх об'єктів. У свою чергу, застосування прив'язних підводних апаратів дозволяє виключити присутність людини під водою та спростити виконання інспекційних робіт, однак такі системи здебільшого функціонують у ручному режимі керування. Наявність кабель-тросу створює додаткові труднощі, пов'язані з можливістю його заплутування в умовах складного рельєфу дна або насиченості акваторій інженерними конструкціями, що значно обмежує ефективність використання таких засобів.

Для вирішення задач побудови карт фарватеру та обстеження дна застосовуються надводні судна, оснащені ехолотами або гідролокаторами бокового огляду. Проте такі роботи також виконуються переважно в ручному режимі, що знижує продуктивність і потребує значних часових витрат. Засоби виявлення підводних об'єктів, такі як гідроакустичні станції або магнітометричні системи, мають обмеження щодо дальності дії, точності та типів об'єктів, які можуть бути виявлені, що знижує їх ефективність у складних умовах мілководдя та портових акваторій.

З метою підвищення ефективності виконання підводних місій доцільним є використання АПА із РБ, що забезпечують поєднання автономності руху з можливістю періодичного або безперервного зв'язку з поверхнею. Перспективним технічним рішенням є застосування архітектури апарата з динамічно змінюваною довжиною кабель-буксира, який з'єднує підводний апарат із РБ. Така конфігурація передбачає розміщення РБ як буксированого елемента у кормовій частині апарата з можливістю його автоматичного відстикування, руху по поверхні для забезпечення зв'язку з береговим або судновим постом керування, а також подальшого автоматичного пристикування після завершення місії.

Для впровадження подібної системи необхідне проектування автоматизованої ЛБ, що забезпечує керовану зміну довжини кабель-буксира залежно від режимів роботи апарата. Водночас питання синтезу ефективної системи керування ЛБ, здатної враховувати змінні гідродинамічні навантаження, рух апарата, вплив хвильових процесів та необхідність стабілізації натягу троса, залишається недостатньо дослідженим.

У роботі запропоновано реалізацію системи керування ЛБ АПА з РБ, яка входить до складу

загальної системи керування апарата та включає електроприводний механізм намотування кабель-буксира, сенсорну підсистему контролю натягу та швидкості, а також алгоритмічне забезпечення для автоматизованого регулювання режимів змотування і розмотування. Запропоновані технічні рішення спрямовані на підвищення надійності, енергоефективності та безпечності функціонування підводного апарата в умовах реальної експлуатації.

Метою дослідження є проектування системи керування лебідкою автономного апарата з радіобуєм, що забезпечує керовану зміну довжини кабель-буксиру, працездатність у змінних гідродинамічних умовах, а також придатна для утримання радіобуя на заданій відстані від апарата під час виконання підводних місій.

ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості *об'єкта дослідження* обрано технологічні процеси функціонування системи керування ЛБ кабель-буксиру АПА з РБ, до складу якої входять: електроприводний механізм ЛБ, сенсори контролю довжини та натягу кабель-буксиру, а також засоби комунікації з бортовими системами апарата і РБ.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми керування, спрямовані на забезпечення надійності, точності та безпеки роботи лебідкового механізму в умовах змінних навантажень і зовнішніх збурень, розробка алгоритмічного забезпечення автоматизованого регулювання довжини кабель-буксиру, узгодження роботи ЛБ з навігаційною та енергетичною підсистемами апарата, а також створення цифрових і 3D моделей конструкції системи для подальшого аналізу та оптимізації її характеристик.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

При проектуванні системи керування ЛБ АПА з РБ особливу увагу приділено вибору елементної бази, що безпосередньо визначає точність та

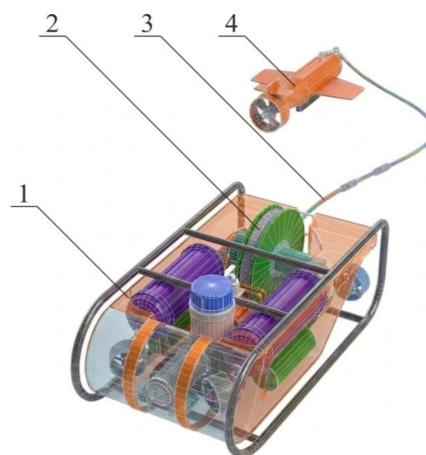


Рис. 1. 3D модель АПА з РБ проекту «PSK»
1) – АПА; 2) – КЛ; 3) – КБ; 4) – РБ

надійність функціонування всієї системи. Однією з конструктивних особливостей АПА з РБ є наявність на апараті ЛБ КБ (рис. 1). Особливості розташування такої ЛБ обумовлюють необхідність керування нею в автоматичному режимі від бортового комп'ютера АПА.

Як КБ використано спеціалізований підводний зразок серії Fathom, який характеризується достатньою механічною міцністю, стійкістю до впливу морського середовища та оптимальним діаметром, що забезпечує прийнятні умови намотування на барабан лебідки без значних втрат простору та ризику пошкодження.

Основні технічні характеристики АПА з РБ проєкту «PSK» представлені у вигляді табл. 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики АПА з РБ проєкту «PSK»

№ з/п	Найменування параметра	Значення
1	Швидкість руху, вузлів	2
2	Максимальна робоча глибина, м	15
3	Гідрометеоумови: – температура води / повітря, °C – вітер, м/с – хвилювання водної поверхні, балів	0–+30/–20–+40 до 5 ≤ 2
4	Енергетичне живлення	автономне
5	Тривалість автономної роботи, год	2
6	Габаритні розміри РБ, м	0,3 × 0,15
7	Габаритні розміри апарата, м	0,85 × 0,42 × 0,35
8	Маса АПА з РБ, кг	47

Для реалізації електроприводного механізму ЛБ задіяно уніполярний кроковий електродвигун 86VYG250 (ЕД, див. рис. 2), що забезпечує високий

крутний момент при відносно компактних габаритах. Використання крокового двигуна дозволило принципово змінити підхід до реалізації системи керування: відмова від редуктора спрощує конструкцію та підвищує її надійність, а також зменшує механічні втрати та люфти у передавальному механізмі. Крім того, відсутність необхідності у встановленні додаткових датчиків довжини витравленого кабелю є важливою перевагою, оскільки контроль довжини реалізується шляхом підрахунку кількості виконаних кроків двигуна.

Такий спосіб вимірювання положення КБ забезпечує достатню точність і повторюваність процесів намотування та розмотування, що доцільно при роботі в умовах обмеженої видимості та складного рельєфу дна. Водночас застосування двигуна з високим моментом дозволяє гарантувати стабільну роботу ЛБ навіть при змінних навантаженнях, викликаних дією гідродинамічних сил або рухом апарата.

Для забезпечення інтенсивного зменшення струму в обмотках двигуна при використанні мостової схеми керування представленої силовим каскадом (СК, див. рис. 2) необхідно одночасно закрити всі транзистори. У такому режимі струм продовжує протікати через зворотні діоди, замикаючись на джерело живлення. Якщо ж один із транзисторів залишити відкритим, струм циркулює по локальному контуру через транзистор і діод, що призводить до більш повільного спадання струму.

Під час керування уніполярними двигунами ефективність гасіння перенапруг, викликаних електрорушійною силою (ЕРС) самоіндукції, можна підвищити шляхом використання не лише діодів, а й варисторів або комбінованих схем із застосуванням стабілітронів. Такі рішення дозволяють обмежувати імпульсні викиди на вищому рівні напруги, який залишається

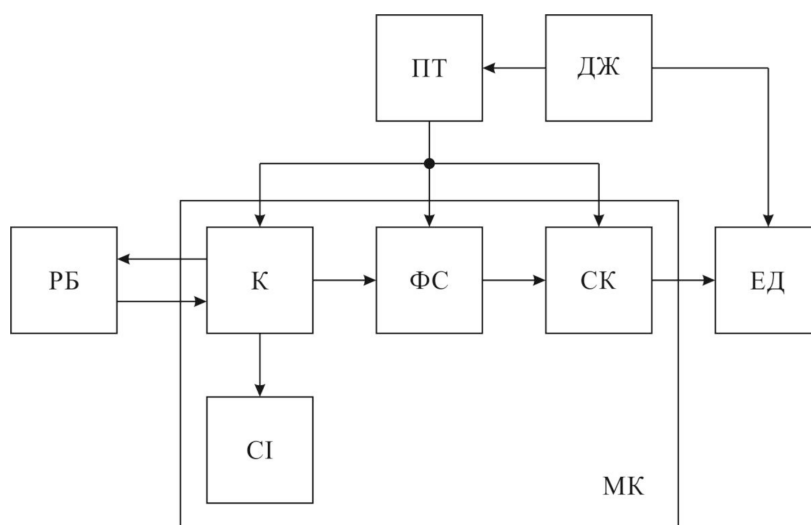


Рис. 2. Структурна схема системи керування ЛБ АПА з РБ

ПТ – перетворювач напруги; ДЖ – джерело живлення; К – мікроконтролер; ФС – формувач сигналів; СК – силовий каскад; ІС – світлові індикатори

безпечним для силових елементів, водночас прискорюючи спад струму.

Струм, необхідний для утримання ротора у фіксованому положенні, зазвичай може бути меншим за номінальний робочий струм, оскільки в нерухомому стані двигуну не потрібно розвивати максимальний крутний момент. Водночас існують режими роботи, де навіть у стані спокою необхідно забезпечити повний момент утримання. Для крокових двигунів це цілком реалізовано, що дає змогу відмовитися від використання додаткових механічних гальмівних пристроїв.

Сучасні системи керування двигунами дозволяють гнучко регулювати струм у фазах, тому встановлення потрібного рівня струму утримання не становить складності і, як правило, визначається програмними алгоритмами мікроконтролера (К, див. рис. 2).

Режим мікрокрокування забезпечує більш плавну зміну магнітного поля статора порівняно з повнокроковим або півкроковим режимами, що призводить до значного зниження вібрацій і шуму під час роботи

двигуна. Крім того, зменшення кроку переміщення підвищує точність позиціонування. Існують різні варіанти мікрокрокового керування, де крок може становити від частини повного кроку до дуже малих значень, наприклад 1/32 і менше.

Кроковий двигун належить до класу синхронних електричних машин, у яких положення ротора визначається орієнтацією магнітного поля статора. У стані рівноваги вісь ротора співпадає з напрямком цього поля. При зміні положення магнітного поля ротор відповідно зміщується, намагаючись зайняти нове стабільне положення.

Використання мікрокрокового керування забезпечує значно більш рівномірне та плавне обертання ротора, особливо на малих частотах обертання, в порівнянні з повнокроковим та півкроковим способами керування. Однак у діапазоні частот, що перевищують приблизно у 2–3 рази власну резонансну частоту системи «ротор – навантаження», переваги мікрокрокового режиму стають менш помітними порівняно з повнокроковим або півкроковим

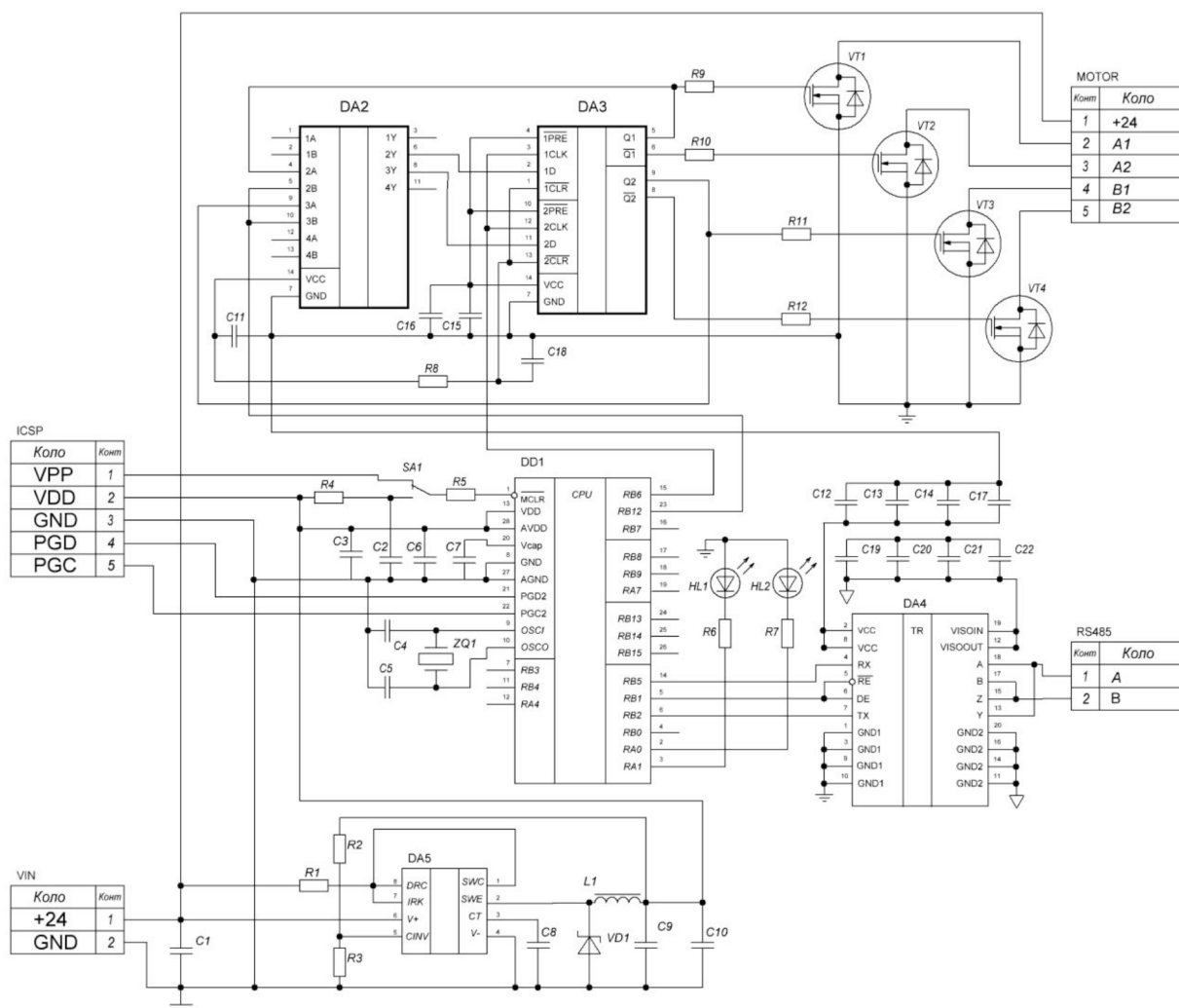


Рис. 3. Електрична принципова схема системи керування ЛБ АПА з РБ

керуванням. Це можна пояснити тим, що механічна інерція ротора та приєднаного навантаження виконує роль природного низькочастотного фільтра, згладжуючи дискретність переміщень.

Таким чином, система з кроковим двигуном за своєю динамікою може розглядатися як об'єкт із фільтруючими властивостями, де високочастотні складові керуючих впливів частково придушуються механічною інерцією. На практиці мікрокроковий режим часто застосовується переважно на етапах розгону та гальмування, тоді як основна ділянка руху може виконуватися у повнокроковому режимі.

Спроектована електрична принципова схема (рис. 3) призначена для реалізації керування електроприводом ЛБ у складі АПА. Вона об'єднує функції перетворення енергії, цифрового керування, формування сигналів для виконавчого механізму та організації стійкого каналу зв'язку з зовнішніми пристроями. Архітектура побудована таким чином, щоб забезпечити узгоджену роботу всіх вузлів у складних умовах експлуатації, характерних для підводних систем.

Живлення всієї системи здійснюється від джерела постійної напруги 24 В (ДЖ, див. рис. 2). Для формування стабільної напруги номіналом 5 В, необхідної для живлення інформаційної частини, використовується імпульсний понижуючий перетворювач (ПТ, див. рис. 2) на базі мікросхеми MC34063. Принцип його роботи базується на накопиченні енергії в індуктивності під час відкритого стану внутрішнього транзистора і передачі цієї енергії в навантаження після його закриття. Стабілізація вихідної напруги досягається за рахунок порівняння внутрішньої опорної напруги з напругою зворотного зв'язку, сформованою резистивним дільником. При досягненні рівності цих напруг компаратор змінює стан керуючого транзистора, підтримуючи постійний рівень вихідної напруги. Вхідний і вихідний конденсатори виконують функцію згладжування пульсацій, а додаткові ємності забезпечують стабільність генерації та зменшення високочастотних завад.

В якості К задіяно модель PIC24FV08KM202, який виконує функції обробки команд, формування керуючих сигналів та організації обміну даними. Його робота синхронізується кварцовим резонатором із частотою 8 МГц, що забезпечує стабільність часових параметрів. Для гарантованої роботи К застосовано локальні фільтруючі конденсатори, які зменшують вплив перешкод у лініях живлення. Схема скидання реалізована таким чином, щоб забезпечити як автоматичний запуск при подачі живлення, так і можливість ручного перезапуску, що є важливим для налагодження та експлуатації.

Обмін даними із зовнішніми пристроями організовано через інтерфейс RS-485, реалізований на мікросхемі ADM2587E. Використання цього компонента дозволяє поєднати перетворення сигналів із гальванічною

розв'язкою, що суттєво підвищує завадостійкість та електробезпеку системи. Дані передаються від К через модуль USART і перетворюються у диференціальний сигнал, який передається по лініях зв'язку. Застосування відповідних фільтруючих конденсаторів забезпечує стабільність роботи внутрішніх вузлів мікросхеми та зменшує вплив електромагнітних завад.

Формування сигналів керування виконавчим механізмом здійснюється за допомогою логічних мікросхем 74HC86 та 74HC74. Перша з них реалізує логічні операції виключного АБО, що дозволяє формувати необхідні комбінації сигналів, тоді як друга забезпечує їх синхронізацію та стабілізацію у часі. У поєднанні ці елементи створюють узгоджену систему формування керуючих імпульсів, що надходять до силового каскаду. Додаткові RC-ланцюги використовуються для фільтрації перешкод і формування часових затримок, що позитивно впливає на стійкість роботи системи.

Безпосереднє керування двигуном ЛБ реалізоване за допомогою мостової схеми на MOSFET-транзисторах IRF630. Така конфігурація дозволяє змінювати напрямок струму через навантаження, що, у свою чергу, забезпечує можливість реверсивного обертання двигуна. Керуючі сигнали з логічного блоку подаються на затвори транзисторів через резистори, які обмежують струм керування і забезпечують коректний режим перемикання. Завдяки цьому формується повний контроль над режимами роботи ЛБ, включаючи запуск, зупинку та зміну напрямку руху.

Для контролю стану системи передбачена світлодіодна індикація (СІ, див. рис. 2). Один світлодіод сигналізує про нормальну роботу К, тоді як інший використовується для індикації помилок у процесі обміну даними. Обмеження струму через світлодіоди здійснюється за допомогою резисторів, що забезпечує їх надійну та довготривалу роботу.

У цілому робота системи відбувається наступним чином. Після подачі живлення імпульсний перетворювач формує стабільну напругу для цифрових вузлів. Після ініціалізації К розпочинається виконання програми, забезпечуючи прийом команд через інтерфейс зв'язку. Отримані дані обробляються і перетворюються у керуючі сигнали (ФС, див. рис. 2), які проходять через логічний блок і надходять до силового каскаду (СК, див. рис. 2). Транзисторний міст формує відповідний режим живлення двигуна, що приводить у рух ЛБ. Стан системи при цьому відображається за допомогою світлодіодної індикації.

В якості головної частини системи керування ЛБ АПА з РБ виступає плата керування округлої форми для розміщення в міцному корпусі. Зовнішній вигляд спроектованої та виготовленої друкованої плати представлено на рис. 4.

Основні технічні характеристики розробки представлені у табл. 1.

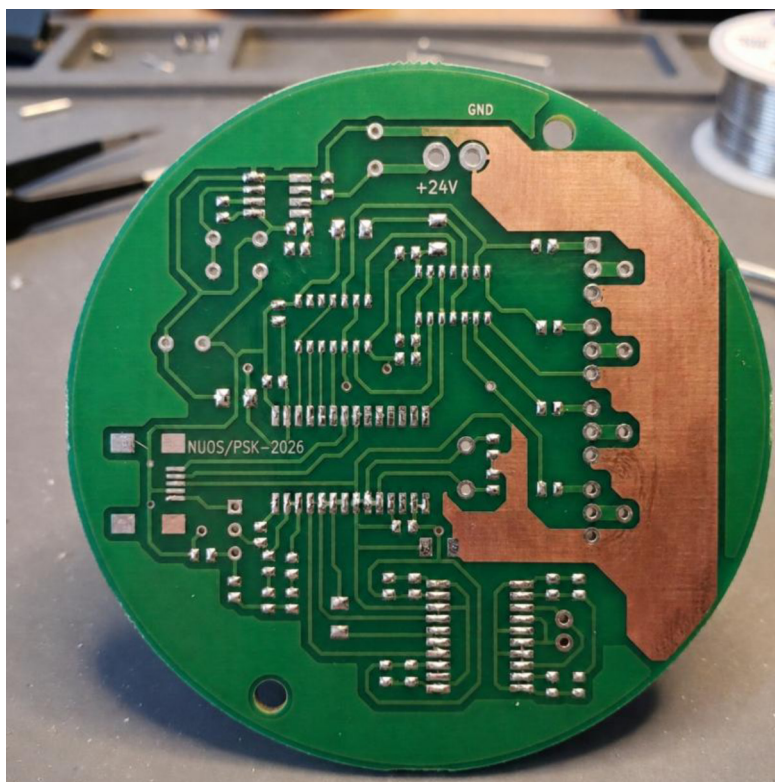


Рис. 4. Реалізована друкована плата модуля керування

Таблиця 1. Основні технічні характеристики розробки

№ з/п	Найменування параметра	Значення
1	Напруга постійного живлення, В	24
2	Номінальний струм модуля керування, А	0,3
3	Номінальний струм ЕД, А	2
4	Робоча глибина занурення АПА, м	15
5	Тип КБ	Ethernet, серії Fathom
6	Діаметр КБ, м	0,0076
7	Довжина КБ, м	25
8	Мінімальний / максимальний діаметр ЛБ, м	0,2/0,25
9	Електродвигун	кроковий, 86BYG250
10	Обертний момент електродвигуна, Н·м	5
11	Кут кроку електродвигуна, град.	1,8
12	Кількість фаз електродвигуна, од.	2
13	Мікроконтролер	PIC24FV08KM202
14	Широтно-імпульсний регулятор	MC34063
15	Перетворювач USART / RS-485	ADM2587E
16	Логічні мікросхеми	74HC86, 74HC74D
17	MOSFET-транзистор	IRF630 – 4 шт.
18	Оптичне реле	PVG612SPBF
19	Світлові індикатори	LED – 2 шт.
20	Інтерфейс керування	RS485
21	Габаритні розміри модуля керування, мм	80 × 80 × 25
22	Маса виробу у зібраному стані, кг	3,46

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Слід враховувати, що для реалізації високих швидкостей обертання виконавчого крокового ЕД у режимі мікрокрокування необхідна значна частота формування керуючих імпульсів, яка не завжди доступна для мікроконтролерних систем через обмеження обчислювальних ресурсів і таймерів. З метою уникнення перехідних процесів та втрати кроків перемикання між режимами роботи доцільно виконувати у моменти, коли ротор знаходиться в стабільному положенні рівноваги, відповідному збудженню однієї фази.

У ряді прецизійних систем мікрокроковий режим дозволяє відмовитися від використання механічних редукторів, оскільки забезпечує мале дискретне переміщення та високу роздільну здатність позиціонування. У деяких випадках його також застосовують для підвищення точності позиціонування понад паспортні характеристики двигуна. Це досягається шляхом індивідуальної корекції співвідношення струмів у фазах та компенсації відхилень положення ротора в окремих точках рівноваги, отриманих експериментально для конкретного двигуна.

На практиці перехід ротора між кроками супроводжується не миттєвою зупинкою, а затухаючими коливаннями навколо нового положення рівноваги. Час встановлення залежить від параметрів навантаження, механічної системи та характеристик драйвера. У багатьох застосуваннях такі коливальні процеси є небажаними, оскільки знижують точність і стабільність позиціонування. Одним із ефективних способів їх зменшення або усунення є використання мікрокрокового керування, яке забезпечує більш плавний перехід між дискретними положеннями ротора.

Таким чином, на базі використання запропонованого обладнання спроектовано систему керування ЛБ АПА з РБ здатного виконувати в автономному режимі підводні місії тривалістю 2 год при робочих глибинах занурення до 15 м. Функціонування електроприводного механізму намотування / розмотування ЛБ КБ діаметром 7,6 мм забезпечується

застосуванням уніполярного крокового двигуна, який у поєднанні з МК реалізує зменшення дистанції КБ між АПА та РБ при обміні інформаційними сигналами з береговим або судновим постом керування, що вигідно вирізняє їх серед інших прив'язних підводних систем.

ВИСНОВКИ

1. Спроектвана система керування лебідкою автономного підводного апарата призначена для керування процесами намотування / розмотування кабель-буксира з радіобуєм, забезпечуючи функціонування комплексу на робочій глибині до 15 м. Запропонована система керування лебідкою забезпечує рівномірне намотування / розмотування кабелю діаметром 7,6 мм та довжиною 25 м із регульованою швидкістю, що визначається параметрами крокового електродвигуна. Система орієнтована на забезпечення надійної роботи при обмежених габаритних розмірах модуля керування 80 × 80 × 25 мм розміщеного у герметичному корпусі та з урахуванням швидкісних режимів, необхідних для узгодженої роботи з рухом підводного апарата до 2 м/с.

2. Застосування спроектованої системи керування лебідкою автономного підводного апарата з радіобуєм на базі розробленого модуля керування та виконавчого уніполярного крокового двигуна дозволяє оперативно змінювати довжину кабель-буксира та підтримувати стабільний зв'язок між автономним підводним апаратом і радіобуєм через інтерфейс RS-485 та за умови використання Ethernet кабелю. Керування системою реалізується як у автоматичному режимі за алгоритмами мікроконтролера, так і дистанційно через бездротовий канал зв'язку від берегового чи суднового поста керування.

Автор вважає за доцільне спрямувати подальші дослідження на постановку натурного експерименту, пов'язаного із проектуванням системи автоматичного керування рухом АПА з РБ, яка вирішуватиме питання просторового руху апарата з урахуванням зміни та підтримання бажаних параметрів відстані КБ між АПА та РБ для підвищення загальної ефективності автоматичного руху морського рухомого об'єкта.

REFERENCES

- [1] Yuya N., Junichi K., Yuzuru I., Kenkichi T., Harumi S., Kangsoo K., Taku S., Tamaki U. (2015) Development of an autonomous buoy system for AUV. *OCEANS 2015 – Genova*. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271614
- [2] Austin T. C., Stokey R., Sharp K. M. (2000) PARADIGM: a buoy-based system for AUV navigation and tracking. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881376
- [3] Agarwal A., Singh K. (2023) Energy-efficient UOWC-RF systems with SLIPT. *Transactions on emerging telecommunications technologies*, 35(1), 40-49. DOI: 10.1002/ett.4889
- [4] Zhang T., Hu H.-Q., Wang Z.-Q., Liu Q. (2016) Underwater positioning system based on INS and acoustic buoy system for underwater vehicle. *Tongfang knowledge network*. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.06.008
- [5] Jakuba M. V., Kaiser C. L., German Ch. R., Soule A., Kelley S. (2018) Toward an autonomous communications relay for deep-water scientific AUV operations. *2018 IEEE/OES Autonomous underwater vehicle workshop (AUV)*. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729769
- [6] Zhonghan H., Wei L., Qinyu Zh., Qiang Ch. (2025) Cross-medium transmission with mobile AUV relay path planning: enhancing underwater acoustic and radio mixed-link performance. *IEEE Internet of things journal*, 99 (1). DOI: 10.1109/IJOT.2025.3606958

- [7] Takumi U., Kangsoo K., Akihiro O., Shogo I., Jun U., Toshifumi F. (2025) Development of cooperative formation control system for multiple cruising AUVs with acoustic positioning between AUVs. *ASME 2025 44th International conference on ocean, offshore and arctic engineering*. DOI: 10.1115/OMAE2025-156538
- [8] Chuang H., Mengran G., Tao Sh., Chengli G. (2026) Research on AUV underwater localization method based on an n-shaped array. *Sensors*, 26(6), 1845. DOI: 10.3390/s26061845
- [9] He Q., Cheng Z., Wang Z., He Z. (2022) Mixed far-field and near-field source separation and localization based on FOC matrix differencing. *Digit. signal process*, 131, 103753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103753>
- [10] Haolin L., Shiliang Zh., Xiaohui Zh., Shangbin J., Xuehui M., Ting Sh., Wenqi B., Youmin Zh. (2025) Adaptive Lyapunov-constrained MPC for fault-tolerant AUV trajectory tracking. DOI: 10.48550/arXiv.2509.17237
- [11] Ewans K., Collins C. (2025) A comparison of wave directional spreading measurements made with a spotter buoy and a directional waverider buoy in parallel. *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, 148(2), 1–13. DOI: 10.1115/1.4070167
- [12] Anderson J., Stirling B. S., Rex P. T., Spurgeon E., Ginnis A. M., Merson Z. S., Gadberry D., Lowe Ch. G. (2026). Real-time acoustic telemetry buoys as tools for nearshore monitoring and management. *Journal of marine science and engineering*, 14(2), 128. DOI: 10.3390/jmse14020128
- [13] Horimoto H., Tejima S., Ohkumat K., Maki T. (2021) Development of autonomous acoustic positioning buoy toward low-cost AUV operation. *The proceedings of JSME annual conference on robotics and mechatronic*, 1A1-B16. DOI: 10.1299/jsmermd.2021.1A1-B16
- [14] Edmans B. D., Pham D. C., Zhang Z. O., Guo T. F., Sridhar N., Stewart G. (2019) An effective multiscale methodology for analysis of marine flexible risers. *Journal of marine science and engineering*, 7, 340. DOI: 10.3390/jmse7100340
- [15] Kun-Woo K., Jae-Wook L., Wan-Suk Y. (2012) The motion and deformation rate of a flexible hose connected to a mother ship. *Journal of mechanical science and technology*, 26(3), 703–710. DOI: 10.1007/s12206-011-1202-5
- [16] Li D., Du L. (2021) AUV trajectory tracking models and control strategies: A Review. *Journal of marine science and engineering*, 9, 1020. DOI: 10.3390/jmse9091020
- [17] Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J., Zhang S. (2018) An architecture for using autonomous underwater vehicles in wireless sensor networks for underwater pipeline monitoring. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15, 1329–1340. DOI: 10.1109/TII.2018.2848290
- [18] Degorre L., Fossen T. I., Chocron O., Delaleau E. (2024) A model-based kinematic guidance method for control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Control engineering practice*, 152, 106068. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.106068
- [19] Su R., Zhang D., Li C., Gong Z., Venkatesan R., Jiang F. (2019) Localization and data collection in AUV-aided underwater sensor networks: Challenges and opportunities. *IEEE Network*, 33, 86–93. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800425
- [20] Hollinger G. A. (2012) Underwater data collection using robotic sensor networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 30(5), 899–911. DOI: 10.1109/JSAC.2012.120606
- [21] Cerrada C., Chaos D., Moreno-Salinas D., Pascoal A., Aranda J. (2024) An energy efficient fault-tolerant controller for homing of underactuated AUVs. *Control engineering practice*, 146, 105883. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105883
- [22] Jian Q.W., Yu D., Jing W. (2015) Energy efficient trajectory tracking controller for underwater applications: A robust approach. *Aquatic procedia*, 4, 571–578. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.074

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yuya N., Junichi K., Yuzuru I., Kenkichi T., Harumi S., Kangsoo K., Taku S., Tamaki U. (2015) Development of an autonomous buoy system for AUV. *OCEANS 2015 – Genova*. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271614
- [2] Austin T. C., Stokey R., Sharp K. M. (2000) PARADIGM: a buoy-based system for AUV navigation and tracking. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881376
- [3] Agarwal A., Singh K. (2023) Energy-efficient UOWC-RF systems with SLIPT. *Transactions on emerging telecommunications technologies*, 35(1), 40–49. DOI: 10.1002/ett.4889
- [4] Zhang T., Hu H.-Q., Wang Z.-Q., Liu Q. (2016) Underwater positioning system based on INS and acoustic buoy system for underwater vehicle. *Tongfang knowledge network*. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.06.008
- [5] Jakuba M. V., Kaiser C. L., German Ch. R., Soule A., Kelley S. (2018) Toward an autonomous communications relay for deep-water scientific AUV operations. *2018 IEEE/OES Autonomous underwater vehicle workshop (AUV)*. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729769
- [6] Zhonghan H., Wei L., Qinyu Zh., Qiang Ch. (2025) Cross-medium transmission with mobile AUV relay path planning: enhancing underwater acoustic and radio mixed-link performance. *IEEE Internet of things journal*, 99 (1). DOI: 10.1109/JIOT.2025.3606958
- [7] Takumi U., Kangsoo K., Akihiro O., Shogo I., Jun U., Toshifumi F. (2025) Development of cooperative formation control system for multiple cruising AUVs with acoustic positioning between AUVs. *ASME 2025 44th International conference on ocean, offshore and arctic engineering*. DOI: 10.1115/OMAE2025-156538
- [8] Chuang H., Mengran G., Tao Sh., Chengli G. (2026) Research on AUV underwater localization method based on an n-shaped array. *Sensors*, 26(6), 1845. DOI: 10.3390/s26061845
- [9] He Q., Cheng Z., Wang Z., He Z. (2022) Mixed far-field and near-field source separation and localization based on FOC matrix differencing. *Digit. signal process*, 131, 103753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103753>

- [10] Haolin L., Shiliang Zh., Xiaohui Zh., Shangbin J., Xuehui M., Ting Sh., Wenqi B., Youmin Zh. (2025) Adaptive Lyapunov-constrained MPC for fault-tolerant AUV trajectory tracking. DOI: 10.48550/arXiv.2509.17237
- [11] Ewans K., Collins C. (2025) A comparison of wave directional spreading measurements made with a spotter buoy and a directional waverider buoy in parallel. *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, 148(2), 1–13. DOI: 10.1115/1.4070167
- [12] Anderson J., Stirling B.S., Rex P.T., Spurgeon E., Ginnis A.M., Merson Z.S., Gadberry D., Lowe Ch.G. (2026). Real-time acoustic telemetry buoys as tools for nearshore monitoring and management. *Journal of marine science and engineering*, 14(2), 128. DOI: 10.3390/jmse14020128
- [13] Horimoto H., Tejima S., Ohkumat K., Maki T. (2021) Development of autonomous acoustic positioning buoy toward low-cost AUV operation. *The proceedings of JSME annual conference on robotics and mechatronic*, 1A1-B16. DOI: 10.1299/jsmrmd.2021.1A1-B16
- [14] Edmans B. D., Pham D. C., Zhang Z. O., Guo T. F., Sridhar N., Stewart G. (2019) An effective multiscale methodology for analysis of marine flexible risers. *Journal of marine science and engineering*, 7, 340. DOI: 10.3390/jmse7100340
- [15] Kun-Woo K., Jae-Wook L., Wan-Suk Y. (2012) The motion and deformation rate of a flexible hose connected to a mother ship. *Journal of mechanical science and technology*, 26(3), 703–710. DOI: 10.1007/s12206-011-1202-5
- [16] Li D., Du L. (2021) AUV trajectory tracking models and control strategies: A Review. *Journal of marine science and engineering*, 9, 1020. DOI: 10.3390/jmse9091020
- [17] Jawhar I., Mohamed N., Al-Jaroodi J., Zhang S. (2018) An architecture for using autonomous underwater vehicles in wireless sensor networks for underwater pipeline monitoring. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15, 1329–1340. DOI: 10.1109/TII.2018.2848290
- [18] Degorre L., Fossen T.I., Chocron O., Delaleau E. (2024) A model-based kinematic guidance method for control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Control engineering practice*, 152, 106068. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.106068
- [19] Su R., Zhang D., Li C., Gong Z., Venkatesan R., Jiang F. (2019) Localization and data collection in AUV-aided underwater sensor networks: Challenges and opportunities. *IEEE Network*, 33, 86–93. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800425
- [20] Hollinger G. A. (2012) Underwater data collection using robotic sensor networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 30(5), 899–911. DOI: 10.1109/JSAC.2012.120606
- [21] Cerrada C., Chaos D., Moreno-Salinas D., Pascoal A., Aranda J. (2024) An energy efficient fault-tolerant controller for homing of underactuated AUVs. *Control engineering practice*, 146, 105883. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.105883
- [22] Jian Q. W., Yu D., Jing W. (2015) Energy efficient trajectory tracking controller for underwater applications: A robust approach. *Aquatic procedia*, 4, 571–578. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.074

© Казарезов А. Я., Войтасик А. М.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)