

УДК 681.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).26](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).26)**DIRECTIONS FOR IMPROVING AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
OF MARINE ROBOTIC VEHICLES UNDER UNCERTAIN EXTERNAL
DISTURBANCES****НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ЗАСОБАМИ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ
ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ****Hanna S. Hrudinina**

hanna.hrudinina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8298-9251

Г. С. Грудініна,

канд. техн. наук, доцент

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала
Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. The purpose of this paper is to identify the main directions for improving automatic motion control systems of marine mobile objects, such as autonomous unmanned surface vessels and underwater vehicles. The key challenge addressed is the enhancement of control performance of these objects under the influence of external disturbances.

Method. An analytical review of existing conventional, adaptive, and robust control systems is conducted. The capabilities of modern software tools for studying the dynamics of marine mobile objects under wind-wave disturbances are analyzed. Simulation-based modeling of vessel motion under external disturbances is performed using a state-of-the-art software package in order to test the autopilot system.

Results. The specific features of small-scale marine mobile objects considered in this study are identified. An analytical overview of modern control and stabilization methods suitable for the development of automatic motion control systems for unmanned surface vessels and underwater vehicles is presented. A hybrid architecture of a vessel course stabilization system is proposed. An example of rapid controller parameter tuning using the proposed software environment is provided.

Scientific novelty. For the first time, the theoretical foundations for the development of adaptive-intelligent automatic control systems capable of self-tuning, reconfiguration, and real-time action optimization based on the analysis of the environment and object states are formulated. The application of computer simulation tools for the simultaneous assessment of control quality and vessel behavior under marine operating conditions is proposed.

Practical significance. The capabilities for improving the performance of automatic motion control systems of marine mobile objects are extended through preliminary controller testing using modern software tools. An example of integrating two advanced software packages to improve the tuning of a vessel course stabilization controller while modeling its motion under external disturbances is demonstrated.

Key words: adaptive control systems; intelligent control; marine mobile objects; small-scale unmanned surface vessel.

Анотація. Мета. Метою даної роботи є визначення основних напрямків удосконалення систем автоматичного керування рухом морських рухомих об'єктів, таких як автономні безпілотні судна та підводні апарати. Головною проблематикою завдання є питання удосконалення якості керування даними об'єктами в умовах впливу зовнішнього збурення.

Методика. Аналітичний аналіз існуючих традиційних, адаптивних та робастних систем керування. Огляд можливостей сучасного програмного забезпечення для дослідження динаміки морських рухомих об'єктів в умовах вітро-хвильового впливу. Імітаційне моделювання руху судна в умовах зовнішнього збурення з використанням сучасного програмного продукту з метою тестування авторульового.

Результати. Визначено особливості малорозмірних морських рухомих об'єктів, які є предметом обговорення в роботі. Наведено аналітичний огляд сучасних методів регулювання та стабілізації, доцільних для застосування під час розробки систем автоматичного керування рухом безпілотних суден і підводних апаратів. Запропоновано гібридну архітектуру системи стабілізації курсу судна. Наведено приклад зі швидкого налаштування параметрів регулятора з використанням запропонованого програмного забезпечення.

Наукова новизна. Вперше сформовано теоретичні засади побудови адаптивно-інтелектуальних систем автоматичного керування, які здатні до самоналаштування, реконфігурації та оптимізації дій у реальному часі на основі аналізу стану середовища та об'єкта.

Запропоновано застосування засобів комп'ютерного моделювання для одночасного дослідження якості керування та поведінки судна в морських умовах.

Практична значимість. Розширення можливостей удосконалення роботи систем автоматичного керування рухом морських рухомих об'єктів за рахунок попереднього тестування регуляторів з використанням сучасного програмного забезпечення. Приклад поєднання двох сучасних програм для удосконалення налаштувань регулятора стабілізації курсу судна з моделюванням його руху в умовах зовнішнього збурення.

Ключові слова: адаптивні систем керування; інтелектуальне керування; морські рухомі об'єкти; малорозмірне безпечне судно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Головною проблемою під час розробки системи керування морськими автономними безпілотними суднами та підводними апаратами є питання невизначеності впливу зовнішнього збурення. З метою удосконалення якості керування даними об'єктами в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити особливості малорозмірних безпечних суден та автономних підводних апаратів;
- провести огляд сучасного стану систем автоматичного керування морськими робототехнічними засобами;
- визначити інструменти моделювання та експериментального дослідження динаміки МРО в умовах зовнішнього збурення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В огляді проаналізовано сучасний стан і ключові технології систем БПА, зокрема рушії, енергетику, зв'язок, сенсорні системи, навігацію та керування. Розглянуто як автономні, так і дистанційно керовані апарати та їх широке застосування – від оборонних і спостережних місій до наукових і інженерних робіт під водою [1].

З позицій системного підходу визначено ключові завдання автоматизації протимінного безпечного судна, зокрема синтез систем керування рухом, енергозабезпечення та спеціалізованого обладнання. Запропоновано етапи проєктування та сформульовано вимоги до системи автоматичного керування, орієнтовані на робастність, маневреність і точність позиціонування в умовах зовнішніх збурень [2].

У статті подано огляд і класифікацію сучасних підводних апаратів та ключових допоміжних технологій для концепції «розумного» океану. Розглянуто основні типи АПА та їх застосування в моніторингу, дослідженнях, обороні й інспекції підводної інфраструктури [3].

Розглянуто новий робастний контролер ARISE для невизначених нелінійних систем, який зменшує коливання та ефективно працює навіть з негладкою і нелінійною динамікою. Його переваги підтверджені аналізом стійкості та моделюванням, де

ARISE перевершує класичний ковзний режим за різних умов [4].

Досліджено синтез високопродуктивного контролера відстеження для невизначених систем Ейлера–Лагранжа на основі поєднання RISE і заданої продуктивності. Ефективність запропонованих безперервних контролерів підтверджено моделюванням та експериментами [5].

Розглянуто застосування МРПІ для керування автономним підводним апаратом з урахуванням змінних умов та обмежень. Результати моделювання показують перевагу МРПІ над PID і Cascade PID та його здатність ефективно працювати з обмеженнями через функцію витрат [6].

Запропоновано метод навігації АНПА, що поєднує поля напрямних векторів і керування МРПІ для точного відстеження та уникнення перешкод у складних середовищах. Моделювання підтверджує значне зменшення похибки відстеження та надійну роботу методу за наявності збурень [7].

У статті запропоновано метод автономного швартування надводного судна, що поєднує керування МРПІ з виявленням причалу в реальному часі на основі LiDAR. Результати моделювання демонструють точне, безпечне та плавне швартування з урахуванням реалістичної динаміки, шумів сенсорів і обмежень середовища [8].

У роботі запропоновано ієрархічну систему автономної навігації, що поєднує прогнозування середовища та оптимізацію керування для відстеження траєкторії й уникнення перешкод в умовах збурень. Як і в нашому дослідженні, ключовий акцент зроблено на підвищенні робастності та ефективності навігації автономного судна за рахунок урахування динаміки об'єкта й навколишнього середовища [9].

У статті подано систематичний огляд методів навчання з підкріпленням для систем руху АНПА в умовах складних збурень і нелінійної динаміки. Класифіковано завдання керування, планування та координації кількох апаратів, що є близьким до нашого підходу, орієнтованого на робастне керування та навігацію АНПА в невизначеному середовищі [10].

У роботі подано огляд методів глибокого навчання з підкріпленням для запобігання зіткненням

безпілотних надводних суден в умовах невизначеного морського середовища. Основну увагу приділено робастному прийняттю рішень, урахуванню збурень та інтеграції навігаційних і керуючих стратегій для підвищення безпеки автономного руху [11].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

На відміну від традиційних пілотованих суден, автономні надводні та підводні апарати повинні функціонувати в умовах обмеженої або відсутньої можливості дистанційного керування, що вимагає від систем керування здатності до самостійного прийняття рішень, адаптації до мінливих умов навколишнього середовища. Зростання інтенсивності використання автономних морських рухомих об'єктів (МРО) у цивільній, промисловій та оборонній сферах стимулює розробку більш ефективних алгоритмів керування, спроможних забезпечити стійкість, енергоефективність і надійність МРО.

Безперервне вдосконалення методів дослідження впливу природних факторів на динаміку морських роботизованих об'єктів розширює можливості створення ефективних систем керування та вимагає регулярного аналізу актуального стану розвитку в цій сфері.

Застосування засобів комп'ютерного моделювання є необхідним етапом розробки та дослідження систем автоматичного керування, оскільки дозволяє перевірити їх працездатність і стійкість без ризику для реального об'єкта. Моделювання дає змогу відтворювати нелінійну динаміку руху, дію зовнішніх збурень і невизначеність параметрів у контрольованих та повторюваних умовах. Це забезпечує попередню оцінку якості закону керування, порівняння різних підходів і виявлення потенційних недоліків ще до натурних експериментів, що суттєво знижує витрати часу та ресурсів.

МЕТА СТАТТІ

Мета статті – визначення основних напрямків удосконалення систем автоматичного керування рухом морських роботизованих засобів в умовах зовнішнього збурення.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Системний аналіз існуючих традиційних, адаптивних та робастних систем керування.

Теорія автоматичного керування, зокрема методи побудови ПІД-, нечітких, адаптивних та нейромережних регуляторів.

Визначення інструментів моделювання та експериментального дослідження динаміки МРО в умовах зовнішнього збурення.

Імітаційне моделювання у MATLAB/Simulink та VeSim для перевірки працездатності розроблених алгоритмів у змодельованому морському середовищі.

Об'єкт дослідження – система автоматичного керування рухом автономного малорозмірного судна.

Предмет дослідження – підвищення якості керування МРО в умовах зовнішнього збурення.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Класифікація автономних надводних і підводних малорозмірних морських рухомих об'єктів

Класифікація автономних надводних і підводних малорозмірних рухомих об'єктів включає в себе досить широкий діапазон параметрів для аналізу. В роботі представлено деякі з них, що підкреслюють основну тематику роботи [3, 12, 13].

За середовищем функціонування автономні морські рухомі об'єкти (МРО) поділяються на:

- автономні надводні апарати, що здійснюють рух по поверхні води та зазнають суттєвого впливу вітрових і хвильових збурень;
- автономні підводні апарати, які функціонують у товщі води або поблизу донної поверхні, де домінуючими є гідродинамічні збурення, зумовлені течіями та неоднорідністю середовища.

За рівнем автономності виконання місії безпека МРО поділяються на:

- дистанційно керовані апарати, керування якими здійснюється оператором у режимі реального часу;
- напівавтономні апарати, що виконують окремі функції автономно з можливістю втручання оператора;
- повністю автономні апарати, здатні самостійно планувати траєкторію руху, адаптуватися до змін зовнішніх умов і ухвалювати керуючі рішення без участі оператора.

З огляду на масо-габаритні параметри та специфіку застосування, до МРО належать:

- мікро- та мініапарати, що характеризуються малою масою та обмеженим енергетичним ресурсом;
- малорозмірні апарати, які поєднують достатню маневровість і можливість встановлення навігаційних та керуючих систем;
- середні апарати, що мають розширені функціональні можливості та підвищену автономність.

За характером взаємодії з водним середовищем розрізняють такі режими руху:

- водоізмисний режим, що характеризується домінуванням сил гідростатичної підтримки;
- перехідний режим, у якому одночасно проявляються водоізмисні та динамічні ефекти;
- глісуючий режим, притаманний швидкісним малорозмірним надводним апаратам, у якому суттєво зростає роль гідродинамічних сил;
- рух підводних апаратів зі сталою глибиною;
- режими занурення та спливання, що супроводжуються зміною балансу сил і моментів.

За конструктивною схемою автономні МРО поділяються на:

Для надводних апаратів: однокорпусні; багатокорпусні (катамарани, тримарани).

Для підводних апаратів: торпедоподібні; модульні; гібридні конструкції, здатні до функціонування як у надводному, так і в підводному середовищі.

Головною особливістю малорозмірних автономних морських рухомих об'єктів є те, що вони мають невелику інерційність і часто рухаються у режимах, де гідродинамічні та аеродинамічні сили порівнянні за величиною. Також, автономні малорозмірні МРО мають невелику енергоємність, що обмежує тривалість виконання місії.

Зазначені особливості зумовлюють підвищені вимоги до ефективності та точності системи керування.

Аналітичний огляд сучасного стану автоматичного керування засобами морської робототехніки

Розглянемо декілька сучасних архітектур регуляторів, що активно застосовуються для стабілізації руху автономних рухомих об'єктів з урахуванням можливого непередбаченого зовнішнього впливу.

RISE-контролер (Robust Integral of the Sign of the Error) є нелінійним робастним регулятором, який забезпечує асимптотичну збіжність похибки керування до нуля за наявності невизначеності моделі об'єкта та зовнішніх збурень. Завдяки високій робастності та відсутності потреби в точному знанні гідродинамічних параметрів, RISE-контролери є перспективними для керування малорозмірними надводними та підводними рухомими об'єктами в умовах вітро-хвильового впливу [14, 15].

Узагальнена структура RISE-контролера для системи керування за помилкою $e(t)$

$$u(t) = -k_1 e(t) - k_2 \int_0^t \operatorname{sgn}(e(\tau)) d\tau,$$

де: $u(t)$ – керуючий сигнал; $e(t)$ – похибка (курс, траєкторія); $k_1, k_2 > 0$ – коефіцієнти підсилення;

Застосування RISE-контролерів може бути доцільним для керування малорозмірними рухомими об'єктами, оскільки такі об'єкти мають малу інерційність і нелінійну динаміку та є чутливими до дії вітру, хвиль і течій. Гідродинамічні параметри цих об'єктів часто відомі неточно, що ускладнює побудову точної математичної моделі й обмежує ефективність класичних лінійних регуляторів. RISE-контролери характеризуються високою робастністю до параметричних невизначеностей і зовнішніх збурень та забезпечують збіжність похибки керування до нуля. Це робить їх ефективними для стабілізації та керування рухом МРО в реальних умовах експлуатації.

MPPI-керування (Model Predictive Path Integral) є стохастичним методом оптимального керування, який формує керуючі сигнали шляхом статистичного усереднення множини випадкових керуючих траєкторій з урахуванням інтегрального функціоналу ваги. Оптимальне керування на першому кроці наближення [7]:

$$u^* = \frac{\sum_{k=1}^N u_k \exp\left(-\frac{1}{\lambda} S_k\right)}{\sum_{k=1}^N \exp\left(-\frac{1}{\lambda} S_k\right)},$$

де: u_k – випадкова керуюча траєкторія; S_k – інтегральна вартість; λ – параметр, що регулює стохастичність; N – кількість згенерованих траєкторій.

Дане керування, також має ряд обмежень, таких як:

- значні обчислювальні витрати;
- залежність від якості моделі;
- потребує ретельного вибору функції ваги.

MPPI-керування може бути застосовано в автономних підводних апаратах, оскільки АПА функціонують у складному та невизначеному водному середовищі з нелінійною динамікою, стохастичними збуреннями, зумовленими течіями й турбулентністю, а також жорсткими обмеженнями на рух і керуючі дії. Метод MPPI не потребує лінеаризації математичної моделі та дозволяє безпосередньо враховувати нелінійні властивості об'єкта і випадковий характер зовнішніх впливів. Формування керування на основі статистичного усереднення множини керуючих траєкторій забезпечує гнучке планування руху, адаптацію до змін середовища та ефективне розв'язання задач навігації, слідування траєкторії й уникнення перешкод. Тому MPPI є перспективним підходом для керування АПА у реальних умовах експлуатації.

Deep RL керування (Deep Reinforcement Learning) – це підхід до керування автономними суднами, при якому оптимальне завдання слідування траєкторії формується шляхом навчання з підкріпленням із використанням глибоких нейронних мереж. Deep RL здатний ефективно працювати за умов нелінійної динаміки та значних зовнішніх збурень без використання точної математичної моделі. Завдяки цьому він є перспективним інструментом для задач траєкторного керування автономними малорозмірними рухомими об'єктами [9].

Deep RL керування передбачає навчання агентів приймати рішення, взаємодіючи з навколишнім середовищем для досягнення оптимального результату, використовуючи при цьому глибокі нейронні мережі для представлення закону керування, функцій ваги або моделей навколишнього середовища. Така інтеграція дозволяє системам DRL обробляти високорозмірні вхідні дані, такі як зображення або безперервні сигнали управління, що робить підхід ефективним для вирішення складних завдань. З моменту впровадження глибокої Q-мережі DRL досягла значних успіхів у різних сферах, включаючи ігри, робототехніку та автономні системи.

Deep Reinforcement Learning доцільне для керування автономними МРО оскільки вони працюють у складному та змінному морському середовищі. Динаміка таких об'єктів є нелінійною та

гідродинамічні параметри часто відомі лише наближено. Методи Deep RL не потребують точної математичної моделі та формують керування на основі навчання під час взаємодії із середовищем. Використання глибоких нейронних мереж дозволяє враховувати багатовимірний стан судна та різні критерії якості керування. Завдяки цьому Deep RL є ефективним підходом для задач утримання судна на траєкторії, маневрування та автономної навігації.

Окремий напрям сучасних досліджень у сфері керування морськими рухомими об'єктами пов'язаний із інтелектуальними підходами та методами машинного навчання. Нейронні мережі використовуються для прогнозування зовнішніх збурень і складних нелінійних залежностей, що не піддаються точному аналітичному опису [16]. Методи глибокого навчання з підкріпленням забезпечують формування закону керування на основі взаємодії об'єкта з середовищем і накопиченого досвіду [11]. Експертні та нечіткі системи керування дозволяють синтезувати закон керування шляхом формалізації знань фахівців і лінгвістичних правил, що є ефективним за умов невизначеності та неповної інформації [17, 18].

Розробка удосконаленої архітектури системи стабілізації автономного малорозмірного судна на курсі

Головна ідея удосконалення системи стабілізації курсу судна полягає в поєднанні нелінійного робастного регулятора з інтелектуальною системою аналізу і прийняття рішення, такою як нейронна мережа. RISE-регулятор використовується як базовий регулятор для стабілізації курсу. Він забезпечує асимптотичну збіжність похибки керування. Нейронна мережа при цьому виконує роль онлайн-оцінювача невідомих збурень і немодельованої динаміки об'єкта. Архітектуру гібридної системи стабілізації курсу МРО в умовах зовнішнього збурення представлено на рисунку 1.

1) Данні від навігаційної системи судна, що відповідають реальним умовам зовнішнього збурення, реальним поточним параметрам судна та режиму керування; 2) Нейронна мережа отримує дані про зовнішнє

збурення і формує сигнал корекції курсу в відповідності до реальних умов плавання; 3) RISE-регулятор стабілізації курсу; 4) Рушійно-рульовий комплекс

Запропонована гібридна архітектура керування поєднує RISE-регулятор, який забезпечує асимптотичну стабільність системи, з нейромережним блоком оцінювання зовнішніх збурень. Такий підхід дозволяє зберегти теоретичні гарантії стійкості та водночас підвищити точність керування в умовах невизначеності зовнішнього середовища.

Визначення інструментів моделювання та експериментального дослідження динаміки МРО в умовах зовнішнього збурення

В роботі проведено огляд сучасного програмного забезпечення за допомогою якого можна дослідити динаміку руху судна (або АПА) в умовах впливу морського збурення. Головна ідея полягає в тому, що даний програмний продукт повинен приймати для моделювання числову модель судна користувача, надавати можливість створення різних сценаріїв зовнішнього збурення, проводити імітаційне моделювання і мати можливість підключення зовнішнього авторульового для його тестування.

Далі розглянемо декілька прикладів таких програмних продуктів, які було обрано за критеріями: широкі можливості, простота використання.

VeSim – це середовище для часової симуляції руху суден в умовах зовнішнього збурення, розроблене дослідниками в SINTEF (Норвегія) [19]. Він поєднує маневрування та поведінку судна в морських умовах у межах одного чисельного симулятора. У VeSim моделюються зовнішні сили від хвиль, вітру та течії, а також взаємодія пропульсивних пристроїв (гвинтів, рульових систем тощо) і рух корпусу під час маневру. Інструмент може включати різноманітні датчики (GPS, гірокомпас тощо) і підтримує інтеграцію з іншими програмними або апаратними компонентами для тестування систем керування (hardware-in-the-loop). Він застосовується для вивчення поведінки суден при різних курсах і швидкостях у часі, включно зі складними зовнішніми умовами.

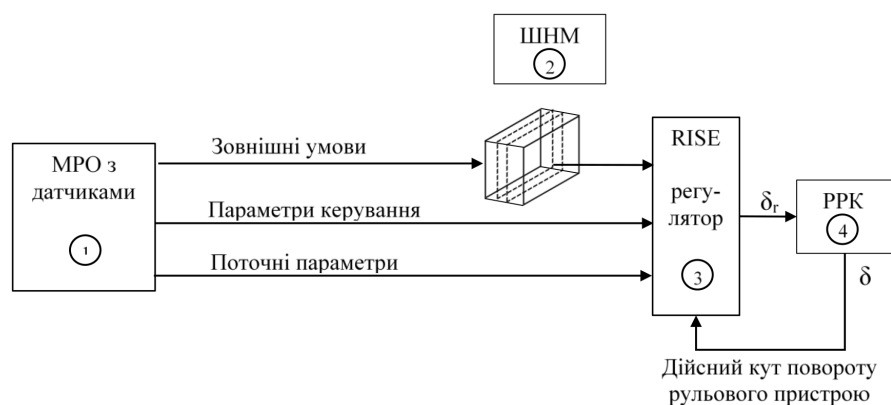


Рис. 1. Архітектура гібридної системи стабілізації курсу МРО в умовах зовнішнього збурення

Prodeus DS (Decision Support / Dynamic Simulation) – це програмна платформа для динамічного моделювання та підтримки прийняття рішень у задачах керування суднами, орієнтована на чисельну симуляцію руху надводних та підводних об'єктів з урахуванням реальної динаміки, рушійно-рульового комплексу та зовнішніх збурень [20].

Преваги Prodeus DS:

- є середовищем моделювання динаміки ASV/MPO;
- дозволяє досліджувати рух судна у часовій області;
- може використовуватися як віртуальний об'єкт керування для тестування законів керування;
- підходить для порівняння класичних (PID, RISE) та інтелектуальних методів;
- застосовується на етапі верифікації алгоритмів керування до експериментів або натурних випробувань.

UUV Simulator – це відкрите програмне середовище для моделювання безекіпажних підводних апаратів (БПА), призначене для дослідження їх динаміки, навігації та алгоритмів керування у віртуальному середовищі [21].

UUV Simulator є розширенням ROS + Gazebo і використовується як віртуальний об'єкт керування для автономних підводних апаратів. Він дозволяє відтворювати рух БПА у тривимірному водному середовищі з урахуванням гідродинаміки та зовнішніх збурень.

Функціональні можливості UUV Simulator:

- моделювання 6-ступеневої динаміки підводного апарата;
- урахування гідродинамічних сил і моментів (додаткові маси, опори, демпфування);
- моделювання течій і збурень середовища;
- підтримка різних рушіїв і керуючих поверхонь;

– імітація навігаційних датчиків (IMU, DVL, глибини, GPS при спливанні);

– інтеграція з алгоритмами керування через ROS-плагіни.

Застосування VeSim для тестування регулятора стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього збурення

Розглянемо на прикладі застосування запропонованого вище програмного пакету VeSim від компанії Sintef для тестування регулятора курсу судна в умовах зовнішнього збурення. З початку підготуємо регулятор курсу судна попередньо розроблений в програмному пакеті Matlab/Simulink. Для цього необхідно зберегти, розроблений в Simulink регулятор, у форматі FMU. На рисунку 2 представлено структуру ПІД регулятора, розробленого для стабілізації курсу судна в системі Simulink [22].

Наступним кроком підключаємо до програмного пакету файл з геометрією корпусу судна та вибираємо рушійно-стерновий комплекс. Також, підключаємо FMU файл з розробленим регулятором.

Наступним етапом створюємо сценарій зовнішніх умов плавання, а саме задаємо параметри вітру, хвилювання і течії. В таблиці 1 представлено сценарій зовнішнього збурення, що відповідає даному прикладу.

Наступним кроком було виконано підлаштування параметрів регулятора.

Параметри ПІД-регулятора були підібрані експериментально шляхом послідовного налаштування пропорційної, диференційної та інтегральної складових з урахуванням критеріїв швидкодії, перерегулювання та стійкості системи в умовах вітро-хвильових збурень.

На рисунку 3 представлено результати моделювання руху судна, керованого ПІД регулятором. Умови зовнішнього збурення представлені в табл.1.

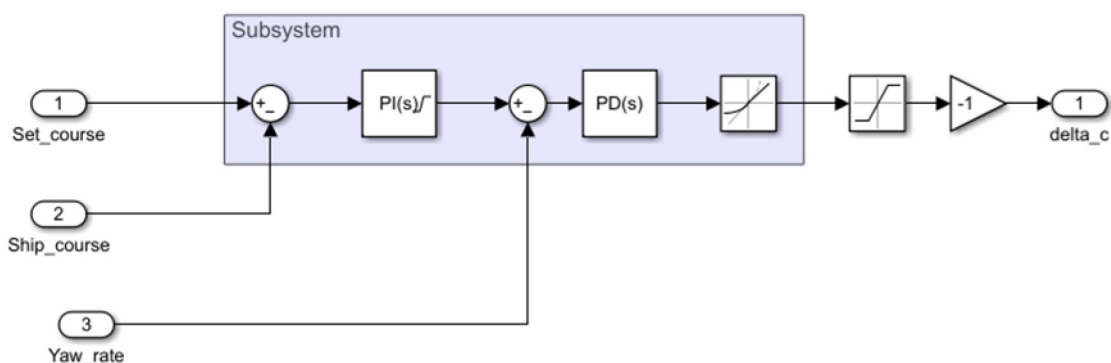


Рис. 2. Структурна схема регулятора курсу судна створена в Simulink

Таблиця 1. Сценарій зовнішнього збурення

Судно		Вітер		Хвилювання		Течія	
швидкість, вуз.	курс, град.	швидкість, м/с.	напрямок, град.	висота, м	напрямок, град.	швидкість, м/с.	напрямок, град.
12	0	5	10	2	10	0.1	20

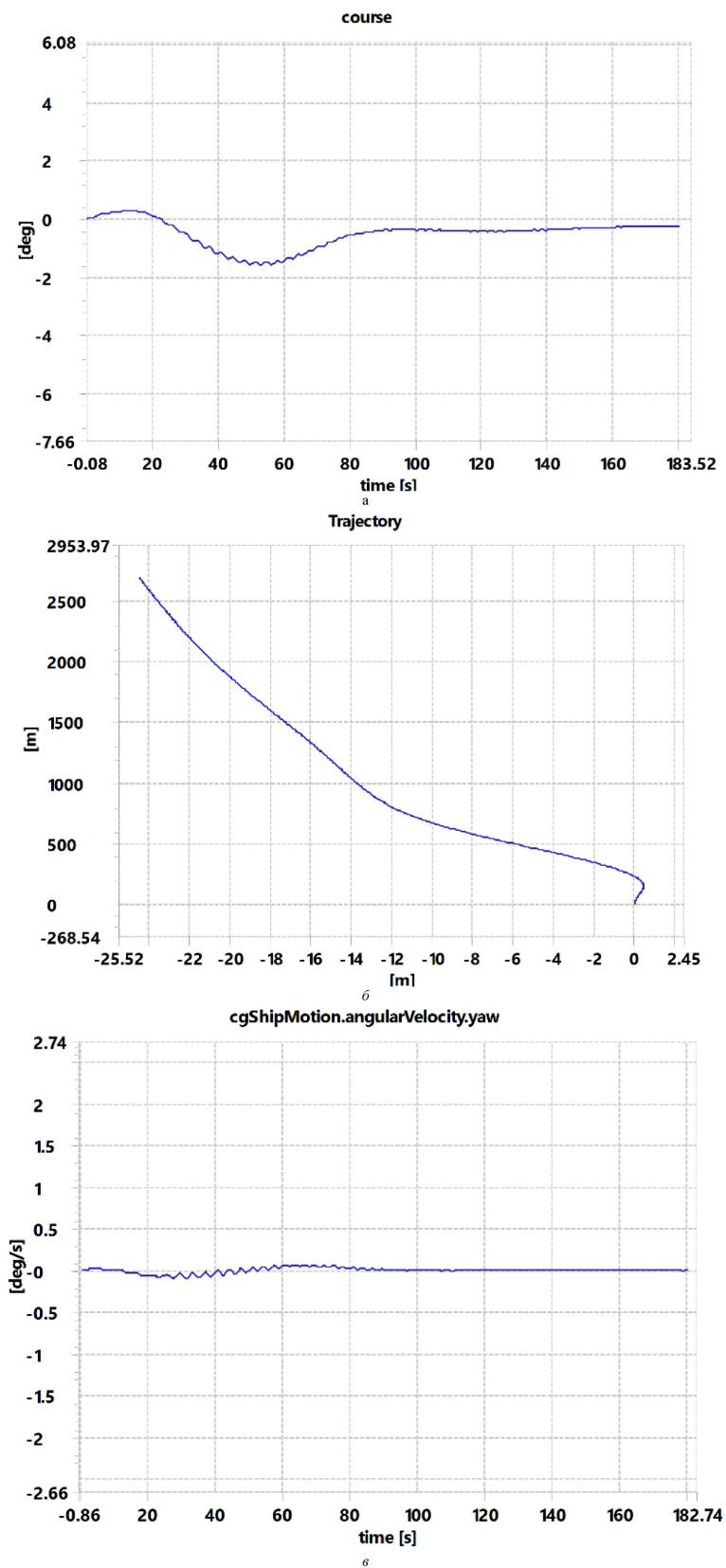


Рис. 3. Моделювання руху судна, керованого ПІД регулятором в умовах зовнішнього збурення:
а) курс судна; б) траєкторія руху; в) кутова швидкість

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Постійне зростання вимог до точності керування морськими рухомими об'єктами підвищує актуальність проблеми впливу невизначених зовнішніх збурень на МРО. До таких збурень належать вітер, хвилювання та течія. Дія цих факторів суттєво ускладнює задачі стабілізації руху та забезпечення точності позиціонування. Розвиток морської робототехніки безпосередньо залежить від здатності систем автоматичного керування компенсувати ці фактори та підтримувати заданий режим руху навіть у надскладних динамічних умовах.

З метою удосконалення якості керування МРО в умовах зовнішнього збурення в роботі представлено аналітичний огляд сучасних методів регулювання та стабілізації, які доцільно застосовувати для розробки систем автоматичного керування рухом безпілотних суден та підводних апаратів.

Окрему увагу в роботі приділено створенню гібридної архітектури, яка буде поєднувати у собі базовий регулятор стабілізації курсу судна та інтелектуальну систему для оцінки зовнішнього збурення. В даній роботі розглянуто архітектуру, яка поєднує RISE-контролер для зменшення похибки керування та багатошарову MLP-нейронну мережу для оцінки невідомих збурень і немодельованої динаміки об'єкта. Однак, доцільно розглядати і інші варіанти поєднання методів керування нелінійними об'єктами, якими є представлені в роботі МРО.

Не менш важливим завданням є перевірка роботи регулятора або попереднє тестування системи автоматичного керування на етапі розробки.

Особливо важливо мати змогу досліджувати динаміку руху керованого МРО в умовах наближених до реального морського середовища. В даній роботі представлено результат системного аналізу сучасних програмних засобів, які було вибрано за критеріями: відповідність вимогам, простота використання [23]. У якості прикладу реалізації запропонованого підходу до розробки систем автоматичного керування наведено приклад застосування VeSim для тестування регулятора стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього збурення.

ВИСНОВКИ

1) Методом класифікації визначено особливості малорозмірних морських рухомих об'єктів, які є предметом обговорення в роботі.

2) З метою підвищення якості керування морськими роботизованими об'єктами в умовах дії зовнішніх збурень у роботі наведено аналітичний огляд сучасних методів регулювання та стабілізації, доцільних для застосування під час розробки систем автоматичного керування рухом безпілотних суден і підводних апаратів.

3) Запропоновано гібридну архітектуру системи стабілізації курсу судна, яка поєднує RISE-контролер для зменшення похибки керування та багатошарову MLP-нейронну мережу для оцінки невідомих зовнішніх збурень.

4) В роботі проведено огляд сучасного програмного забезпечення за допомогою якого можна дослідити динаміку руху судна або автономного підводного апарату в умовах впливу морського збурення.

5) Наведено приклад зі швидкого налаштування параметрів регулятора з використанням запропонованого програмного забезпечення.

REFERENCES

- [1] Patel, S. (2025). A Comprehensive Review of Unmanned Underwater Vehicles: Technologies, Applications, and Challenges. *Journal of Scientific Innovation and Advanced Research (JSIAR)*, 1(3), 236–243.
- [2] Tymchenko, V. L., & Nadtochy, A. V. (2025). Bezekipazhne nadvodne sudno yak skladova avtomatyzovanoi systemy rozminuvannya vnutrishnikh vod Ukrainy. [Unmanned surface vessel as a component of the automated mine clearance system of the inland waters of Ukraine]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 6 (286), 182–188. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-182-188> [in Ukrainian].
- [3] Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). *State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications* (No. arXiv:2412.18667). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.18667>
- [4] Basyal, S., Ting, J., Mishra, K., & Allen, B. C. (2025). The Robust Control of a Nonsmooth or Switched Control-Affine Uncertain Nonlinear System Using an Auxiliary Robust Integral of the Sign of the Error (ARISE) Controller. *Applied Sciences*, 15(8), 4482. <https://doi.org/10.3390/app15084482>
- [5] Asl, H. J., Narikiyo, T., & Kawanishi, M. (2019). RISE-based prescribed performance control of Euler–Lagrange systems. *Journal of the Franklin Institute*, 356(13), 7144–7163. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.06.033>
- [6] Nicolay, P., Petillot, Y., Marfeychuk, M., Wang, S., & Carlucho, I. (2023). *Enhancing AUV Autonomy With Model Predictive Path Integral Control*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.05547>
- [7] Zhao, J., Liu, T., & Huang, J. (2025). Enhanced obstacle avoidance for autonomous underwater vehicles via path integral control based on guiding vector field. *ISA Transactions*, 166, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.07.020>
- [8] Vijayakumar, A., A. A. M., & Somayajula, A. (2025). *Model Predictive Path Integral Docking of Fully Actuated Surface Vessel*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2501.09668>
- [9] Wang, Y., Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2025). Autonomous Navigation Control and Collision Avoidance Decision-Making of an Under-Actuated ASV Based on Deep Reinforcement Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), 2108. <https://doi.org/10.3390/jmse13112108>

- [10] Yu, T., Zhang, Q., & Liu, T. (2025). Reinforcement learning approaches in the motion systems of autonomous underwater vehicles. *Applied Ocean Research*, 161, 104682. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104682>
- [11] Li, Y., Wu, D., You, Z., Chen, G., & Wu, D. (2025). Deep reinforcement learning for collision avoidance in unmanned surface vehicles: State-of-the-art. *Applied Ocean Research*, 164, 104778. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104778>
- [12] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>
- [13] Kumar, A., & Kurmi, J. (2018). A REVIEW ON UNMANNED WATER SURFACE VEHICLE. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 95–99. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v9i0.6145>
- [14] Asl, H. J., Narikiyo, T., & Kawanishi, M. (2019). RISE-based prescribed performance control of Euler–Lagrange systems. *Journal of the Franklin Institute*, 356(13), 7144–7163. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.06.033>
- [15] Deng, W., & Yao, J. (2017). Adaptive integral robust control and application to electromechanical servo systems. *ISA Transactions*, 67, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.01.024>
- [16] Xu, P.-F., Han, C.-B., Cheng, H.-X., Cheng, C., & Ge, T. (2022). A Physics-Informed Neural Network for the Prediction of Unmanned Surface Vehicle Dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 148. <https://doi.org/10.3390/jmse10020148>
- [17] Ishaque, K., Abdullah, S. S., Ayob, S. M., & Salam, Z. (2011). A simplified approach to design fuzzy logic controller for an underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 38(1), 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.017>
- [18] Zarkasi, A., Yudi, E. D., Ravi, M. A., & Angkotasana, I. J. (2020). Design Depth and Balanced Control System of an Autonomous Underwater Vehicle with Fuzzy logic. *Proceedings of the Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019)*. Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019), Palembang, Indonesia. <https://doi.org/10.2991/aisr.k.200424.031>
- [19] VeSim (SINTEF). Otrymano z: sintef.no
- [20] ProteusDS / ShipMo3D. Otrymano z: proteusds.com
- [21] *Unmanned Underwater Vehicle Simulator Documentation*. (n.d.). Retrieved December 23, 2025, from <https://uuvsimulator.github.io>
- [22] Burunin, A. P., Hrudinina, H. S. (2024). Doslidzhennia efektyvnosti systemy keruvannia malorozmirnym bezekipazhnym nadvodnym sudnom v umovakh dii zovnishnikh zburen. [Research on the effectiveness of the control system of a small unmanned surface vessel under the influence of external disturbances]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiralak Makarova*. NUK, № 4 (497), S. 131–140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19) [in Ukrainian].
- [23] Hrudinina, H. S. Suchasni zasoby kompiuternoho doslidzhennia dynamiky morskykh rukhomykh obektiv v umovakh zovnishnoho zburennia. [Modern computational approaches to the dynamics of marine mobile objects under external disturbances]. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi : KhVI Mizhnarodna naukoivo-tekhnichna konferentsiia : materialy*. – Mykolaiv : NUK, 2025. S.1081–1085. [in Ukrainian].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Patel, S. (2025). A Comprehensive Review of Unmanned Underwater Vehicles: Technologies, Applications, and Challenges. *Journal of Scientific Innovation and Advanced Research (JSIAR)*, 1(3), 236–243.
- [2] Тимченко, В. Л., & Надточий, А. В. (2025). Безекіпажне надводне судно як складова автоматизованої системи розмінування внутрішніх вод України. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету Імені Володимира Даля*, 6(286), 182–188. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-182-188>
- [3] Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). *State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications* (No. arXiv:2412.18667). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.18667>
- [4] Basyal, S., Ting, J., Mishra, K., & Allen, B. C. (2025). The Robust Control of a Nonsmooth or Switched Control-Affine Uncertain Nonlinear System Using an Auxiliary Robust Integral of the Sign of the Error (ARISE) Controller. *Applied Sciences*, 15(8), 4482. <https://doi.org/10.3390/app15084482>
- [5] Asl, H. J., Narikiyo, T., & Kawanishi, M. (2019). RISE-based prescribed performance control of Euler–Lagrange systems. *Journal of the Franklin Institute*, 356(13), 7144–7163. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.06.033>
- [6] Nicolay, P., Petillot, Y., Marfeychuk, M., Wang, S., & Carlucho, I. (2023). *Enhancing AUV Autonomy With Model Predictive Path Integral Control*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2308.05547>
- [7] Zhao, J., Liu, T., & Huang, J. (2025). Enhanced obstacle avoidance for autonomous underwater vehicles via path integral control based on guiding vector field. *ISA Transactions*, 166, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.07.020>
- [8] Vijayakumar, A., A, A. M., & Somayajula, A. (2025). *Model Predictive Path Integral Docking of Fully Actuated Surface Vessel*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2501.09668>
- [9] Wang, Y., Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2025). Autonomous Navigation Control and Collision Avoidance Decision-Making of an Under-Actuated ASV Based on Deep Reinforcement Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), 2108. <https://doi.org/10.3390/jmse13112108>
- [10] Yu, T., Zhang, Q., & Liu, T. (2025). Reinforcement learning approaches in the motion systems of autonomous underwater vehicles. *Applied Ocean Research*, 161, 104682. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104682>

- [11] Li, Y., Wu, D., You, Z., Chen, G., & Wu, D. (2025). Deep reinforcement learning for collision avoidance in unmanned surface vehicles: State-of-the-art. *Applied Ocean Research*, 164, 104778. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104778>
- [12] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>
- [13] Kumar, A., & Kurmi, J. (2018). A REVIEW ON UNMANNED WATER SURFACE VEHICLE. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 95–99. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v9i0.6145>
- [14] Asl, H. J., Narikiyo, T., & Kawanishi, M. (2019). RISE-based prescribed performance control of Euler–Lagrange systems. *Journal of the Franklin Institute*, 356(13), 7144–7163. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.06.033>
- [15] Deng, W., & Yao, J. (2017). Adaptive integral robust control and application to electromechanical servo systems. *ISA Transactions*, 67, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.01.024>
- [16] Xu, P.-F., Han, C.-B., Cheng, H.-X., Cheng, C., & Ge, T. (2022). A Physics-Informed Neural Network for the Prediction of Unmanned Surface Vehicle Dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 148. <https://doi.org/10.3390/jmse10020148>
- [17] Ishaque, K., Abdullah, S. S., Ayob, S. M., & Salam, Z. (2011). A simplified approach to design fuzzy logic controller for an underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 38(1), 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.017>
- [18] Zarkasi, A., Yudi, E. D., Ravi, M. A., & Angkotosan, I. J. (2020). Design Depth and Balanced Control System of an Autonomous Underwater Vehicle with Fuzzy logic. *Proceedings of the Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019)*. Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019), Palembang, Indonesia. <https://doi.org/10.2991/aisr.k.200424.031>
- [19] VeSim (SINTEF). Отримано з: sintef.no
- [20] ProteusDS / ShipMo3D. Отримано з: proteusds.com
- [21] *Unmanned Underwater Vehicle Simulator Documentation*. (n.d.). Retrieved December 23, 2025, from <https://uuvsimulator.github.io>
- [22] Бурунін, А. П., Грудініна, Г. С. (2024). Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безкіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. НУК, № 4 (497), С. 131–140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)
- [23] Грудініна, Г. С. Сучасні засоби комп’ютерного дослідження динаміки морських рухомих об’єктів в умовах зовнішнього збурення. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XVI Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали*. Миколаїв : НУК, 2025. С. 1081–1085.

© Грудініна Г. С.

Дата надходження статті до редакції: 22.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0