



УДК 681.5

## REGULATOR FOR STABILIZING THE SHIP'S COURSE IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF EXTERNAL DISTURBANCE

РЕГУЛЯТОР СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСА СУДНА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).12](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).12)

Hanna S.  
Hrudinina

Грудініна Ганна  
Сергіївна

Hanna S. Hrudinina

Грудініна Ганна Сергіївна, канд. техн. наук  
hanna.hrudinina@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0001-8298-9251

*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.** This paper presents a study of the performance quality of a heading stabilization system for a small-size vessel under external disturbances. Based on the analysis of the vessel dynamics of the selected type, a nonlinear robust controller – namely, the RISE controller – was employed in the heading stabilization system. The controller ensures asymptotic convergence of the control error to zero in the presence of model uncertainties and external disturbances. In order to optimize the tuning parameters of the proposed controller, simulation-based modeling of the vessel motion dynamics under external disturbances is utilized. According to the engineering classification of marine environmental conditions (Operational Sea States), scenarios of external disturbances are developed in this study, including wind, waves, and currents, which correspond to a restricted control mode.

To conduct the study, the VeSim simulation software suite was used, providing the capability to analyze vessel motion dynamics under wave excitation, currents, and wind. This software package was applied to test the developed RISE controller within the vessel heading stabilization system. Using an iterative simulation approach, optimal tuning parameters of the controller gain coefficients were determined for each individual external disturbance scenario.

As a result of the study, a database consisting of optimal tuning parameters of the RISE controller for various types of external disturbances was obtained. Thus, in the presence of a higher-level navigation system, once the actual environmental disturbance conditions are identified, appropriate controller tuning parameters can be selected. For decision-making in this case, the use of artificial intelligence methods, including artificial neural networks, is considered appropriate.

The main objective of this work was to investigate vessel dynamics under following, beam, and head external disturbances under conditions максимально close to real-world scenarios. For this purpose, computer simulation methods were applied using the modern VeSim software developed by SINTEF, Norway.

**Key words:** simulation modeling; ship course stabilization; RISE controller; neural network; external disturbances.

**Анотація.** В роботі представлено дослідження якості роботи системи стабілізації курсу малорозмірного судна в умовах зовнішнього збурення. Виходячи з аналізу динаміки судна обраного типу в системі стабілізації курсу використано нелінійний робастний регулятор – RISE-контролер, який забезпечує асимптотичну збіжність похибки керування до нуля за наявності невизначеності моделі об'єкта та зовнішніх збурень. З метою оптимізувати параметри налаштування даного контролера в роботі запропоновано використання імітаційного моделювання динаміки руху судна в умовах зовнішнього збурення. Виходячи з інженерної класифікації умов морського середовища (Operational Sea States), в роботі розроблено сценарії зовнішнього збурення, якими є: вітер, хвилювання і течія, що належать до обмеженого режиму керування.

Для проведення дослідження було використано програмно-моделюючий комплекс VeSim, який надає можливість проаналізувати динаміку руху судна в умовах морського хвилювання, течії та вітру. Даний комплекс було використано для тестування розробленого RISE-регулятора в системі стабілізації курсу судна. Методом ітераційного моделювання було обрано оптимальні параметри налаштування коефіцієнтів підсилення регулятора для кожного окремого сценарію зовнішнього збурення.

Результатом проведеного дослідження стала база даних, яка складається з оптимальних параметрів налаштування RISE-контролера для різного типу зовнішнього збурення. Таким чином, за наявності системи навігації вищого рівня, після визначення реальних умов зовнішнього збурення можна обирати необхідні параметри налаштування регулятора. Для прийняття рішення в даному випадку доцільне застосування засобів штучного інтелекту, штучної нейронної мережі в тому числі.

Головною задачею даної роботи було дослідити динаміку судна при кормовому, бічному і носовому зовнішньому впливу за умов максимально наближених до реальних. З цією метою в роботі застосовано метод комп'ютерного моделювання із застосуванням сучасного програмного забезпечення VeSim від компанії Sintef, Норвегія.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання; стабілізація курсу судна; RISE-контролер; нейронна мережа; зовнішні збурення.

## References

- [1] Li, P., Bai, W., Zhang, W., & Zhao, Y. (2024). ADP-based adaptive control of ship course tracking system with prescribed performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 09596518241286422. <https://doi.org/10.1177/09596518241286422>
- [2] Li, G., Wang, S., Zhang, X., Zhang, W., & Zhang, Z. (2025). Nonlinear Compound Function-Based Course-Keeping Control for Ships in Rough Seas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 534. <https://doi.org/10.3390/jmse13030534>
- [3] Menges, D., Tengesdal, T., & Rasheed, A. (2024). *Nonlinear Model Predictive Control for Enhanced Navigation of Autonomous Surface Vessels* (No. arXiv:2403.19028). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.19028>
- [4] Nguyen, V. S., Nguyen, Q. D., Le, T. S., & Dang, H. V. (2025). Fixed-time adaptive RBF neural network controller via minimum learning parameter for ship roll stabilization. *Applied Ocean Research*, 154, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104403>
- [5] Zhang, P., Xiao, F., Li, C., & Zhu, G. (2025). Event-Sampled Adaptive Neural Automatic Berthing Control for Underactuated Ships Under FDI Attacks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(9), 1636. <https://doi.org/10.3390/jmse13091636>
- [6] Zwierzewicz, Z., Dorobczyński, L., Sosnowski, M., & Jaszczak, S. (2022). Design of ship course-keeping system via adaptive control techniques. *Procedia Computer Science*, 207, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.149>
- [7] M, Z. S. (n.d.). Dysertatsiia: Zinchenko S. M. Teoretychni ta praktychni zasady avtomatyzatsii protseviv keruvannia rukhom suden na osnovi vidkrytykh modulnykh system. [Theoretical and practical principles of automation of vessel traffic control processes based on open modular systems] Akademichni Teksty Ukrainy. Retrieved November 18, 2025, from <https://uacademic.info/ua/document/0522U100028> [in Ukraine].

- [8] Zhang, Q., Ding, Z., & Zhang, M. (2020). Adaptive Self-Regulation PID Control of Course-Keeping for Ships. *Polish Maritime Research*, 27(1), 39–45. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0004>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] Karczewski, A., & Kozak, J. (2023). A Generative Approach to Hull Design for a Small Watercraft. *Polish Maritime Research*, 30(1), 4–12. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0001>
- [12] Świder, Z., Trybus, L., & Stec, A. (2023). Consistent Design of PID Controllers for an Autopilot. *Polish Maritime Research*, 30(1), 78–85. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0008>
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] VeSim (SINTEF). Otrymano z: sintef.no
- [16] Hrudinina, H. S. (2025). Suchasni zasoby kompiuternoho doslidzhennia dynamiky morskykh rukhomykh ob'ektiv v umovakh zovnishnoho zburennia [Modern computational approaches to the dynamics of marine mobile objects under external disturbances]. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi : KhVI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia : materialy. – Mykolaiv : NUK, S.1081–1085. [in Ukrainian]*.

**Постановка задачі.** Малорозмірні швидкісні судна характеризуються невеликою інерційністю і досить часто рухаються в умовах коли гідродинамічні та аеродинамічні сили порівнянні за величиною. Тому зовнішні збурення, в даному випадку, мають значний вплив на якість стабілізації курсу судна. Головні завдання які необхідно вирішити в даній роботі:

- визначити найбільш поширений для обраного типу судна стан моря та створити сценарії з імітаційного моделювання руху судна в умовах зовнішнього збурення;
- провести дослідження впливу зовнішнього збурення на якість роботи системи стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього збурення, шляхом комп'ютерного моделювання;
- визначити оптимальні налаштування параметрів коефіцієнтів RISE-контролера за різних умов зовнішнього збурення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Малорозмірні безекіпажні швидкісні судна нині активно розвиваються та застосовуються у широкому спектрі задач – від океанографічних і гідрографічних досліджень до екологічного моніторингу, пошу-

ково-рятувальних місій і оборонних операцій. Одним із ключових режимів їх роботи є морський перехід, де судно повинно точно утримувати курс або слідувати заданій траєкторії, незважаючи на вплив вітру й хвиль. У таких умовах зростає енергоспоживання та навантаження на рульовий привід, що підвищує вимоги до ефективності системи автоматичного керування. Тому дослідження та вдосконалення авторульового малорозмірного швидкісного безекіпажного судна є важливим завданням, оскільки його робота визначає якість керування судном у складних морських умовах.

Складні морські умови створюють труднощі для відстеження курсу безпілотного судна в морі. Для покращення здатності судна до відстеження курсу, у контролер руху судна авторами [1] додано зворотній зв'язок що підвищує точність визначених параметрів. Для досягнення оптимального керування системою відстеження курсу судна використовується технологія адаптивного керування ADP. Стійкість замкнутої системи досягається за допомогою теорії стійкості Ляпунова, де всі сигнали є рівномірно обмеженими в кінцевій мірі. Результати

моделювання підтверджують ефективність запропонованого методу.

Під час розробки контролера [2] запропоновано нелінійний підхід, який обмежує максимальний кут керма під час поворотів, знижує середній кут керма й частоту управляючих команд. Модель протестована на Norrbinn ship model, показала поліпшену стабільність у складних морських умовах. У статті [3] пропонується встановити контроль запобігання зіткненню, стабілізацію на траєкторії та запобігання посадці на міліну автономних суден з урахуванням впливу сил навколишнього середовища на основі нелінійного прогнозного керування моделями (NMPC). Штучні потенційні поля (APF) закладають основу для функції витрат оптимального керування. Залежно від ризику зіткнення, APF контролер оптимізує адаптований курс та швидкість руху, додатково слідуючи бажаним шляхом. В роботі NMPC використовується нелінійна динаміка судна, також, до системи NMPC підключено нелінійний спостерігач збурень, що дозволяє коригувати рух судна, спричинений зовнішніми силами. Автори роботи [4] фокусуються на стабілізації крену, їх робота демонструє застосування нейронних мереж (RBF) для адаптивного контролю руху судна, що корелює з іншими системами курсового контролю. В роботі [5] запропоновано адаптивний нейронний спостерігач та контрольний алгоритм з event-sampling для запобігання атакам на дані курсу (FDI – false data injection). дана система є релевантною для системи стабілізації курсу, особливо з точки зору стійкості та кібербезпеки. У статті [6] пропонується просторово-часова архітектура рекурентної нейронної мережі для глибоких мереж, які можна використовувати для керування автономним судном. Проект мережі дозволяє обробляти довільну кількість навколишніх цільових суден, забезпечуючи при цьому стійкість роботи системи. Крім того, пропонується сучасна метрика ризику зіткнення, щоб агент міг легше оцінювати різні ситуації. Актуальність питання розробки систем керування рухом судна в реальних умовах вітро-хвильового впливу, відображена в роботі [7]. Дана робота описує загальні

підходи до модульної системи управління рухом суден, можливості реалізації авторульових та адаптивних стратегій. У статті розглядається проблема проектування суднового автопілоту на основі методу лінеаризації вхідно-вихідного зворотного зв'язку в поєднанні з адаптивними методами керування [8]. 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 [9]. 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 [10]. На прикладі корпусу вітрильної яхти автори роботи [11] представляють концепцію нового підходу до проблем проектування малих суден з використанням паралельного проектування з процесами багатокритеріальної оптимізації. Вони відзначають підвищення ефективності роботи проектування за рахунок використання широкодоступного програмного забезпечення. Для боротьби з надмірним керуванням викликаним зовнішнім збуренням, (вітром або течією) автори роботи [12] пропонують застосування каскадної структури регулятора з двома ПД регуляторами.

**Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** 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 дослідження.** Метою даної роботи є оптимізація налаштування параметрів системи стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього вітро-хвильового впливу.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.** Теорія автоматичного керування, зокрема методи побудови RISE-контролера, 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.** Під час розробки системи автоматичного керування курсом автономного безекіпажного судна найбільшою проблемою є питання визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора стабілізації курсу за умови невизначеності зовнішнього збурення. Критеріями оптимальності в даному випадку виступають: перерегулювання, точність керування та кількість перекладок керма. Очевидним є і той факт, що зовнішні умови, до яких належать: вітер, хвилі і течії, значно впливають на якість керування судном. Об'єктом дослідження в даній роботі є регулятор стабілізації курсу малорозмірного безекіпажного судна, такі судна мають невелику інерційність, велику площу надводної частини і часто рухаються у режимах, де гідродинамічні та аеродинамічні сили порівнянні за величиною. Тому, можна стверджувати, що зовнішнє збурення буде мати значний вплив на якість керування судном. В такому випадку актуальною залишається задача визначення параметрів налаштування регулятора стабілізації курсу в умовах невизначеності зовнішнього збурення.

Отже, під час розробки системи стабілізації курсу судна необхідно дослідити

вплив зовнішнього збурення на якість регулювання та визначити найкращі параметри налаштування регулятора для кожного типу зовнішнього збурення. З цією метою проведемо комп'ютерне моделювання руху судна за різних сценаріїв вітро-хвильового впливу.

Для створення сценарію зовнішнього збурення скористаємось інженерною класифікацією, що використовується для визначення меж безпечної експлуатації суден, морських платформ і робототехнічних систем.

Операційні морські стани (Operational Sea States) – це інженерна класифікація умов морського середовища, яка використовується для оцінювання можливості, безпеки та ефективності експлуатації суден, морських платформ і морських робототехнічних засобів за різного рівня хвилювання та зовнішніх збурень. На відміну від метеорологічних шкал, операційні морські стани орієнтовані не на опис погоди, а на функціональну придатність системи до виконання заданих завдань.

В інженерній практиці операційні морські стани поділяють на кілька режимів: номінальний (повна функціональність системи), обмежений (зниження точності або швидкості виконання завдань), критичний (допускається лише стабілізація та утримання положення) і неприпустимий (експлуатація заборонена). Такий поділ широко застосовується під час проектування систем автоматичного керування, формування алгоритмів перемикання режимів, адаптації параметрів регуляторів та планування місій автономних морських апаратів.

В роботі показано фрагмент дослідження якості роботи регулятора стабілізації курсу судна, який відповідає обмеженому режиму руху за станом моря, табл. 1.

В таблиці 2 представлено параметри зовнішнього збурення за якими проводилось дослідження якості роботи регулятора, методом комп'ютерного експерименту.

Для проведення експериментального дослідження було використано програмно-моделюючий комплекс VeSim від компанії Sentif, Норвегія [15, 16].

В таблиці 3 представлено параметри судна, динаміка якого було використано при моделюванні.

На рисунку 1 зображено створення гідродинамічної моделі судна засобами програми VeSim.

У якості регулятора стабілізації курсу судна застосовано RISE-контролер.

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 моде-

лі 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 [13, 14].

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

**Таблиця 1.** Параметри обмеженого режиму руху за характеристикою «Операційні стани моря»

| Тип збурення            | Параметр                       | Типовий діапазон       | Примітка (вплив на керування)                                                   |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Вітер                   | Швидкість вітру, м/с           | 8–14                   | Відповідає 5–6 балам за шкалою Бофорта; зростання аеродинамічних сил і моментів |
|                         | Напрямок вітру                 | Зустрічний / бічний    | Бічний вітер суттєво погіршує курсову стійкість                                 |
| Хвилювання моря         | Значуща висота хвилі $H_s$ , м | 1.5–3.0                | Douglas 4–5; зростання коливань по крену та диференту                           |
|                         | Піковий період хвиль $T_p$ , с | 5–9                    | Можливе наближення до резонансних частот об'єкта                                |
|                         | Напрямок хвиль                 | Зустрічний / бічний    | Бічне хвилювання ускладнює стабілізацію курсу                                   |
| Морські течії           | Швидкість течії, м/с           | 0.5–1.5                | Систематичне збурення траєкторії руху                                           |
|                         | Напрямок течії                 | Довільний              | Бічна течія спричиняє сталу похибку позиціонування                              |
| Експлуатаційні наслідки | Швидкість руху                 | Обмежена               | Зниження для забезпечення стійкості                                             |
|                         | Точність керування             | Знижена                | Підвищені похибки стабілізації                                                  |
|                         | Режим САК                      | Робастний / адаптивний | Консервативні закони керування з підвищеним запасом стійкості                   |

**Таблиця 2.** Параметри зовнішнього збурення

| № експ. | Вітер          |                 | Хвилювання |                 |                   | Течія          |                 |
|---------|----------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|
|         | швидкість, м/с | напрямок, град. | висота, м  | напрямок, град. | піковий період, с | швидкість, м/с | напрямок, град. |
| 1       | 10             | 0               | 1          | 0               | 7                 | 0.5            | 10              |
| 2       | 10             | 90              | 1          | 0               | 7                 | 0.5            | 10              |
| 3       | 10             | 180             | 1          | 0               | 7                 | 0.5            | 10              |
| 4       | 10             | 0               | 1          | 90              | 7                 | 0.5            | 10              |
| 5       | 10             | 90              | 1          | 90              | 7                 | 0.5            | 10              |
| 6       | 10             | 180             | 1          | 90              | 7                 | 0.5            | 10              |
| 7       | 10             | 180             | 1          | 180             | 7                 | 0.5            | 10              |
| 8       | 10             | 0               | 1          | 180             | 7                 | 0.5            | 10              |
| 9       | 10             | 90              | 1          | 180             | 7                 | 0.5            | 10              |

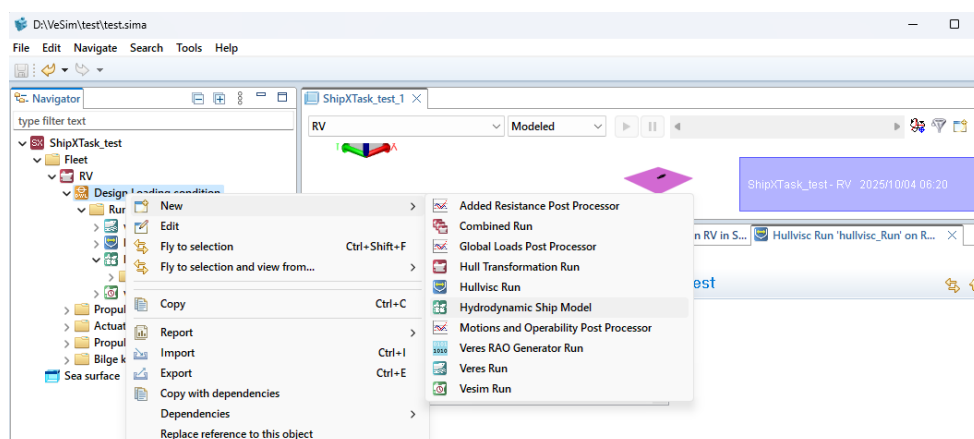


**Рис. 1.** Створення гідродинамічної моделі судна в програмі VeSim

Таблиця 3. Параметри судна

| Параметри судна, що моделюються: | швидкісний катер |
|----------------------------------|------------------|
| водотонажність, т.               | 34.3             |
| потужність двигунів, кВт.        | 2х710            |
| швидкість, вуз.                  | 35               |
| довжина, м.                      | 19.8             |
| ширина, м.                       | 4.6              |
| осадка носа (draft forward)      | 1.0              |
| осадка корми (draft after)       | 1.1              |

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

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

В симуляції використовувалась модель малорозмірного судна, довжина – 19.8 м, ширина – 4.6 м, швидкість руху – 12 вуз., курс – 0 градусів.

На рисунках 2, 3, 4 представлено результати моделювання руху судна, які відповідають розробленим умовам зовнішнього збурення, експеримент 1, 5 та 9 відповідно, див. табл. 2.

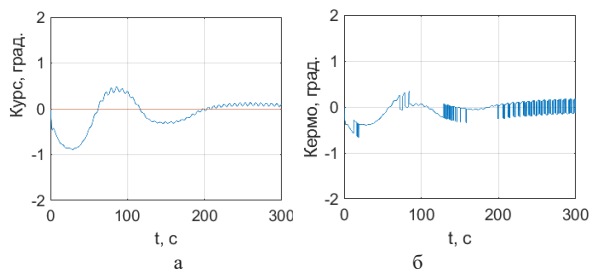


Рис. 2. Результат моделювання роботи регулятора в умовах експерименту №1: а – курс судна; б – кут перекадки керма

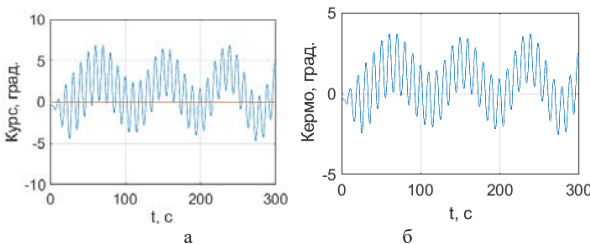


Рис. 3. Результат моделювання роботи регулятора в умовах експерименту №5: а – курс судна; б – кут перекадки керма

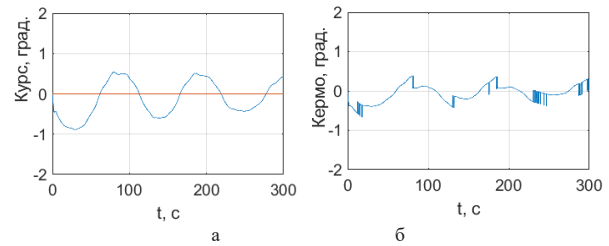


Рис. 4. Результат моделювання роботи регулятора в умовах експерименту № 9: а – курс судна; б – кут перекадки керма

В таблиці 4 представлено результат аналізу якості системи стабілізації курсу судна, що рухається в умовах зовнішнього збурення.

Як видно з таблиці, за даних умов моделювання, бічне хвилювання дає найгірший результат. Однак, косо-попутне хвилювання є одним із найнебезпечніших режимів руху для малорозмірного швидкісного катера, оскільки за таких умов різко зростає ймовірність втрати курсової стійкості та керованості. Нерівномірний хвильовий тиск уздовж корпусу створює значний збурюючий момент по курсу, що може перевищувати можливості системи керування і призвести до раптового розвороту судна бортом до хвилі (ефект Брочеллі). Дане явище може призвести до появи небезпечного крену та втрати остійності.

Налаштовані, шляхом комп'ютерного моделювання значення коефіцієнтів RISE-контролера надають задовільну якість стабілізації курсу для заданих зовнішніх умов (див. табл. 4, мат. очікування, дисперсія).

#### Обговорення отриманих результатів.

З результатів моделювання видно, що RISE-регулятор виконує свою задачу і керує судном так, що б звести помилку керування до нуля. Однак, також видно, що під час дії збурення, регулятор виконує безперервне коригування. Таке регулювання призводить до швидкого зносу рушійної системи і значно

Таблиця 4. Аналіз якості роботи RISE-контролера

| Тип регулятора | Вітер     |              | Хвилювання     |              | Течія     |              | Кіль-ть перекидок керма (за 100 с модел.) | Математичне очікування | Дисперсія |
|----------------|-----------|--------------|----------------|--------------|-----------|--------------|-------------------------------------------|------------------------|-----------|
|                | шв., м/с. | напр., град. | висота хв., м. | напр., град. | шв., м/с. | напр., град. |                                           |                        |           |
| RISE           | 10        | 0            | 1              | 0            | 0,5       | 10           | 45                                        | 0,3                    | 2,1       |
|                | 10        | 90           | 1              | 90           | 0,5       | 10           | 70                                        | 0,6                    | 3,2       |
|                | 10        | 90           | 1              | 180          | 0,5       | 10           | 64                                        | 0,4                    | 1,2       |

скорочує тривалість виконуваної місії через надмірну витрату енергії.

В даному випадку доцільно застосовувати обмеження за кутом відхилення судна від курсу, що допоможе скоротити кількість перекладок керма.

В результаті проведеного комп'ютерного експерименту було отримано базу даних, яка складається з коефіцієнтів налаштування регулятора для кожного з напрямків зовнішнього збурення (див. табл. 2). Отримана база даних буде використана для навчання нейронної мережі. Передбачається, що дана нейромережа буде отримувати від навігаційної системи вищого рівня дані про зовнішній вплив та режим руху і обирати найбільш доцільні коефіцієнти налаштування RISE-контролера і кутові обмеження.

**Висновки.** В роботі було визначено найбільш поширений для застосування мало-розмірного судна стан моря та створено сценарії з імітаційного моделювання руху судна в умовах зовнішнього збурення;

Проведено дослідження впливу зовнішнього збурення на якість роботи системи стабілізації курсу судна в умовах зовніш-

нього збурення, шляхом комп'ютерного моделювання.

Визначено оптимальні налаштування параметрів коефіцієнтів RISE-контролера за різних умов зовнішнього збурення.

Отримана база даних буде використана для навчання нейронної мережі. Передбачається, що дана нейромережа буде отримувати від навігаційної системи вищого рівня дані про зовнішній вплив та режим руху і обирати найбільш доцільні коефіцієнти налаштування RISE-контролера і кутові обмеження.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні теоретичних засад побудови адаптивно-інтелектуальних систем автоматичного керування, здатних до самоналаштування, реконфігурації та оптимізації в реальному часі на основі аналізу стану об'єкта та зовнішнього середовища.

Практичну цінність становить можливість попереднього тестування регуляторів із використанням комп'ютерного моделювання для підвищення ефективності систем керування рухом морських рухомих об'єктів.

### Список літератури

- [1] Li, P., Bai, W., Zhang, W., & Zhao, Y. (2024). ADP-based adaptive control of ship course tracking system with prescribed performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 09596518241286422. <https://doi.org/10.1177/09596518241286422>
- [2] Li, G., Wang, S., Zhang, X., Zhang, W., & Zhang, Z. (2025). Nonlinear Compound Function-Based Course-Keeping Control for Ships in Rough Seas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 534. <https://doi.org/10.3390/jmse13030534>
- [3] Menges, D., Tengesdal, T., & Rasheed, A. (2024). *Nonlinear Model Predictive Control for Enhanced Navigation of Autonomous Surface Vessels* (No. arXiv:2403.19028). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.19028>
- [4] Nguyen, V. S., Nguyen, Q. D., Le, T. S., & Dang, H. V. (2025). Fixed-time adaptive RBF neural network controller via minimum learning parameter for ship roll stabilization. *Applied Ocean Research*, 154, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104403>
- [5] Zhang, P., Xiao, F., Li, C., & Zhu, G. (2025). Event-Sampled Adaptive Neural Automatic Berthing Control for Underactuated Ships Under FDI Attacks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(9), 1636. <https://doi.org/10.3390/jmse13091636>
- [6] Zwierzewicz, Z., Dorobczyński, L., Sosnowski, M., & Jaszczak, S. (2022). Design of ship course-keeping system via adaptive control techniques. *Procedia Computer Science*, 207, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.149>
- [7] М, З. С. (n.d.). Дисертація: Зінченко С. М. Теоретичні та практичні засади автоматизації процесів керування рухом суден на основі відкритих модульних систем. [Theoretical and practical principles of automation of vessel traffic control processes based on open modular systems] Академічні Тексти України. Retrieved November 18, 2025, from <https://uacademic.info/ua/document/0522U100028>

- [8] Zhang, Q., Ding, Z., & Zhang, M. (2020). Adaptive Self-Regulation PID Control of Course-Keeping for Ships. *Polish Maritime Research*, 27(1), 39–45. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0004>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] Karczewski, A., & Kozak, J. (2023). A Generative Approach to Hull Design for a Small Watercraft. *Polish Maritime Research*, 30(1), 4–12. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0001>
- [12] Świder, Z., Trybus, L., & Stec, A. (2023). Consistent Design of PID Controllers for an Autopilot. *Polish Maritime Research*, 30(1), 78–85. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0008>
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] VeSim (SINTEF). URL: [sintef.no](http://sintef.no)
- [16] Грудініна, Г. С. (2025). 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, С.1081–1085.

---

© Грудініна Г. С.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0