



**Hanna
S. Hrudinina**
Грудініна Ганна
Сергіївна

УДК 681.5

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR OPTIMIZATION OF AUTOSTEER ADJUSTMENT PARAMETERS

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ АВТОРУЛЬОВОГО

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.2\(19\).05](https://doi.org/10.15589/smi2024.2(19).05)**Hanna S. Hrudinina**

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



**Andriy
P. Burunin**
Бурунін Андрій
Павлович

Andriy P. Burunin

Бурунін Андрій Павлович,
аспірант
splashbox98@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1017-9766

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв*

Abstract. The purpose of the work is to improve the tool for assessing the quality of the automatic control system of an unmanned high-speed vessel under conditions of external influence. The method of experimental modeling and comparative analysis of the results is used in the work. By means of mathematical modeling, four experiments were conducted, in which the proportional-integral-differential (PID) controller, proportional-differential (PD) controller and fuzzy controller were used alternately to control the ship's rudder translation. Two small speedboats were used in the experiments. The simulation took place under the established conditions of wind and wave influence. The obtained results were evaluated by the time of the transition process, the number of rudder shifts and steering accuracy when keeping the vessel on a given course under conditions of external influence. The results of the control quality with the applied settings were entered into the table, which facilitated the qualitative analysis of the obtained results. For visual analysis, graphs depicting the course of the vessel and the angle of the rudder were constructed using Matlab. By means of mathematical modeling, an assessment of the quality of the performance of the autopilot when keeping an unmanned high-speed vessel on a given course under conditions of external influence was carried out. To process the simulation results, an application for qualitative assessment of the regulator's work has been developed. A method of optimizing the operation of the automatic control system of a small vessel is proposed. The paper proposes a method of auto-steering adjustment by studying the influence of external disturbances on the adjustment parameters of various types of regulators with the use of mathematical modeling. Wind and wave conditions worsen the automation of ship navigation and course planning, which leads to a deviation from the given route and a decrease in control efficiency. A ship's autopilot can maintain a course, but cannot choose the optimal path in real time. The application of the developed application in combination with mathematical modeling of the ship's movement dynamics provides an opportunity to optimize the operation of the autopilot based on the quantitative assessment of the necessary optimization parameter.

Key words: proportional-integral-differential regulator; auto-steering; mathematical modeling; unmanned autonomous vessel.

Анотація. Метою роботи є удосконалення засобу оцінки якості роботи системи автоматичного керування безкіпажним швидкісним судном в умовах зовнішнього впливу. В роботі застосовано методику експериментального моделювання та порівняльний аналіз результатів. Шляхом математичного моделювання проведено чотири експерименти в яких, для керування перекладкою керма судна, було застосовано по черзі пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор, пропорційно-диференційний (ПД) регулятор та нечіткий регулятор. В експериментах використано два малорозмірних швидкісних катера. Моделювання проходило за встановлених умов вітро-хвильового впливу. Отримані результати оцінювались за часом перехідного процесу, кількістю перекладок керма та точністю керування при утриманні судна на заданому курсі за умов зовнішнього впливу. Результати якості керування із застосованими налаштуваннями вносились до таблиці, що полегшило якісний аналіз отриманих результатів. Для візуального аналізу, засобами Matlab, побудовано графіки із зображенням курсу судна та кута перекладки керма. Шляхом математичного моделювання проведено оцінку якості роботи авторульового, при утриманні на заданому курсі безкіпажного швидкісного судна в умовах зовнішнього впливу. Для обробки результатів моделювання розроблено додаток якісної оцінки роботи регулятора. Запропоновано метод оптимізації роботи системи автоматичного керування малорозмірним судном. В роботі запропоновано метод налаштування авторульового, шляхом дослідження впливу зовнішнього збурення на параметри налаштування регуляторів різних типів, зі застосуванням математичного моделювання. Вітро-хвильові умови погіршують автоматизацію судової навігації та планування курсу, що призводить до відхилення від заданого маршруту і зниження ефективності управління. Судновий автопілот може підтримувати курс, але не може вибрати оптимальний шлях у реальному часі. Застосування розробленого додатку, у поєднанні з математичним моделюванням динаміки руху судна, надає можливість оптимізувати роботу авторульового за кількісною оцінкою необхідного параметру оптимізації.

Ключові слова: ПІД-регулятор; авторульовий; математичне моделювання; безкіпажне автономне судно.

References

- [1] Sharma, T., Bedi, J., Anand, A., & Aggarwal, A. (2024). Wave Height Prediction in Maritime Transportation Using Decomposition Based Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(5), 4304–4313. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3322192>
- [2] Roberts, G. N. (2008). Trends in marine control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.08.002>
- [3] Das, S., & Talole, S. E. (2016). Robust Steering Autopilot Design for Marine Surface Vessels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(4), 913–922. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2518256>
- [4] Alessandri, A., Donnarumma, S., Vignolo, S., Figari, M., Martelli, M., & Sebastiani, R. C. & L. (2015). System control design of autopilot and speed pilot for a patrol vessel by using LMIs: A. Alessandri, S. Donnarumma & S. Vignolo M. Figari & M. Martelli. B *Towards Green Marine Technology and Transport*. CRC Press.
- [5] Fruzzetti, C., Donnarumma, S., & Martelli, M. (2023). *Smart Pilot Controller for Marine Vessels: Formal Design, Modeling and Simulations* (SSRN Scholarly Paper 4634809). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4634809>
- [6] Rigatos, G., & Tzafestas, S. (2006). «Adaptive fuzzy control for the ship steering problem», *Mechatronics*, vol. 16, no. 8, pp. 479–489, Oct.
- [7] Li, P., Liu, D., & Baldi, S. (2024). Boundary-Layer Control With Unstructured Uncertainties With Application to Adaptive Autopilots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 32(3), 1057–1065. <https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3329908>
- [8] Yang, Z., Huang, J., Yin, H., Yang, D., & Zhong, Z. (2022). «Path tracking control for underactuated vehicles with matched-mismatched uncertainties: An uncertainty decomposition based constraint-following approach», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 8, pp. 12894–12907, Aug.
- [9] Roy, S., Baldi, S., Li, P., & Sankaranarayanan, V. N. (2021). «Artificial-delay adaptive control for under-actuated Euler–Lagrange robotics», *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 26, no. 6, pp. 3064–3075, Dec.

- [10] Safonov, M. G. (2018). «Robust control: Fooled by assumptions», *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 28, no. 12, pp. 3667-3677, Aug.
- [11] Dave, D. P., & Ghatol, Dr. A. A. (2022). *Modeling and Simulation of Marine Control Systems*. <https://imare.in/wp-content/uploads/2022/09/paper-no6b-1-mr-dp-dave.pdf>
- [12] Degorre, L., Delaleau, E., & Chocron, O. (2023). A Survey on Model-Based Control and Guidance Principles for Autonomous Marine Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 430. <https://doi.org/10.3390/jmse11020430>
- [13] Bolbot, V., Sandru, A., Saarniniemi, T., Puolakka, O., Kujala, P., & Valdez Banda, O. A. (2023). Small Unmanned Surface Vessels – A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2387. <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>
- [14] Arfianto, A. Z., Rahmat, M. B., Dhiyavia, F., Santoso, T. B., Gunantara, N., Supriyanto, E., & Ardhan, V. Y. P. (2020). Autopilot Unmanned Smart Boat Vehicle (AUSV) Communication with LoRa RFM95. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 4(4), 219–224. <https://doi.org/10.30630/joiv.4.4.492>
- [15] Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., Kalinichenko, Y., Rossomakha, O., Naleva, G., & Rossomakha, O. (2022). Autonomous ships concept and mathematical models application in their steering process control.
- [16] Kupraty, O. (2021). Mathematical modeling of the trajectory of a ship as a control object in local planning. *MATEC Web of Conferences*, 339, 01015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133901015>
- [17] Nahovskyi, D. A., & Doshchenko, H. H. (2023). Matematychna model sposterihacha dlia systemy upravlinnia utrymanniam polozhennia sudna [Mathematical model of the monitor for the ship's position control system]. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 5(1), 58–63. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-1-7> [in Ukrainian].
- [18] Fan, V. (2003). Sovershenstvovanye systemi upravleniya dvizheniem malomernogo sudna pry stablyzatsyy na traektorii [Improving the control system for the movement of a small vessel during trajectory stabilization]. UDMTU. [in Ukrainian].
- [19] Popovych, M. H., & Kovalchuk, O. V. (2007). Teoriia avtomatychnoho keruvannia [Theory of automatic control]. K.: Lybid, 2007, 656 s. [in Ukrainian].
- [20] Daki, O. A., Ivanenko, V. M., Fedunov, V. M., & Cheban, V. I. (2021). Pobudova nechitkoho rehu-liatora stabilizatsii sudna na traektorii [Construction of a fuzzy controller for vessel stabilization on a trajectory]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, 3(69), 126–133. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.16> [in Ukrainian].

Постановка задачі. Розвиток засобів інтелектуального керування роботизованими пристроями, в тому числі і безекіпажними суднами, вплинув на збільшення кількості безпілотних автоматично керованих апаратів. У випадку з швидкісними малорозмірними суднами, значного розвитку зазнали системи орієнтації, навігації та керування рухом судна. Актуальним є завдання траєкторного стабілізованого руху в умовах зовнішнього впливу.

При розробці систем автоматичного керування (САК) рухом судна використовують методи комплексування даних та інтеграції навігаційних систем. Сучасні САК, як правило, складаються з декількох регуляторів

різних за структурою та функціональним призначенням. Тому, для оцінки якості роботи регуляторів, зручно використовувати засоби математичного моделювання. Для оптимізації роботи розробленої САК актуальним є використання математичного моделювання з різними сценаріями зовнішнього впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Океанічні умови погіршують автоматизацію суднової навігації та планування курсу, що призводить до відхилення від заданого маршруту і зниження ефективності управління. Автопілот на кораблях може підтримувати курс, але не може вибрати оптимальний шлях у реальному часі. Ви-

сота хвиль є однією з основних причин не-ефективності таких систем. Сучасні методи керування включають використання машинного навчання для оцінки висоти хвиль, але вони мають обмеження, такі як проблеми з обробкою різких коливань, низька здатність до узагальнення і чутливість до шуму [1, 2]. Морське судно постійно перебуває під постійним впливом невизначеного збурення, що ускладнює завдання розробки ефективного авторульового [3].

Функції автоматичного керування навігацією судна часто включають комбіноване керування курсом і швидкістю. Оскільки два рухи судна, якими потрібно керувати, впливають один на одного, пропонується синтез автопілота та круїз-контролю для морського автономного судна. Два ПД-регулятора взаємодіють для досягнення однієї мети керування. Параметри регуляторів визначаються за допомогою матриць лінійної та білінійної нерівності, що гарантує системі стабільність без перерегулювання. [4, 5]. Найсучасніші автопілоти використовують єдину архітектуру управління, яка може керувати різними типами безпілотних транспортних засобів, будь то літаки, автомобілі або кораблі [6]. Автори [7] акцентують увагу на тому, як такі системи можуть справлятися з невизначеністю, викликану як зовнішніми факторами, так і різними конструкціями транспортних засобів [8, 9, 10]. Передовим напрямком у галузі сучасного суднобудування стало математичне моделювання, як систем керування так і судових процесів [11].

Для керування автономними надводними апаратами розроблено велику кількість методів керування та принципів наведення. Математичні моделі використовуються у нелінійних методах управління, у лінеаризуючих контролерах, контролерах ковзного режиму [12].

Автономні судна обіцяють багато переваг, але їх впровадження обмежене через проблеми з безпекою, особливо на великих судах. Тестування таких технологій може бути дорогим, тому дешевшим варіантом є застосування математичного моделювання. В роботі [13] представлено аналіз сучас-

них моделей малих автономних суден, що використовуються в морських дослідженнях на практиці. Розробка прототипів автопілотів використовується для тестування нових алгоритмів керування та надійності інших електронних компонентів, таких як датчики та мікропроцесори [14].

Забезпечення надійного і безпечного функціонування безкіпажних суден в автономному режимі вимагає розробки моделей і методів забезпечення їх безаварійної навігації, як щодо процесу розходження суден, так і вдосконалення систем автоматичного керування рухом і курсовою стійкістю [15].

У статті [16] пропонується декомпозиція глобального завдання планування в локальне планування. Для побудови траєкторії руху судна при місцевому плануванні запропоновано комбінувати сегментний метод і секторний метод поділу кола. Запропонована в статті матриця перемикавання режимів роботи МЕ працює як фільтр режимів роботи і повністю залежить від показань датчиків. Траєкторія руху судна будується за допомогою розрахунків в MS Excel і графічного моделювання в середовищі Matlab.

Моделі оцінки сучасних систем управління судном використовують узагальнену математичну модель, яка змінюється в залежності від впливу різних факторів. Ці системи, включаючи автоматизовані комплекси для управління судном і його енергетичними установками, мають високу складність і призначені для ефективної роботи в конкретних умовах. Високоточні системи позиціонування застосовують замкнуті системи управління з ПД-регуляторами. Математична модель судна, що складається з нелінійних диференціальних рівнянь, вирішується чисельними методами для практичних задач [17].

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішеною і досить актуальною на даний час є проблема оптимізації роботи авторульового для безкіпажних суден за умов невизначеності параметрів вітро-хвильового впливу.

Мета дослідження. Метою роботи є удосконалення засобу оцінки якості роботи системи автоматичного керування (САК)

безекіпажним швидкісним судном в умовах зовнішнього впливу.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. В роботі використано метод математичного моделювання динаміки руху малорозмірного швидкісного судна. При розробці додатку з оцінки параметрів регулятора застосовано мову програмування в середовищі Matlab та C++. Для надання кількісної оцінки якості роботи регуляторів застосовано методи теорії ймовірності.

Об'єктом дослідження є авторульовий пристрій швидкісного безекіпажного судна.

Предметом дослідження є параметри налаштування регуляторів за умов вітровохвильового впливу на динаміку судна.

Основний матеріал. Проведемо оцінку якості роботи авторульового при утриманні

на заданому курсі малорозмірного швидкісного судна за умов зовнішнього впливу.

Для виконання даної задачі, у якості регулятора керування перекладкою керма судна, використаємо по черзі ПІД регулятор, ПД регулятор та регулятор з нечіткою логікою, рис. 1 [18]. Моделювання динаміки судна за умов зовнішнього впливу проведено засобами програмного комплексу Cotmacs AP Lab, рис. 2. Для обробки результатів моделювання, в середовищі програмування Matlab, розроблено додаток якісної оцінки роботи регулятора. В моделюванні використовуються моделі двох малорозмірних суден, табл. 1.

Проведемо моделювання руху судна з виходом на заданий курс та утриманням на курсі:

Таблиця 1. Параметри суден

Параметри суден, що моделюється:	High speed boat 1	High speed boat 2
тип	швидкісне малорозмірне судно	швидкісне малорозмірне судно
водотонажність, т.	14.5	34.3
потужність двигунів, кВт.	2x800	2x710
швидкість, вуз.	37	35
довжина, м.	15	19.8
ширина, м.	3.7	4.6
осадка носа (draft forward)	0,45	1.0
осадка корми (draft after)	0,7	1.1
дві водоструйні машини	+	+

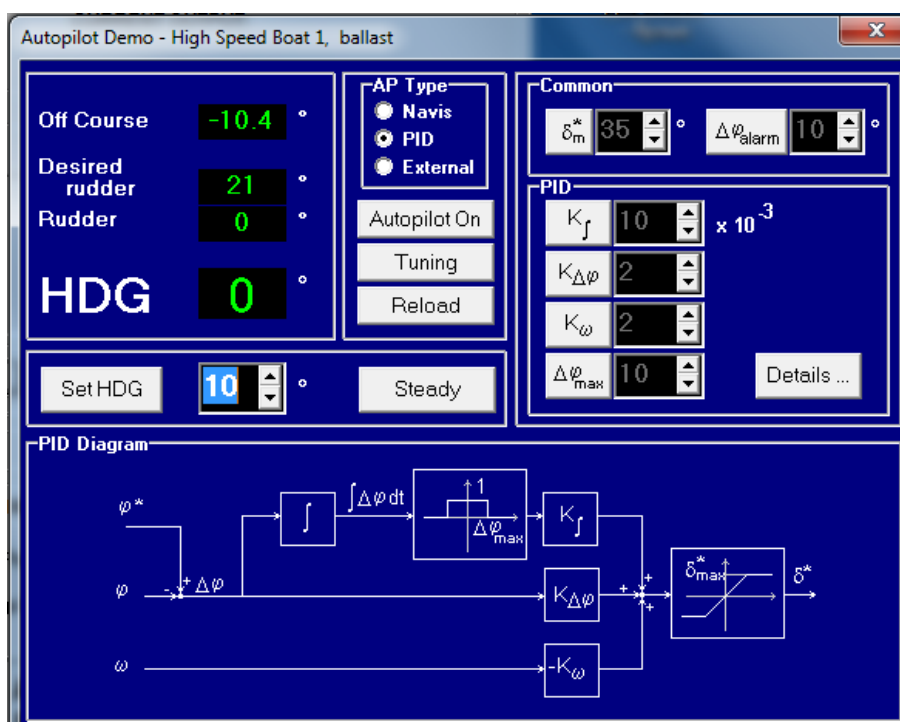


Рис. 1. Параметри та структурна схема ПІД-регулятора

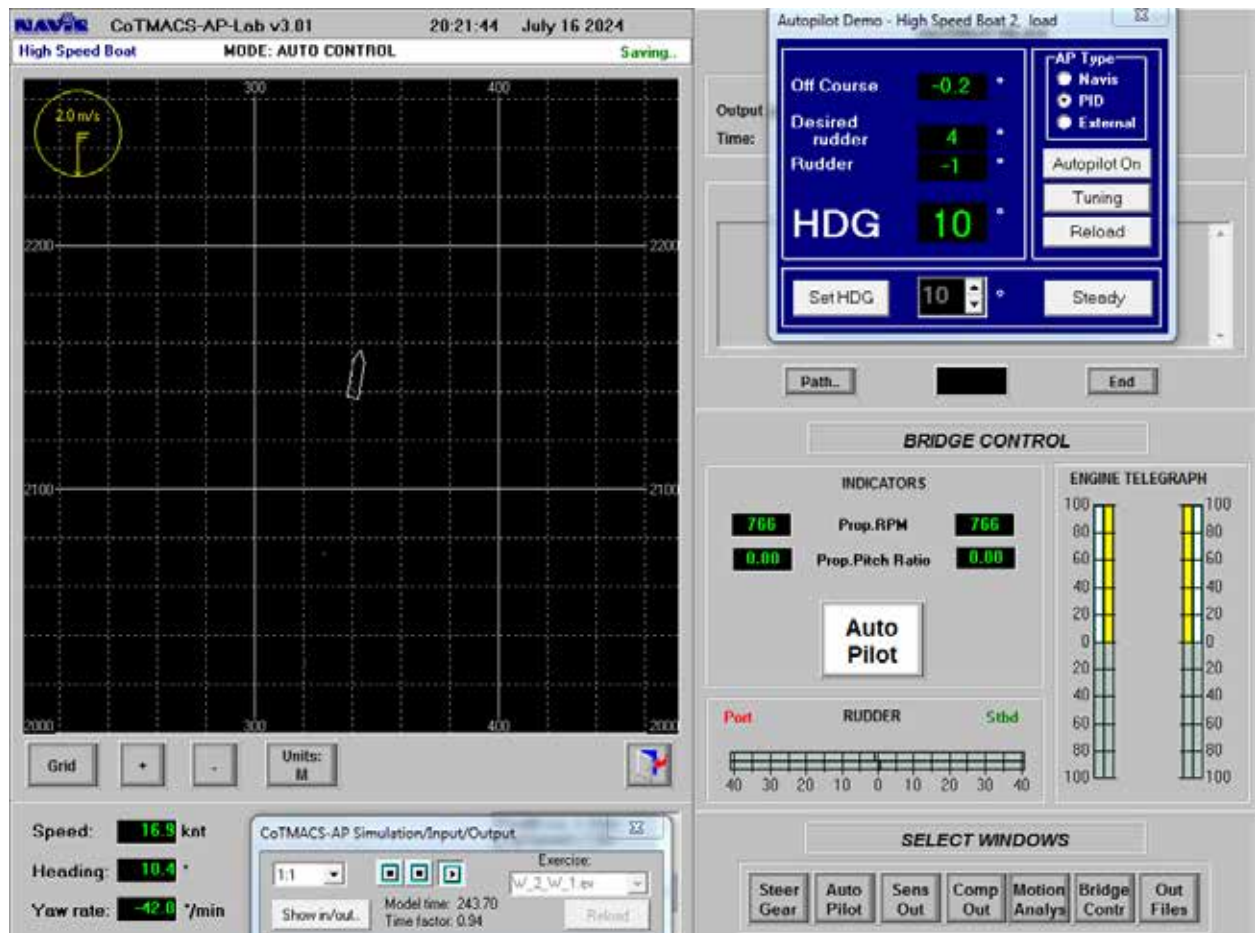


Рис. 2. Моделювання динаміки руху судна в умовах зовнішнього впливу

- швидкість судна – 17 вуз, (10 м/с);
- курс – 10° ;
- налаштування ПД-регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_\omega = 2$.

По завершенню моделювання програма формує базу даних у вигляді векторної залежності обраних параметрів руху, таких як: швидкість, курс, кутова швидкість, реальна перекладка керма, бажана перекладка керма (сигнал керування від авторульового).

Дана форма представлення результату є дуже зручною для подальшого аналізу якості роботи регуляторів.

Засобами програмування Matlab розроблено додаток, який обробляє та аналізує данні отриманні шляхом моделювання, і надає кількісну оцінку, щодо налаштування авторульового, а саме: тривалість перехідного процесу в секундах, кількість перекладок керма до виходу на заданий курс в одиницях, кількість перекладок керма за хвилину руху при утриманні на заданому

курсі, математичне очікування курсу при утриманні судна на заданому курсі та дисперсію.

Дана інформація надається розробнику у вигляді текстового повідомлення і може зберігатись для подальшого порівняння.

Після обробки даних у додатку отримаємо наступний результат, рис. 3.

Експ. № 1) Моделювання руху мало-розмірного швидкісного судна «High speed boat1» з використанням, в якості регулятора керування перекладкою керма, ПД регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_\omega = 2$; ПД регулятора: $K_i = 0$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_\omega = 2$ та регулятора з нечіткою логікою.

Кількісну оцінку якості роботи регуляторів судна «High speed boat 1» представлено у таблиці 2.

Експ. № 2) Моделювання руху судна «High speed boat 2» з використанням, в якості регулятора керування перекладкою керма, ПД регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_\omega = 2$; ПД

```
10d_W2_W1_10ms_b1_PID.txt – Блокнот
Файл  Изменить  Просмотр

Показники якості роботи автрульового за наступних умов моделювання:
Швидкість вітру - 2.00 м/с; Напрямок вітру - 0.00 град.
Швидкість течії - 0.00 м/с; Напрямок течії - 0.00 град.
Висота хвилі - 1.00 м; Напрямок хвиль - 45.00 град.
Тип судна - швидкісний катер 1;
Тип авторульового - ПІД регулятор;
Параметри налаштування регулятора:
    Ki = 0.001;
    Kdf = 2.00;
    Kw = 2.00;
Швидкість руху судна - 19.70 м/с;
Заданий курс - 10.00 град.;
Тривалість перехідного процесу - 35.00 с;
Кількість переключень керма перехідного процесу - 27.00 од;
Кількість переключень керма при утримці на курсі (за хвилину моделювання) - 18.00 од;
Математичне очікування при утримці на курсі - 8.8093 град;
Дисперсія при утримці на курсі - 0.2315 град;

Строка 17, столбец 41    100%    Unix (LF)    ANSI
```

Рис. 3. Кількісна оцінка якості роботи ПІД-регулятора

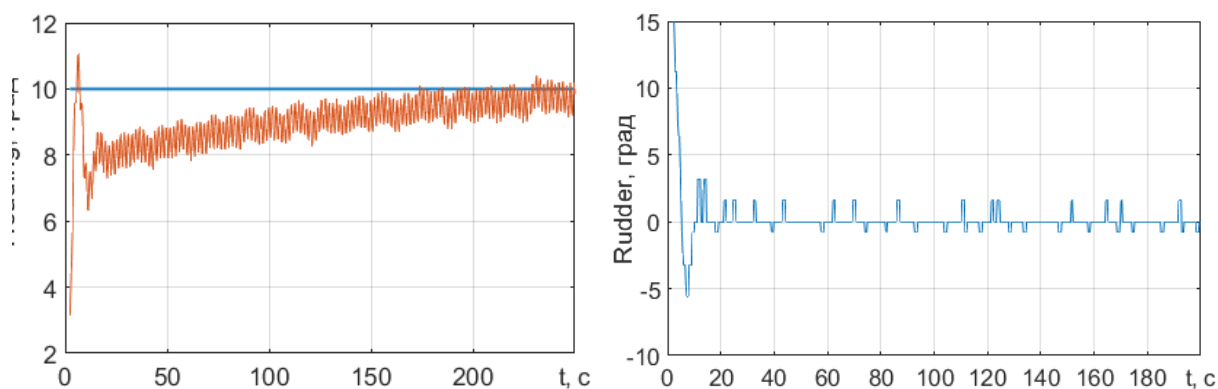


Рис. 4. Курс і переключення керма ПІД регулятора «High speed boat1»

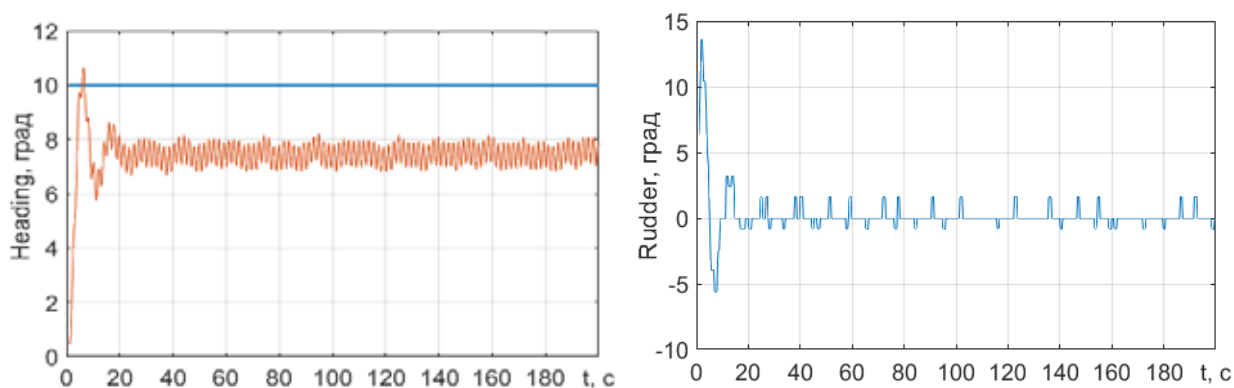


Рис. 5. Курс та переключення керма ПІД-регулятора «High speed boat1»

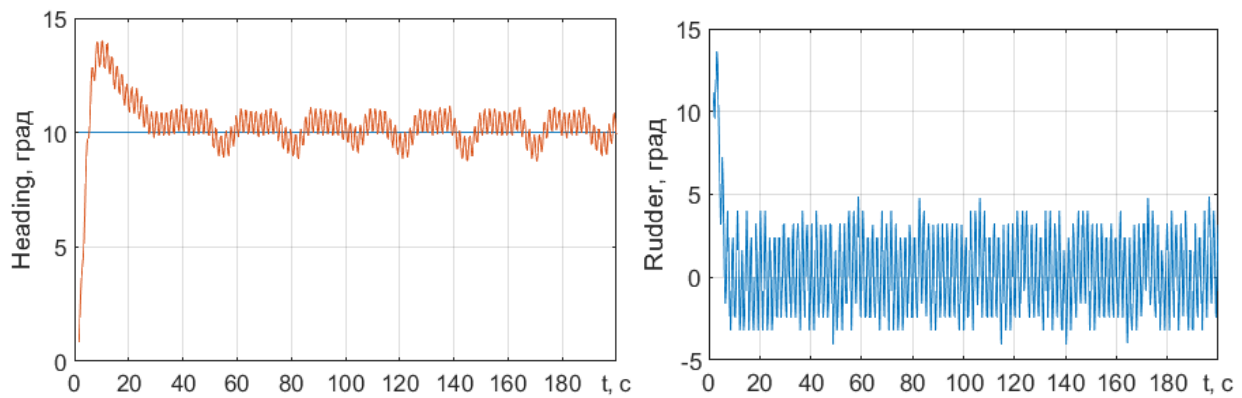


Рис. 6. Курс та перекладка керма fuzzy-регулятора

Таблиця 2. Показники якості роботи регуляторів

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість перекладок керма перехідного процесу, од.	Кількість перекладок керма при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 1»					
ПД	35	27	18	8.809	0.231
ПД	30	33	25	7.45	0.140
Fuzzy	30	90	191	10.2	0.199

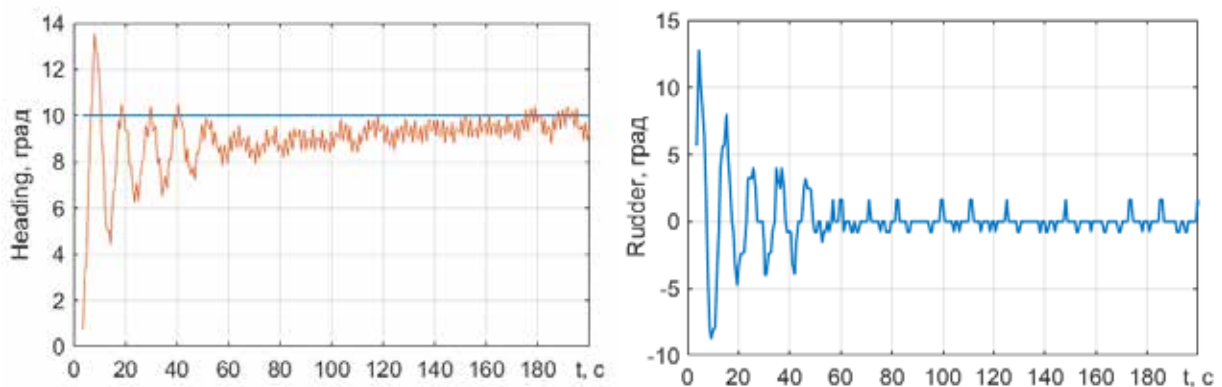


Рис. 7. Курс та кермо ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

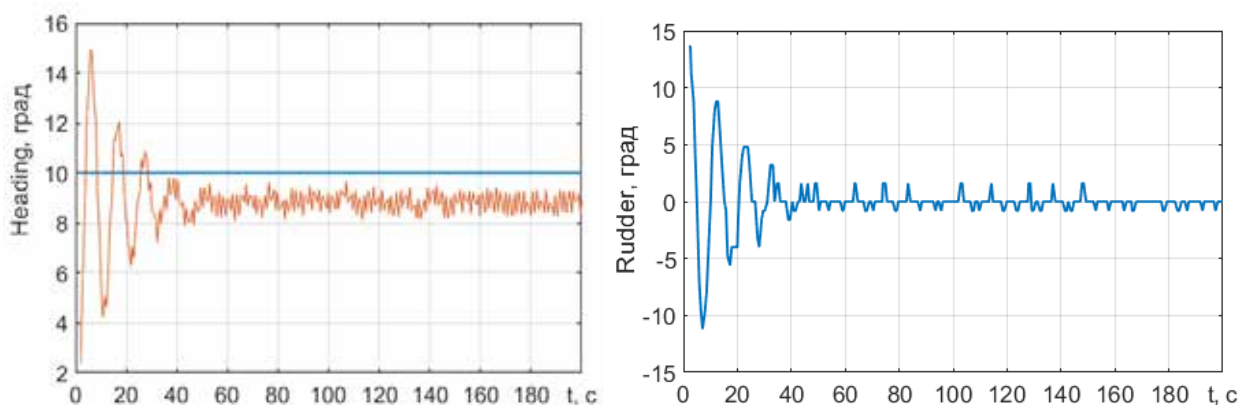


Рис. 8. Курс та кермо ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

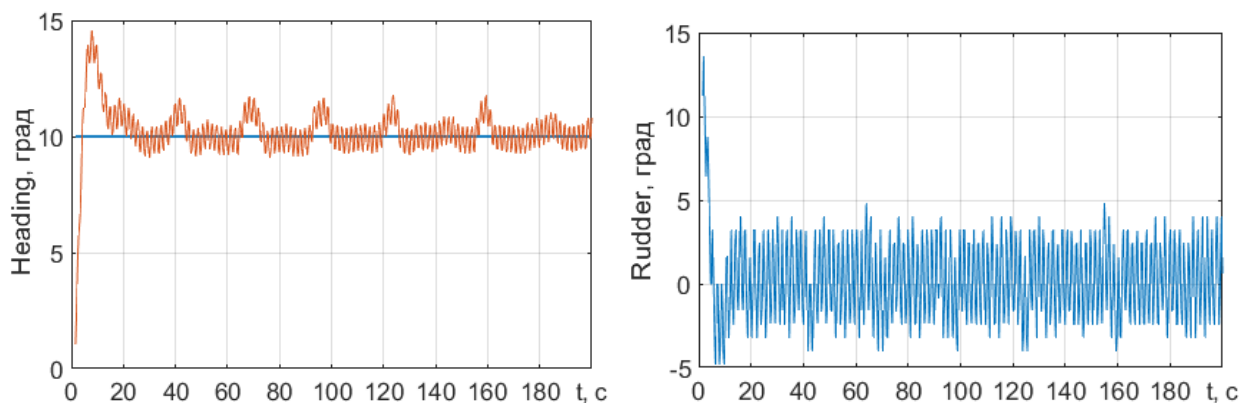


Рис. 9. Курс та кермо при роботі fuzzy-регулятора судна

Таблиця 3. Показники якості роботи регуляторів

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень керма перехідного процесу, од.	Кількість переключень керма при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 2»					
ПД	60	57	30	9.25	0.45
ПД	50	47	30	8.88	0.14
Fuzzy	30	90	192	10.09	0.388

регулятора: $K_i = 0$, $K_{dp} = 2$, $K_w = 2$ та регулятора з нечіткою логікою.

Кількісну оцінку якості роботи регуляторів судна «High speed boat 2» представлено у таблиці 3.

За проведенням аналізом встановлено, що запропонований ПД-регулятор потребує додаткового підлаштування, як для першого так і для другого судна. Для зменшення часу перехідного процесу та підвищення точності керування збільшимо коефіцієнт підсилення інтегральної та пропорційної ланок ПД-регулятора [19]. Також, підкорегуємо правила керування нечіткого регулятора [20].

Експ. № 3) Для оцінки якості нових налаштувань ПД-регулятора проведемо моделювання руху судна «High speed boat 1» в умовах зовнішнього збурення (початкові умови див. вище).

Параметри налаштування ПД регулятора: $K_i = 0,08$; $K_{dp} = 2$; $K_w = 20$.

Моделювання руху судна «High speed boat 1» з ПД-регулятором.

Параметри налаштування ПД регулятора: $K_i = 0$; $K_{dp} = 3$; $K_w = 10$.

Кількісна оцінка результатів судна «High speed boat 1» у таблиці 4.

За проведенням аналізом встановлено, що якість налаштування ПД-регулятора покращена 11% за кількістю переключень керма при утриманні на курсі, на 21% за точністю керування.

Експ. № 4) Для оцінки якості нових налаштувань ПД-регулятора проведемо моделювання руху судна «High speed boat 2» в умовах зовнішнього збурення (початкові умови див. вище).

Параметри налаштування ПД регулятора: $K_i = 0,03$; $K_{dp} = 2$; $K_w = 2$.

Параметри ПД регулятора $K_i = 0$; $K_{dp} = 2$; $K_w = 10$;

В представленому дослідженні виконано підлаштування параметрів регулятора переключень керма малорозмірного швидкісного судна, (двох типів) в залежності від типу зовнішнього збурення, що впливало на динаміку судна при утриманні на заданому курсі.

В результаті вдалось скоротити кількість переключень керма та підвищити точність керування, табл. 6.

Обговорення отриманих результатів.

За результатами дослідження можна відзначити актуальність вирішення завдання налаштування параметрів регулятора за умов

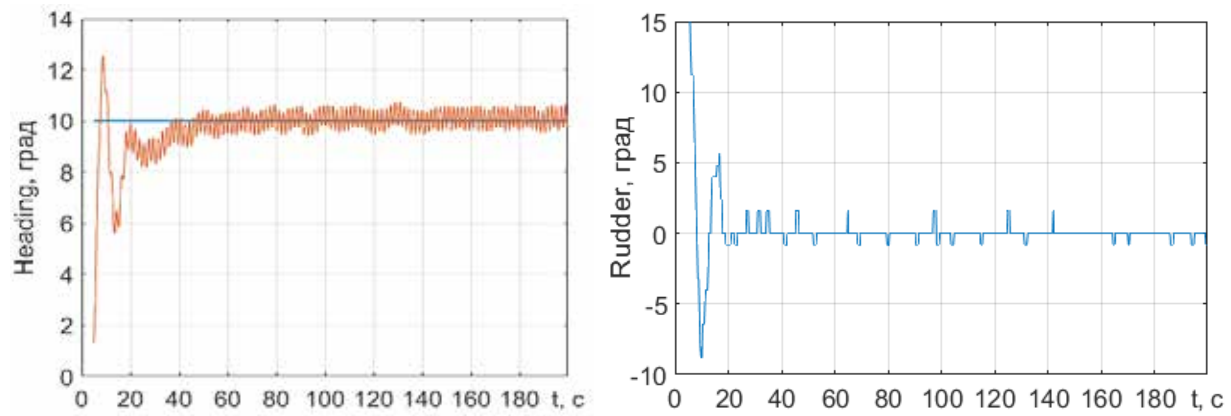


Рис. 10. Курс та кермо ПІД-регулятора судна «High speed boat 1»

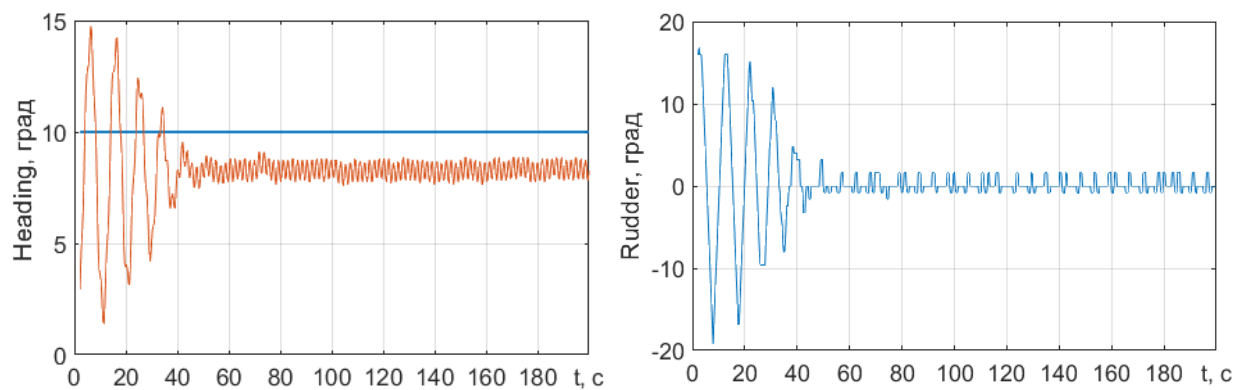


Рис. 11. Курс та кермо ПД-регулятора судна «High speed boat 1»

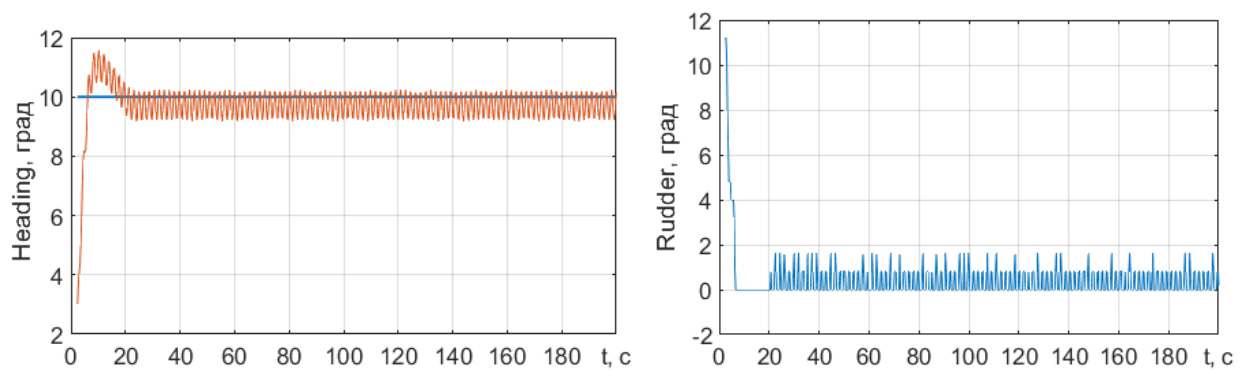


Рис. 12. Курс та кермо fuzzy-регулятора судна «High speed boat 1»

Таблиця 4. Показники якості роботи регуляторів

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень керма перехідного процесу, од.	Кількість переключень керма при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 1»					
ПІД	30	29	16	9.79	0.217
ПД	40	94	48	8.6	0.165
Fuzzy	20	8	84	9.72	0.125

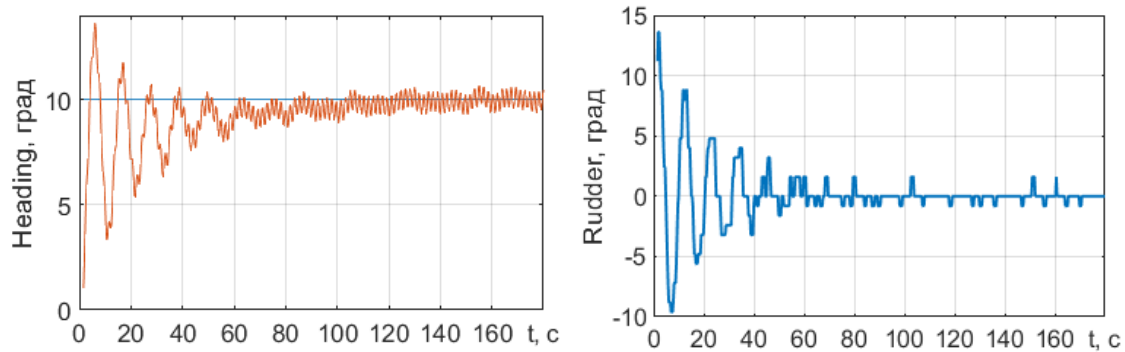


Рис. 13. Курс та кермо ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

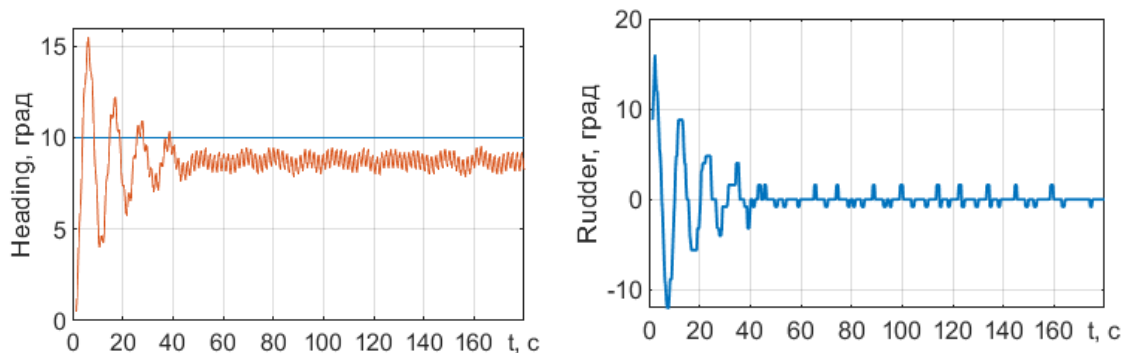


Рис. 14. Курс та кермо ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

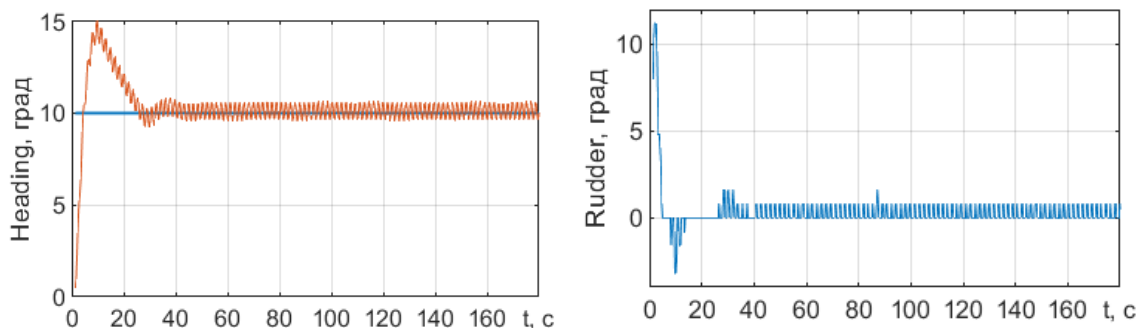


Рис. 15. Курс та кермо fuzzy регулятора судна «High speed boat 2»

Таблиця 5. Показники якості роботи регуляторів судна «High speed boat 2»

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень керма перехідного процесу, од.	Кількість переключень керма при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 1»					
ПД	60	72	27	9.57	0.16
ПД	50	50	35	8.67	0.295
Fuzzy	30	27	70	10.1	0.135

невизначеності зовнішнього впливу. Запропаний підхід дозволить оптимізувати роботу регуляторів за кількістю переключень керма та точністю керування, поділивши їх роботу на режими в залежності від зо-

внішнього впливу. Багаторівнева САК, в залежності від зовнішніх умов, буде обирати необхідний режим роботи регулятора, що дозволить оптимізувати енергетичні витрати в цілому.

Таблиця 6. Підсумкова таблиця результатів

№ експ	Тип рег.	Налаштування регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість перекладок керма перехідного процесу, од.	Кількість перекладок керма при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 1»							
1	ПД	$K_i = 10^{-3}, K_{d\varphi} = 2, K_{\omega} = 2$	35	27	18	8.809	0.231
3	ПД	$K_i = 0,08; K_{d\varphi} = 2; K_{\omega} = 20$	30	29	16	9.79	0.217
1	ПД	$K_i = 0, K_{d\varphi} = 2, K_{\omega} = 2$	30	33	25	7.45	0.140
3	ПД	$K_i = 0; K_{d\varphi} = 3; K_{\omega} = 10.$	40	94	48	8.6	0.165
1	Fuzzy		30	90	191	10.2	0.199
3	Fuzzy		20	8	84	9.72	0.125
«High speed boat 2»							
2	ПД	$K_i = 10^{-3}, K_{d\varphi} = 2, K_{\omega} = 2$	60	57	30	9.25	0.45
4	ПД	$K_i = 0,03; K_{d\varphi} = 2; K_{\omega} = 2.$	60	72	27	9.57	0.16
2	ПД	$K_i = 0, K_{d\varphi} = 2, K_{\omega} = 2$	50	47	30	8.88	0.14
4	ПД	$K_i = 0; K_{d\varphi} = 2; K_{\omega} = 10;$	50	50	35	8.67	0.295
2	Fuzzy		30	90	192	10.09	0.388
4	Fuzzy		30	27	70	10.1	0.135

Результати дослідження, також, було обговорено на Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці».

Слід відзначити, що в даній роботі проведено дослідження впливу зовнішніх умов на динаміку малорозмірного судна при утриманні його на заданому курсі, однак, можливості моделюючого комплексу даним завданням не обмежуються. Для безекіпажних суден актуальною є задача траєкторного руху, для вирішення якої необхідне поєднання регулятора курсу і показників навігаційних приладів, що також можна вирішити за допомогою моделювання.

Висновки. Наведено результати роботи додатку, створеного за допомогою програмування в Matlab, який обробляє дані від авторульового і надає кількісну оцінку його налаштуванням.

За швидким аналізом якості керування виконано підлаштування параметрів регуля-

торів, що дозволило без додаткових затрат покращити якість керування за кількістю перекладок керма і точністю керування. За порівнянням результатів першого і третього експериментів встановлено, що кількість перекладок керма було зменшено на 11%, а точність утримання на курсі покращено на 21% (авторульовий з ПД регулятором). Для другого та четвертого експериментів – кількість перекладок керма було зменшено на 10%, а точність утримання на курсі покращено на 3,5%. Застосування нечіткого регулятора дозволило вдвічі скоротити час перехідного процесу: з 60 секунд до 30 секунд, та значно підвищити точність утримання на заданому курсі.

Запропоновано метод оптимізації роботи системи автоматичного керування безекіпажним катером, що включає кілька регуляторів, шляхом застосування персональних налаштувань регулятора залежно від вибраного режиму роботи.

Список літератури

- [1] Sharma T., Bedi J., Anand A., Aggarwal A. Wave Height Prediction in Maritime Transportation Using Decomposition Based Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(5), 4304–4313. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3322192>
- [2] Roberts G. N. Trends in marine control systems. *Annual Reviews in Control*, 2008, 32(2), 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.08.002>
- [3] Das S., Talole S. E. Robust Steering Autopilot Design for Marine Surface Vessels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(4), 913–922. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2518256>

- [4] Alessandri A., Donnarumma S., Vignolo S., Figari M., Martelli M., Sebastiani R. C. L. System control design of autopilot and speed pilot for a patrol vessel by using LMIs: A. Alessandri, S. Donnarumma & S. Vignolo M. Figari & M. Martelli. B *Towards Green Marine Technology and Transport*. 2015. CRC Press.
- [5] Fruzzetti C., Donnarumma S., Martelli M. *Smart Pilot Controller for Marine Vessels: Formal Design, Modeling and Simulations* (SSRN Scholarly Paper 4634809). 2023. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4634809>
- [6] Rigatos G., Tzafestas S. «Adaptive fuzzy control for the ship steering problem», *Mechatronics*, vol. 16, no. 8, pp. 479–489, Oct. 2006.
- [7] Li P., Liu D., Baldi S. Boundary-Layer Control With Unstructured Uncertainties With Application to Adaptive Autopilots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024. 32(3), 1057–1065. <https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3329908>
- [8] Yang Z., Huang J., Yin H., Yang D., Zhong Z. «Path tracking control for underactuated vehicles with matched-mismatched uncertainties: An uncertainty decomposition based constraint-following approach», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 8, pp. 12894–12907, Aug. 2022.
- [9] Roy S., Baldi S., Li P., Sankaranarayanan V. N. «Artificial-delay adaptive control for underactuated Euler–Lagrange robotics», *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 26, no. 6, pp. 3064–3075, Dec. 2021.
- [10] Safonov M. G. «Robust control: Fooled by assumptions», *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 28, no. 12, pp. 3667–3677, Aug. 2018.
- [11] Dave D. P., Ghatol Dr. A. A. *Modeling and Simulation of Marine Control Systems*. 2022. <https://imare.in/wp-content/uploads/2022/09/paper-no6b-1-mr-dp-dave.pdf>
- [12] Degorre L., Delaleau E., Chocron O. A Survey on Model-Based Control and Guidance Principles for Autonomous Marine Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2), 430. <https://doi.org/10.3390/jmse11020430>
- [13] Bolbot V., Sandru A., Saarniniemi T., Puolakka O., Kujala P., Valdez Banda O. A. Small Unmanned Surface Vessels – A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(12), 2387. <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>
- [14] Arfianto A. Z., Rahmat M. B., Dhiyavia F., Santoso T. B., Gunantara N., Supriyanto E., Ardhana V. Y. P. Autopilot Unmanned Smart Boat Vehicle (AUSV) Communication with LoRa RFM95. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, 2020, 4(4), 219–224. <https://doi.org/10.30630/joiv.4.4.492>
- [15] Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. Autonomous ships concept and mathematical models application in their steering process control. 2022.
- [16] Kupraty O. Mathematical modeling of the trajectory of a ship as a control object in local planning. *MATEC Web of Conferences*, 2021, 339, 01015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133901015>
- [17] Наговський Д. А., Дощенко Г. Г. Математична модель спостерігача для системи управління утриманням положення судна. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 2023, 5(1), 58–63. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-1-7>
- [18] Фан В. *Совершенствование системы управления движением маломерного судна при стабилизации на траектории*. УДМТУ. 2003.
- [19] Попович М. Г., Ковальчук О. В. *Теорія автоматичного керування*. Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007, 656 с.
- [20] Дакі О. А., Іваненко В. М., Федунів В. М., Чебан В. І. Побудова нечіткого регулятора стабілізації судна на траєкторії. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2021, 3(69), 126–133. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.16>

© Грудініна Г. С., Бурунін А. П.

Дата надходження статті до редакції: 26.09.2024

Дата затвердження статті до друку: 10.09.2024