

УДК 681.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF THE CONTROL SYSTEM OF A SMALL UNMANNED SURFACE VESSEL UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL DISTURBANCES

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИМ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

Hanna S. Hrudinina

hanna.hrudinina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8298-9251

Andriy P. Burunin

splashbox98@gmail.com

ORCID: 0009-0005-1017-9766

Г. С. Грудініна,

канд. техн. наук, доцент

А. П. Бурунін,

аспірант

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

Abstract. Purpose. To investigate the operation of the automatic control system of a small unmanned vessel under marine disturbances. To assess the effectiveness of the control system, considering the criterion of minimizing the number of rudder shifts in order to optimize the resources of the steering machine.

Method. For an effective analysis of the autopilot quality indicators, an experimental study of the ship's dynamics under external influences has been conducted through mathematical modeling. For this research, scenarios with various combinations of wind and wave effects have been developed. To obtain a high-quality database, applications have been created to analyze the modeling results based on the specified criteria. For a more accurate assessment of the autopilot's performance, two ships of the same class were used in the study.

Results. The result of simulating the ship's motion under the given wind-wave conditions includes graphs of the ship's course, actual rudder shifts, and the control signal received from the autopilot. To process the obtained data, a custom application developed in the Matlab software suite was used. The quality of the controllers is evaluated based on the following parameters: the number of rudder shifts per minute of simulation; maximum course deviation; expected course (mathematical expectation); and variance. A comparison of the fuzzy controller's performance with the PID controller was conducted based on several parameters.

Scientific novelty. Methods for improving the energy efficiency of the ship's motion control system are proposed, by reducing the number of rudder shifts through the optimization of the controller settings when operating under external influences.

Practical importance. Optimizing the controller's operation in terms of the number of rudder shifts will improve the overall energy efficiency of the autopilot system. The issue of energy efficiency is particularly relevant when using battery power. The technology of small electric vessels continues to evolve, and as battery performance improves and costs decrease, such vessels are becoming more accessible and popular. The optimization of the autopilot parameters aims to enhance the ship's energy efficiency by utilizing refined controller settings. The data obtained in the study will supplement the rule base laid down in the fuzzy regulator.

Key words: fuzzy regulator; auto-steering; mathematical modeling; unmanned surface vessel.

Анотація. Мета. Дослідити роботу системи автоматичного керування малорозмірним безекіпажним судном в умовах морських збурень. Оцінити ефективність системи керування, враховуючи критерій мінімізації кількості переключень руля, з метою економії ресурсів рульової машини.

Методика. Для ефективного аналізу показників якості авторульового застосовано експериментальне дослідження динаміки судна в умовах зовнішнього впливу шляхом математичного моделювання. Для даного дослідження розроблено сценарії з різними комбінаціями вітро-хвильового впливу. Для отримання якісної бази даних розроблено додатки, що аналізують результати моделювання за вказаними критеріями. Для більш адекватної оцінки якості роботи авторульового в дослідженні використано два судна одного класу.

Результати. Результатом моделювання руху судна за заданих вітро-хвильових умов є графіки курсу судна, реальної переключки керма та сигналу керування, що надходить від авторульового. Для обробки отриманих

даних використано авторський додаток, розроблений в програмному комплексі Matlab. Якість роботи регуляторів оцінюється за наступними параметрами: кількість перекладок керма за хвилину моделювання; максимальне відхилення від курсу; математичне очікування курсу; дисперсія. Проведено порівняння роботи нечіткого регулятора з ПД регулятором за декількома параметрами.

Наукова новизна. Запропоновано засоби підвищення енергоефективності системи керування рухом судна, за рахунок зменшення кількості перекладок керма, шляхом оптимізації налаштувань регулятора при роботі в умовах зовнішнього впливу.

Практична значимість. Оптимізація роботи регулятора за кількістю перекладок керма дозволить підвищити енергоефективність авторульового в цілому. Питання енергоефективності є дуже актуальним при використанні акумуляторної батареї. Технологія малорозмірних електрокатерів продовжує розвиватися, і в міру покращення батареї і зменшення її вартості такі судна стають дедалі доступнішими та популярнішими. Оптимізація параметрів авторульового має на меті підвищення енергоефективності судна, за рахунок використання уточнених параметрів налаштування регулятора. Отримані у дослідженні дані доповнять базу правил, що закладається в нечіткий регулятор.

Ключові слова: нечіткий регулятор; авторульовий; математичне моделювання; безекіпажне надводне судно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Малорозмірні безекіпажні надводні судна (МБНС) належать до сучасних засобів морської робототехніки, які стрімко розвиваються [1]. До головних напрямків застосування МБНС на цей час слід віднести океанографію, гідрографію, екологічний моніторинг водного середовища, пошукові та аварійно-рятувальні операції, оборонні задачі [2].

Одним з основних режимів експлуатації МБНС на цей час є режим морського переходу, коли необхідно забезпечувати стабілізований рух заданим курсом чи заданою траєкторією [3]. Зазвичай, такий режим протікає в умовах силової дії на корпус МБНС зовнішніх збурень вітро-хвильової природи [4]. Очевидно, що у такому режимі експлуатації суттєво більше витрачається енергії з бортових джерел судна, а також інтенсивно експлуатується рульовий пристрій МБНС.

У такому режимі особливе значення має ефективність роботи системи автоматичного керування рухом МБНС. Тому дослідження авторульового пристрою такого судна є актуальною задачею, оскільки цей пристрій напряму впливає на показники МБНС як об'єкта керування у цілому.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На цей час основні зусилля дослідників систем керування МБНС зосереджені на проблемі безпечної навігації та керуванні просторовим положенням надводних суден. Так, у роботі [5] запропоновано спосіб визначення небезпеки зіткнення БНС з іншими рухомими та нерухомими морськими об'єктами шляхом застосування комбінованих рушійно-рульових пристроїв. У статті отримано діаграму небезпек, яка дозволяє формально визначити рівень небезпеки ідентифікованих перешкод. Карта небезпеки дозволяє регулювати рівень небезпеки з урахуванням таких факторів, як морські хвилі, сила вітру, швидкість МБНС тощо.

Розробка [6] пропонує алгоритм мінімізації впливу хвиль на роботу судна і передбачає автоматичне реагування на аварійні ситуації (перевертання МБНС тощо).

У роботі [7] показано ефективність системи керування МБНС, побудованої на основі розширеного фільтра Калмана та простих настанов і законів управління PID. Система забезпечує високу точність та ефективне споживання енергії при виконанні основних завдань керування, таких як автоматичне визначення курсу, автоматичне визначення швидкості та слідування по прямій лінії для МБНС, оснащеного лише GPS і компасом.

У роботі [8] представлено дизайн, структуру та архітектуру універсальної автономної системи контролю та управління для багатоцільовим МБНС. Розроблена система призначена для виконання гідрографічних робіт та виконання оглядових місій з багатоваріантною конфігурацією корисного навантаження, включаючи багатопроменевий ехолот, сонар, LiDAR, фотографічні та спектральні системи камер.

У статті [9] наведено результати, отримані в результаті проектування системи керування швидкістю та курсом безекіпажного судна з використанням PID-контролера. Навігаційні випробування дали можливість перевірити правильність налаштувань регуляторів швидкості і курсу судна.

У роботі [10] синтезовано і перевірено випробуванням на озері систему планування шляху та автономну навігацію малорозмірного катера, а також поведінку катера при прискореннях і гальмуваннях.

Стаття [11] також присвячена розробці та впровадженню PID-контролера на безпілотному надводному судні. Система контролю та тестування передбачає перевірку та валідацію кіберфізичної системи в цілому, гарантуючи, що вона відповідає бажаним вимогам продуктивності та безпеки. Впровадження ПД-контролера на безпілотному надводному

судні показало багатообіцяючі результати в управлінні рухом судна та у підтримці його остійності.

У роботі [12] наведені результати експериментального тестування МБНС для оцінки продуктивності двох контролерів низького рівня, коли характеристики переміщення та гідродинамічного опору змінюються в часі та є невизначеними. Випробування МБНС змінної маси та зі змінним лобовим опором показали, що транспортним засобом найкраще керує еталонний контролер адаптивної швидкості та руху назад.

Стаття [13] присвячена огляду систем керування траєкторією для безпечних суден. Огляд містить інформацію про найсучасніші системи керування траєкторією для морських автономних надводних кораблів, де особливу увагу приділено підсистемі наведення судна.

Наведені вище роботи віддзеркалюють суттєві успіхи у напрямку автоматичного керування просторовим рухом МБНС, проте питання оптимізації роботи авторульового для таких суден залишилось поза увагою авторів.

Окремий напрямок у дослідженнях систем керування МБНС займають роботи по створенню універсальних (інтегрованих) систем керування, які призначені для керування морськими комплексами у складі надводного судна і підводного апарата [14, 15]. Такі системи керування забезпечують ефективне використання морських технологічних систем, які включають безпечне надводне судно як енергетичний та інформаційний центр морської місії та прив'язний або автономний ненаселений підводний апарат як інструмент, що реалізує підводну місію. Проте, питання роботи авторульового пристрою надводного судна в цих дослідженнях не розглядається.

З позицій практичного використання можливості сучасних систем керування МБНС найбільш повно викладено у посібнику компанії «Greenbay» [16]. Вказана система керування складається з кількох компонентів, включаючи GPS, пульт дистанційного керування, головний комп'ютер і виконавчі двигуни. Система дає змогу дистанційно керувати малорозмірним судном, програмувати його для автономного руху та дозволяє уникати перешкод. Однак, рекомендації щодо удосконалення роботи авторульового пристрою у посібнику відсутні.

Значна частина публікацій присвячена розробці систем групового керування для безпечних суден. Найбільш повно огляд таких систем керування наведено у роботі [17]. Автори навели результати оптимізації методи мультисистемного керування безпечних суден, розглянули групові завдання спільного планування шляху суден, розподіл кількох завдань між суднами, контроль просторової конфігурації групи суден тощо. Однак, особливості побудови систем керування групою суден в умовах дії зовнішніх збурень автори не досліджували.

Важливим напрямком розвитку систем керування безпечних суден є застосування елементів штучного інтелекту – регуляторів на базі нечіткої логіки та на базі штучних нейронних мереж [18–20].

Так, у статті [18] описано структуру системи керування МБНС на основі нечіткої логіки. Судно призначене для реалізації безлюдної технології збирання плаваючого сміття на поверхні стоячих водойм. Працездатність системи керування підтверджена прийнятними показниками якості керування технологічним обладнанням судна та рухом самого судна. Однак, конкретні дані про налаштування нечітких регуляторів автори не наводять.

У роботі [19] запропоновано новий адаптивний метод керування курсом МБНС на основі нейронної мережі зворотного поширення і алгоритму ройового інтелекту (бджолиного алгоритму). При цьому використовується класичний ПД-алгоритм як основний алгоритм керування курсом, а нейронна мережа зворотного поширення використовується для досягнення більш ефективного самоадаптивного ПД-регулювання.

У роботі [20] дано критичний аналіз сучасного стану розробки інтелектуальних систем керування МБНС. Зокрема, увага авторів сфокусована на аналізі концепцій стабілізації на курсі і на траєкторії, а також на організації групового керування безпечними суднами.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Виконаний огляд і аналіз науково-технічної літератури свідчить, що головними напрямками досліджень систем керування МБНС є стабілізація судна на заданому курсі та на заданій траєкторії, а також синтез систем автоматичного керування такими суднами на основі штучного інтелекту і, зокрема, на основі нечіткої логіки.

Питання зменшення кількості перекладок руля як шлях до зниження споживання енергії та економії ресурсу виконавчого механізму – рульової машини МБНС – наразі залишається поза увагою дослідників.

Мета статті – дослідити роботу системи автоматичного керування малорозмірного безпечно-го надводного судна в умовах дії збурень морського середовища і визначити її ефективність за критерієм мінімізації кількості перекладок руля як шляху до зниження споживання енергії та економії ресурсу виконавчого механізму – рульової машини судна.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод дослідження – математичне моделювання керованого процесу стабілізації курсу малорозмірного безпечно-го надводного судна в умовах дії вітрових збурень.

Об'єкт дослідження – система автоматичного керування малорозмірного безпечно-го надводного

судна у двох варіантах її реалізації: на основі ПІД-регулятора та на основі нечіткого регулятора.

Предмет дослідження – ефективність функціонування двох варіантів реалізації системи керування рухом малорозмірного безпечного надводного судна за критерієм мінімізації кількості перекладок руля.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Вихідні данні дослідження

Дослідження впливу зовнішніх умов на якість роботи авторульового проводилось з використанням моделюючого комплексу Cotmacs-AP-Lab [21]. В таблиці 1.1 представлено параметри суден, що використовувались у дослідженні. В таблиці 1.2 представлено параметри вітро-хвильового впливу за номером проведеного експерименту.

2. Моделювання динаміки судна в умовах зовнішнього впливу

Взагалі, авторульовий що розглядається, розроблений для класу малорозмірних швидкісних суден,

Таблиця 1.1. Параметри суден

Параметри суден, що моделюються:	High speed boat 1	High speed boat 2
тип	швидкісний катер 1 (ШК1)	швидкісний катер 2 (ШК2)
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	+	+

Таблиця 1.2. Параметри вітро-хвильового впливу

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

Таблиця 2.1. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	0	1	0	9	0.7690	0.3680	0.0249
Fuzzy	10	0	1	0	0	0.47	0.168	0.012

тому для більш адекватної оцінки якості роботи авторульового в дослідженні використано два судна одного класу. В даній роботі проілюстровано фрагмент експерименту з одним судном – швидкісний катер 1 (ШК1).

Умови вітро-хвильового впливу обрано за порядковим номером експерименту (див. табл. 1.2).

На рисунках 2.1–2.18 представлено графіки, що відображають курс судна та перекладку керма за хвилину моделювання. Для кількісної оцінки якості роботи авторульового використовувався авторський додаток, розроблений в програмному комплексі Matlab [22]. Результати оцінки представлено у таблицях наступних за графіками (табл. 2.1–2.9).

Експеримент № 1. Авторульовий з ПІД-регулятором. Налаштування ПІД-регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{dp} = 2$, $K_w = 2$.

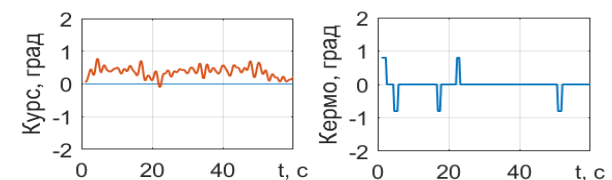


Рис. 2.1. Курс та перекладка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

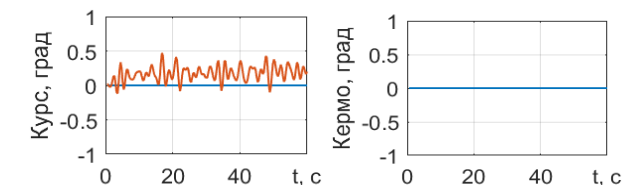


Рис. 2.2. Курс та перекладка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 2. Авторульовий з ПІД-регулятором.

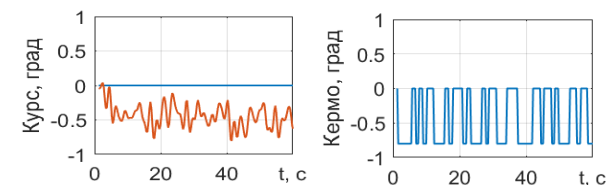


Рис. 2.3. Курс та перекладка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

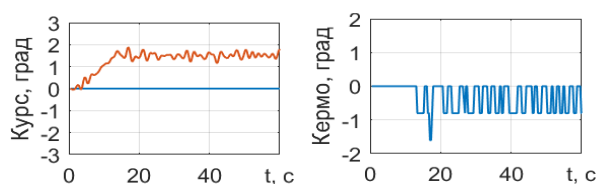


Рис. 2.4. Курс та перекидка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 3. Авторульовий з ПІД-регулятором.

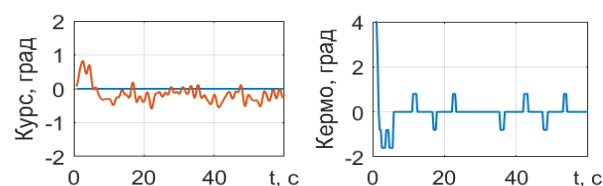


Рис. 2.5. Курс та перекидка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

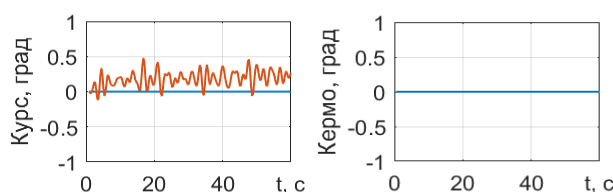


Рис. 2.6. Курс та перекидка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 4. Авторульовий з ПІД-регулятором.

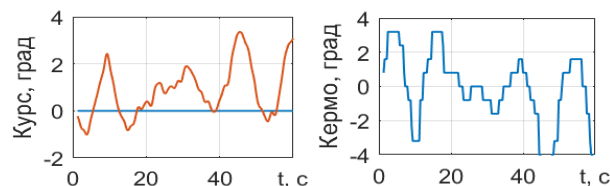


Рис. 2.7. Курс та перекидка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

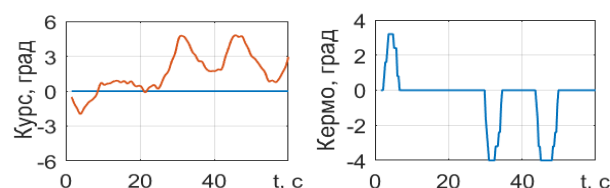


Рис. 2.8. Курс та перекидка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 5. Авторульовий з ПІД-регулятором.

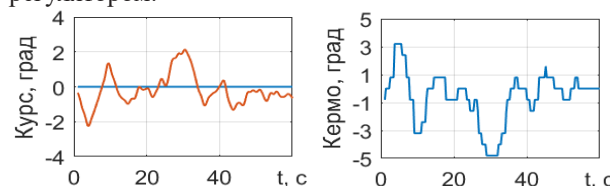


Рис. 2.9. Курс та перекидка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Таблиця 2.2. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекидачок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	90	1	0	29	0.801	-0.433	0.028
Fuzzy	10	90	1	0	41	1.882	1.318	0.194

Таблиця 2.3. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекидачок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота, м.	напр., град.				
ПІД	10	180	1	0	21	0.828	-0.148	0.622
Fuzzy	10	180	1	0	0	0.479	0.183	0.012

Таблиця 2.4. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекидачок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	0	1	90	40	3.362	0.88	1.164
Fuzzy	10	0	1	90	23	4.806	1.627	2.928

Авторульовий з нечітким регулятором.

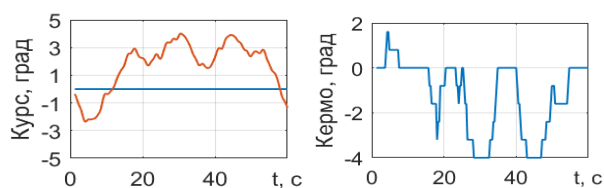


Рис. 2.10. Курс та перекладка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 6. Авторульовий з ПІД-регулятором.

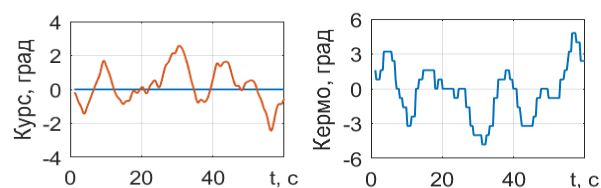


Рис. 2.11. Курс та перекладка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

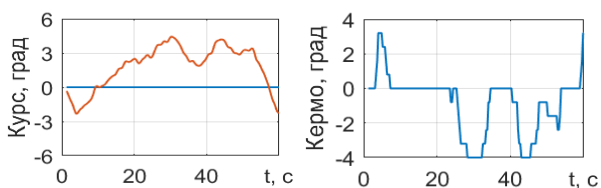


Рис. 2.12. Курс та перекладка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 7. Авторульовий з ПІД-регулятором.

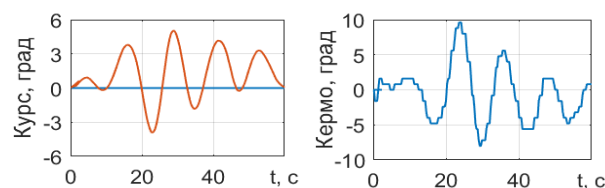


Рис. 2.13. Курс та перекладка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

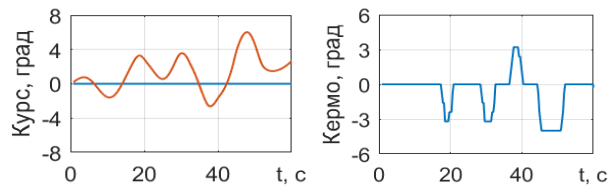


Рис. 2.14. Курс та перекладка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 8. Авторульовий з ПІД-регулятором.

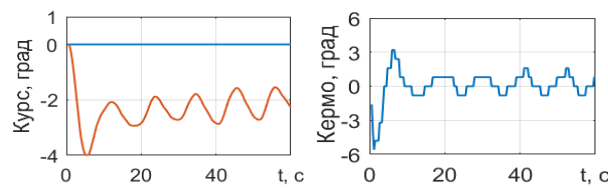


Рис. 2.15. Курс та перекладка керма ШК 1 з ПІД регулятором

Таблиця 2.5. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	90	1	90	83	3.809	-1.536	1.319
Fuzzy	10	90	1	90	35	4.009	1.770	3.143

Таблиця 2.6. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	180	1	90	43	2.581	0.252	1.208
Fuzzy	10	180	1	90	32	4.43	1.854	3.476

Таблиця 2.7. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПІД	10	180	1	180	57	6.763	-2.98	4.042
Fuzzy	10	180	1	180	29	6.025	1.267	4.123

Таблиця 2.8. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість пере- кладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПД	10	0	1	180	34	4	-2.351	0.368
Fuzzy	10	0	1	180	31	5.156	1.444	3.533

Таблиця 2.9. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість пере- кладок керма (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота хв., м.	напр., град.				
ПД	10	90	1	180	26	4.56	-2.51	0.396
Fuzzy	10	90	1	180	27	7.156	1.285	5.67

Авторульовий з нечітким регулятором.

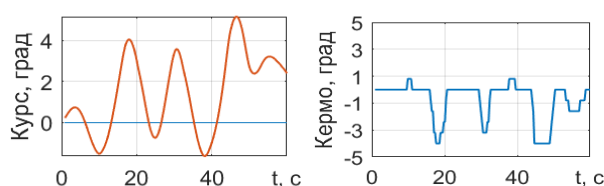


Рис. 2.16. Курс та перекидка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Експеримент № 9. Авторульовий з ПД-регулятором.

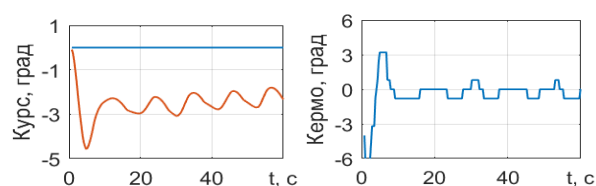


Рис. 2.17. Курс та перекидка керма ШК 1 з ПД регулятором

Авторульовий з нечітким регулятором.

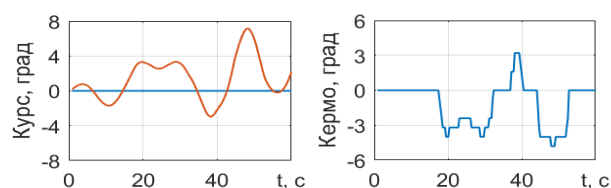


Рис. 2.18. Курс та перекидка керма ШК 1 з нечітким регулятором

Необхідно відзначити, що нечіткий регулятор було налаштовано на зменшення кількості перекидки керма. Якщо відхилення судна від заданого курсу (в даному випадку 0 °) становило менше ніж 1,5 градуси, то регулятор не виправляв дану прохибку.

3. Аналіз отриманих результатів

Порівняння кількості перекидок керма ШК1 керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, табл. 3.1–3.2, рис. 3.1.

Таблиця 3.1. Кількість перекидок керма ШК1 з ПД-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	9	40	34
90	29	83	26
180	21	43	57

Таблиця 3.2. Кількість перекидок керма ШК1 з fuzzy-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0	23	31
90	41	35	27
180	0	32	29

За результатами експериментів видно, що найбільшу кількість перекидок керма викликає боковий і кормовий вітер та хвилювання, що відповідає середньому стовпчику таблиць.

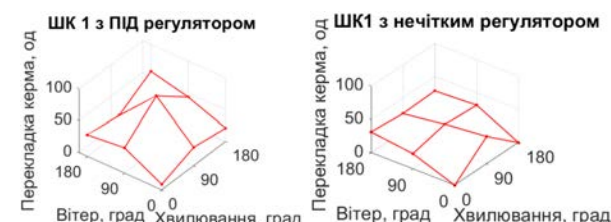


Рис. 3.1. Порівняння кількості перекидок керма

Порівняння максимального відхилення від курсу ШК1 керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, табл. 3.3–3.4, рис. 3.2.

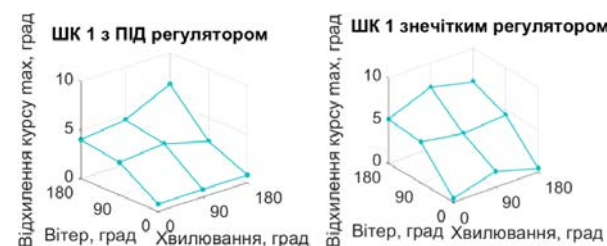


Рис. 3.2. Порівняння максимального відхилення

Порівняння математичного очікування ШК1 керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, табл. 3.5–3.6, рис. 3.3.

Таблиця 3.3. Максимальне відхилення від курсу ШК1 з ПД-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.769	3.362	4
90	0.801	3.809	4.56
180	0.828	2.581	6.763

Таблиця 3.4. Максимальне відхилення ШК1 з fuzzy-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.47	4.806	5.156
90	1.882	4.01	7.156
180	0.48	4.43	6.025

Таблиця. 3.5. Математичне очікування ШК1 з ПД-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.368	0.88	-2.351
90	-0.433	-1.536	-2.51
180	-0.148	0.253	-2.98

Таблиця 3.6. Математичне очікування ШК1 з fuzzy-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.168	1.627	1.444
90	1.318	1.77	1.285
180	0.183	1.854	1.267

За результатами експериментів видно, що математичне очікування відхилення від заданого курсу має найбільше значення при боковому та кормовому впливах. Знак математичного очікування вказує на напрямок відхилення, рис. 3.3.

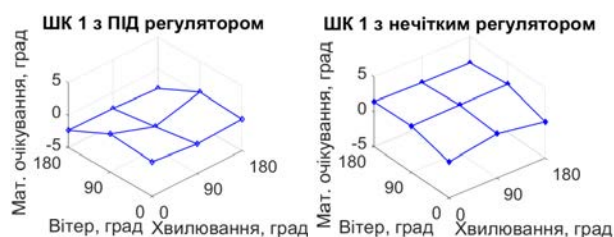


Рис. 3.3. Порівняння математичного очікування

Порівняння дисперсії ШК1 керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, табл. 3.7–3.8, рис. 3.4.

Таблиця 3.7. Дисперсія ШК1 з ПД-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.025	1.164	0.368
90	0.028	1.319	0.396
180	0.622	1.208	4.042

Таблиця 3.8. Дисперсія відхилення від курсу ШК1 з fuzzy-регулятором

Вітер/Хвилювання	0	90	180
0	0.012	2.928	3.533
90	0.194	3.143	5.67
180	0.012	3.476	4.123

Як видно, за результатами експериментів кормовий вплив викликає найбільше рискання, рис. 3.4.

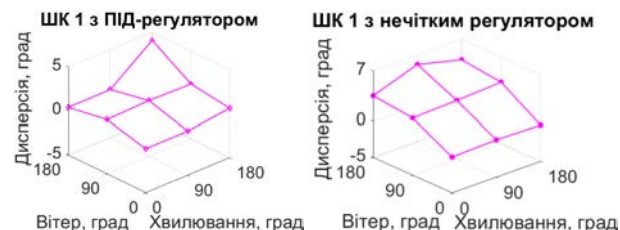


Рис. 3.4. Порівняння дисперсії

За допомогою дисперсії, в даному випадку, оцінюється розбіг значення курсу під час моделювання в обох напрямках (ліво та право) від заданого курсу, що має найбільший вплив на роботу авторульового.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Під час розробки регулятора стабілізації судна на заданому курсі, питання оптимізації налаштування його параметрів в умовах дії зовнішнього збурення є досить важливим і актуальним.

В даній роботі розглянуто авторульвий з двома регуляторами стабілізації курсу – ПД регулятор та нечіткий регулятор. При цьому, закон керування для нечіткого регулятора задано у вигляді бази правил, розробленої з урахуванням досвіду людини-кермового під час управління малорозмірним судном за умов морського хвилювання. Сутність даного керування полягає у фільтрації малих значень відхилення і кутового прискорення, а також, у ступінчастому відхиленні керма, що значно знижує кількість його переключень. Отримані результати моделювання дозволяють оптимізувати налаштування нечіткого регулятора з урахуванням різних умов вітро-хвильового збурення. Для проведення дослідження було обрано три основні напрямки впливу вітру та хвилювання: в ніс (0 град.); боковий (90 град.); кормовий (180 град.), які поєднуються у різних комбінаціях. Так, як регулятор пропонується застосовувати для класу малорозмірних суден, тому дослідження проводилось для двох суден з різними параметрами одного класу.

Застосовану методику дослідження було обговорено на Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці – 2024».

Як видно з отриманих результатів використання нечіткого регулятора дозволяє значно зменшити кількість переключень керма без значної втрати точності керування. Оптимізація роботи регулятора за кількістю переключень керма дозволить підвищити енергоефективність авторульового в цілому.

ВИСНОВКИ

За порівняльним аналізом отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- аналіз математичного очікування точності підтримки заданого курсу під час руху за умов зовнішнього впливу показав, що нечіткий регулятор в обох випадках (ШК1 та ШК2) є точнішим;
- аналіз роботи регуляторів за кількістю перекладок керма також вказує, що нечіткий регулятор виконує менше ітерацій:

$$\mu_{\text{ШК1}}_{\text{під}} = 27.6; \mu_{\text{ШК2}}_{\text{під}} = 36;$$

$$\mu_{\text{ШК1}}_{\text{fuzzy}} = 18; \mu_{\text{ШК2}}_{\text{fuzzy}} = 26.$$

Менша кількість перекладок підвищує енергоефективність судна. Однак, висока точність керування

авторульового з нечітким регулятором, буде залежати від точності математичної моделі судна, для якого налаштовується регулятор.

Також, можна відзначити, що на керованість судна значно впливає не тільки боковий зовнішній вплив а і кормове хвилювання. За рахунок налаштування діапазону чутливості нечіткого регулятора можна позбавитись від зайвого «підрулювання», і навпаки, збільшити чутливість для випадків коли це необхідно. Порівняльний аналіз максимального відхилення показує, що у нечіткого регулятора дане відхилення в середньому на два градуса більше. Даний регулятор налаштовано на реагування при відхиленні більш ніж на 1.5 градуси.

До недоліків ПІД регулятора слід віднести наявність сталої похибки керування, зменшення якої призводить до збільшення перекладок керма.

Перевагою ПІД регулятора є універсальність, простота налаштування.

REFERENCES

- [1] *Unmanned surface vehicle*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned-_surface_vehicle
- [2] Bolbot, V., Sandru, A., Saarniniemi, T., Puolakka, O., Kujala, P. Osiris, A., & Banda, V. (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*, 023, 11(12), 2387. <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>
- [3] Nadtochii, V., & Burunin, A. (2024). *Unmanned boat for conservation missions in shallow sea water areas*. 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration. Marrakesh, Morocco. Springer – Publishing Partner. 1.
- [4] Heij, C., & Knapp, S. (2015). Effects of wind strength and wave height on ship incident risk: Regional trends and seasonality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.016>
- [5] Nadtochii, V., & Nadtochyi, A. (2019). Methods for ensuring the navigation safety of unmanned surface vessel. *Technology Audit and Production Reserves*, 6/2(50), 19–23. DOI:10.15587/2312-8372.2019.187286
- [6] *Control for Unmanned Surface Vehicles*. Retrieved from: <https://www.uavnavigation.com/solutions/control-usv>
- [7] Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., & Bruzzone, G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle. *Autonomous Robots*, 25(4), 349–365. <https://doi.org/10.1007/s10514-008-9100-0>
- [8] Stateczny, A., & Burdziakowski, P. (2019). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, 26(1), 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>
- [9] Gutiérrez, C., Yacub, B., Sierra, E., Sánchez, S., & Contreras, J. (2022). Sistema de control de velocidad y rumbo para un vehículo de superficie no tripulado-USV. *Ciencia y tecnología de buques*, 16(31), 9–17. <https://doi.org/10.25043/19098642.231>
- [10] Guo, W., Wang, S., & Dun, W. (2015). The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*, (7), 150–156. Retrieved from: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOAUTOCJ/TOAUTOCJ-7-150.pdf>
- [11] Kotian, R., Umesh, P., & Gangadharan, K. V. (2023). Real-Time Implementation Of PID Control For Unmanned Surface Vessel: A Practical Approach. 2023 *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CONECCT57959.2023.10234784>
- [12] Klinger, W. B., Bertaska, I. R., Von Ellenrieder, K. D., & Dhanak, M. R. (2017). Control of an Unmanned Surface Vehicle With Uncertain Displacement and Drag. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(2), 458–476. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2571158>
- [13] Xu, H., & Guedes Soares, C. (2023). Review of Path-following Control Systems for Maritime Autonomous Surface Ships. *Journal of Marine Science and Application*, 22(2), 153–171. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00338-6>
- [14] Cho, H., Jeong, S.-K., Ji, D.-H., Tran, N.-H., Vu, M. T., & Choi, H.-S. (2020). Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(9), 2633. <https://doi.org/10.3390/s20092633>
- [15] *Marine Control Systems for USV, UUV, ROV*. Retrieved from <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/marine-control-systems/>
- [16] *Simplified Guide to Greenbay's Unmanned Surface Vehicle (USV) Control System*. Retrieved from <https://oceangreenbay.com/simplified-guide-to-greenbays-unmanned-surface-vehicle-usv-control-system/>
- [17] Xue, J., Song, Y., & Hu, H. (2024). Formation Control of a Multi-Unmanned Surface Vessel System: A Bibliometric Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1484. <https://doi.org/10.3390/jmse12091484>
- [18] Mun Wai, A. W., Long, C. J., Shen, K. H., An, O. J., Nugroho, H., & Rusydi, M. I. (2022). Fuzzy-based Control System of Unmanned Surface Vehicle (USV) for Floating Garbage Collection. 2022 *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IICAET55139.2022.9936835>

- [19] Fang, Y., Pang, M., & Wang, B. (2017). *A course control system of unmanned surface vehicle (USV) using back-propagation neural network (BPNN) and artificial bee colony (ABC) algorithm*. 8th International Conference on Advances in Information Technology, IAIT2016, Macau, China. Procedia Computer Science (Elsevier), 111. 361–366.
- [20] Er, M. J., Ma, C., Liu, T., & Gong, H. (2023). Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, 280, 114562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>
- [21] Burunin, A., & Hrudinina, N. (2024). *Optimization of the autopilot system settings for an unmanned surface vessel using mathematical modeling methods*. Navihatsiia ta keruvannia sudnom: novi pidkhody, navchannia ta modeliuvannia N&SH-2024. I Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia. Odeskyi natsionalnyi morskyy universytet, 22–25 [in Ukrainian].
- [22] Burunin, A., & Hrudinina, H. (2024) *Analiz roboty nechitkoho rehuliatora u yakosti avtorulvoho shvydkisnoho kateru [Analysis of the operation of a fuzzy controller as an auto-steering speedboat]*. The 10th International scientific and practical conference “Computer-integrated technologies of automation of technological processes”. Hamburg, Germany. International Science Group. 272–276. ISBN – 979-8-89504-798-9 DOI – 10.46299/ISG.2024.2.10

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Unmanned surface vehicle*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned-_surface_vehicle
- [2] Bolbot, V., Sandru, A., Saarniniemi, T., Puolakka, O., Kujala, P. Osiris, A. and Banda, V. (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*, 023, 11(12), 2387. <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>
- [3] Nadtochii, V. and Burunin, A. (2024). *Unmanned boat for conservation missions in shallow sea water areas*. 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration. Marrakesh, Morocco. Springer – Publishing Partner. 1.
- [4] Heij, C., & Knapp, S. (2015). Effects of wind strength and wave height on ship incident risk: Regional trends and seasonality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.016>
- [5] Nadtochii, V., & Nadtoshyi, A. (2019). Methods for ensuring the navigation safety of unmanned surface vessel. *Technology Audit and Production Reserves*, 6/2(50), 19–23. DOI:10.15587/2312-8372.2019.187286
- [6] *Control for Unmanned Surface Vehicles*. URL: <https://www.uavnavigation.com/solutions/control-usv>
- [7] Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., & Bruzzone, G. (2008). Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle. *Autonomous Robots*, 25(4), 349–365. <https://doi.org/10.1007/s10514-008-9100-0>
- [8] Stateczny, A., & Burdziakowski, P. (2019). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, 26(1), 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>
- [9] Gutiérrez, C., Yacub, B., Sierra, E., Sánchez, S., & Contreras, J. (2022). Sistema de control de velocidad y rumbo para un vehículo de superficie no tripulado-USV. *Ciencia y tecnología de buques*, 16(31), 9–17. <https://doi.org/10.25043/19098642.231>
- [10] Guo, W., Wang, S., and Dun, W. (2015). The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*, (7). 150–156. URL: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOAUTOCJ/TOAUTOCJ-7-150.pdf>
- [11] Kotian, R., Umesh, P., & Gangadharan, K. V. (2023). Real-Time Implementation Of PID Control For Unmanned Surface Vessel: A Practical Approach. *2023 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CONECCT57959.2023.10234784>
- [12] Klinger, W. B., Bertaska, I. R., Von Ellenrieder, K. D., & Dhanak, M. R. (2017). Control of an Unmanned Surface Vehicle With Uncertain Displacement and Drag. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(2), 458–476. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2571158>
- [13] Xu, H., & Guedes Soares, C. (2023). Review of Path-following Control Systems for Maritime Autonomous Surface Ships. *Journal of Marine Science and Application*, 22(2), 153–171. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00338-6>
- [14] Cho, H., Jeong, S.-K., Ji, D.-H., Tran, N.-H., Vu, M. T., & Choi, H.-S. (2020). Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(9), 2633. <https://doi.org/10.3390/s20092633>
- [15] *Marine Control Systems for USV, UUV, ROV*. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/marine-control-systems/>
- [16] *Simplified Guide to Greenbay's Unmanned Surface Vehicle (USV) Control System*. URL: <https://oceangreenbay.com/simplified-guide-to-greenbays-unmanned-surface-vehicle-usv-control-system/>
- [17] Xue, J., Song, Y., & Hu, H. (2024). Formation Control of a Multi-Unmanned Surface Vessel System: A Bibliometric Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1484. <https://doi.org/10.3390/jmse12091484>
- [18] Mun Wai, A. W., Long, C. J., Shen, K. H., An, O. J., Nugroho, H., & Rusydi, M. I. (2022). Fuzzy-based Control System of Unmanned Surface Vehicle (USV) for Floating Garbage Collection. *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IICAET55139.2022.9936835>
- [19] Fang, Y., Pang, M., and Wang, B. (2017). *A course control system of unmanned surface vehicle (USV) using back-propagation neural network (BPNN) and artificial bee colony (ABC) algorithm*. 8th International Conference on Advances in Information Technology, IAIT2016, Macau, China. Procedia Computer Science (Elsevier), 111. 361–366.
- [20] Er, M. J., Ma, C., Liu, T., & Gong, H. (2023). Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, 280, 114562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>
- [21] Burunin, A., and Hrudinina, H. (2024). *Optimization of the autopilot system settings for an unmanned surface vessel using mathematical modeling methods*. Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання N&SH-2024 : I Міжнародна науково-практична конференція : матеріали. – Одеса : Одеський національний морський університет, 22–25.
- [22] Бурунін, А. та Грудініна, Г. (2024) *Аналіз роботи нечіткого регулятора у якості авторульового швидкісного катеру*. The 10th International scientific and practical conference “Computer-integrated technologies of automation of technological processes”. Hamburg, Germany. International Science Group. 2024. 272–276. ISBN – 979-8-89504-798-9 DOI – 10.46299/ISG.2024.2.10

© Грудініна Г. С., Бурунін А. П.

Дата надходження статті до редакції: 07.11.2024

Дата затвердження статті до друку: 24.11.2024