

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Бурунін Андрій Павлович

УДК 681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

КОМПЛЕКСНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ
МАЛОРОЗМІРНИМ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. П. Бурунін

Науковий керівник Надточій Віктор Анатолійович, кандидат технічних
наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Бурунін А.П. Комплексна автоматизація процесів керування малорозмірним безекіпажним надводним судном. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування). – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, Миколаїв, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального прикладного наукового завдання створення науково-методологічного підґрунтя комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден як складової інноваційного розвитку вітчизняного суднобудування.

Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю швидкого та ефективного впровадження у морську практику новітніх досягнень робототехніки, штучного інтелекту та оперативного керування, необхідністю формування внутрішнього ринку передових морських безекіпажних транспортних, природоохоронних, охоронних та оборонних технологій та необхідністю розробки і впровадження високоефективних систем автоматизації суден для малого і середнього суднобудування України.

Метою дисертаційної роботи є розробка науково-методологічного підґрунтя та технічних рішень комплексної автоматизації процесів керування малорозмірним безекіпажним надводним судном на основі системного підходу, що забезпечує підвищення ефективності його функціонування та застосування корисного вантажу за призначенням.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертації, полягає у наступному:

вперше на основі застосування системного підходу та методології рівнянь існування сформовано генеральну множину основних задач

зовнішнього і внутрішнього проектування малорозмірного безекіпажного надводного судна як об'єкта автоматичного керування та множину задач його комплексної автоматизації, що утворює науково-методологічну основу проектування судна, скорочує тривалість та підвищує якість проектних робіт;

вперше на основі застосування системного підходу запропоновано концепцію модульної автономії дослідницького комплексу «Безекіпажний надводний катер – Корисний вантаж» як об'єкту автоматичного керування, яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу, та розроблено узагальнені алгоритми керування корисним вантажем як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища;

отримали подальший розвиток класифікація засобів морської робототехніки шляхом уведення до її складу надводно-підводного безекіпажного судна природоохоронного призначення та множина задач синтезу його системи автоматичного керування, що утворює науково-методологічну основу комплексної автоматизації засобів морської робототехніки такого класу;

отримала подальший розвиток нейромережна система стабілізації на курсі малорозмірного безекіпажного надводного судна при його русі в умовах вітро-хвильових збурень шляхом навчання штучної нейронної мережі, налаштованої на мінімальну кількість переключень керма судна, з використанням бази даних, сформованої шляхом математичного моделювання динаміки малорозмірного судна, що підвищує ефективність функціонування кермового пристрою судна;

удосконалено узагальнену структуру системи автоматичного керування системою «шноркель» надводно-підводного безекіпажного судна транспортного типу, яка забезпечує подачу повітря до теплового двигуна судна при його підводному русі, що забезпечує можливість його експлуатації у складних погодних умовах.

Наукове значення результатів роботи полягає у створенні науково-методологічної основи для швидкого та ефективного впровадження у вітчизняну галузь суднобудування нових знань та перспективних технічних рішень з комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден, що забезпечить технологічний суверенітет України.

Практичне значення результатів дослідження полягає в їх безпосередньому впливі на прискорений розвиток малого і середнього суднобудування України і, зокрема, процеси проектування систем автоматичного керування малорозмірних безекіпажних надводних суден.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем автоматичного керування малорозмірними надводними судами-роботами, призначеними для виконання науково-дослідницьких, транспортних та охоронних морських місій.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано її зв'язок з науковими програмами й темами, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та головні його задачі, представлено методи дослідження та обґрунтування достовірності отриманих результатів, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, відображено повноту викладення результатів у публікаціях та ступінь апробації на науково-технічних конференціях.

У першому розділі дисертації наведено загальні відомості про малорозмірне безекіпажне надводне судно, склад та структуру його обладнання як об'єкта керування, наведено результати аналізу сучасних систем автоматичного керування такими суднами та обґрунтовано завдання їх комплексної автоматизації. Сформовано мету та задачі дослідження.

Другий розділ дисертації присвячено викладенню та застосуванню принципів системного підходу та математичному моделюванню динаміки малорозмірного безекіпажного надводного судна, які утворюють методологічну основу його комплексної автоматизації. Сформульовані у результаті дослідження множина роботизованих морських місій, множина операцій по

проектуванню системи автоматичного керування судна, а також множини задач внутрішнього проектування судна утворюють інформаційне підґрунтя для створення безекіпажного судна як об'єкта керування, що призначений для природоохоронного моніторингу та охорони мілководних акваторій, їх очищення від небезпечних об'єктів антропогенного походження.

Третій розділ дисертації присвячений синтезу та дослідженню системи автоматичної стабілізації на курсі малорозмірного безекіпажного надводного судна як однієї з його задач внутрішнього проектування. Методом комп'ютерного експерименту досліджено ефективність ПД-, ПІД-, нечіткого та нейромережного регуляторів, які забезпечують автоматичну стабілізацію на курсі судна в умовах дії вітро-хвильових збурень. Наведено порівняльний аналіз ефективності цих регуляторів з точки зору точності швидкодії та мінімізації кількості перекладок стерна. Встановлено, що у порівнянні з ПД-регулятором кількість перекладок стерна судна про роботі ПІД-регулятора зменшується на 10-11%, а точність утримання на курсі суттєво покращується (до 21%). Застосування нечіткого регулятора дозволило вдвічі скоротити час перехідного процесу: з 60 секунд до 30 секунд, та значно підвищити точність утримання на заданому курсі. Встановлено, що нейромережний регулятор дає змогу регулювати припустиму величину відхилення судна від заданого курсу, в залежності від зовнішніх умов та режиму руху судна, що дає змогу адаптувати роботу автостернового пристрою судна у залежності від завдання місії та гідрокліматичних характеристик акваторії.

У четвертому розділі розглянуті питання автоматизації керування малорозмірним безекіпажним надводним судном як носієм корисного вантажу. На основі системного підходу запропоновано класифікацію корисного вантажу (засобів морської робототехніки) та показана доцільність його розміщення у спеціальних електрифікованих платформах – автоматичних контейнерах спеціальної конструкції. Запропоновано концепцію модульної автономії для створюваного дослідницького комплексу «Малорозмірне безекіпажне надводне судно – Корисний вантаж», яка передбачає контейнерне

транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу. Доповнено існуючу класифікацію морських безекіпажних апаратів шляхом внесення до неї малорозмірних безекіпажних надводно-підводних суден, що удосконалює науково-методичне підґрунтя для їх створення. Розроблено базову структуру обладнання системи «шноркель», яка забезпечує роботу теплового двигуна судна при підводному русі, та узагальнену структуру системи автоматичного керування такою системою енергетики, що утворює теоретичну основу для синтезу систем автоматичного керування енергетичним обладнанням надводно-підводного судна.

Ключові слова: малорозмірне безекіпажне надводне судно, рухомий об'єкт, система автоматичного керування, математичне моделювання, системний підхід, рівняння існування.

Публікації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Надточій В.А., Бурунін А.П. Системний підхід до розробки системи автоматичного керування безекіпажним патрульним катером для охорони мілководної захищеної акваторії. Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. – С. 57-66. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.057-066 (**фахове видання категорії «Б» України**).

2. Бурунін, А.П., Грудініна, Г.С. (2024). Застосування методів математичного моделювання для оптимізації параметрів налаштування авторульового. / Shipbuilding & marine infrastructure. НУК, № 2 (19) / 2024. С. 46-58. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.2\(19\).05](https://doi.org/10.15589/smi2024.2(19).05) (**фахове видання категорії «Б» України**).

3. Надточій В.А., Бурунін А.П. Задачі створення та критерії управління безекіпажного надводного катера для природоохоронних місій на мілководних морських акваторіях. / “Quality Control Tools and Techniques”, 2024. №1(52). – С. 53-65. DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-53-65. (**фахове видання категорії «Б» України**).

4. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безекіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. / ЗНП, 2024, № 4 (497). С. 131-140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19) **(фахове видання категорії «Б» України).**

5. Надточій , В. А., & Бурунін, А. П. (2025). Автоматизація керування корисним вантажем безекіпажного надводного катера для дослідження морського середовища. *Методи та прилади контролю якості*, (2(53). <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/650> **(фахове видання категорії «Б» України).**

6. Бурунін А.П. Особливості автоматизації безекіпажного надводно-підводного катера транспортного типу / Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 2 (29), 2024. – С. 35-48. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.035-048 **(фахове видання категорії «Б» України).**

7. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Стабілізація курсу малорозмірного безекіпажного судна з використанням штучної нейронної мережі // Науково-виробничий журнал "Електромеханічні і енергозберігаючі системи". – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2024. – № 4/2024 (67) – С. 38-44.. **(фахове видання категорії «Б» України).**

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Надточій В.А., Бурунін А.П. Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв автономних ненаселених підводних апаратів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». Херсон : Херсонська морська державна академія, 2022. – С. 83-87.

9. Надточій В.А., Бурунін А.П. Формулювання головних задач створення безекіпажних надводних суден на основі системного підходу. – Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2022. – С. 353-355.

10. Надточій В.А., Бурунін А.П. Завдання створення безпілотного надводного судна для дослідження водного середовища. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2023. – С. 41-42.

11. Надточій В.А., Бурунін А.П. Алгоритмічне забезпечення системи автоматичного керування безекіпажним надводним катером як носієм засобів морської робототехніки. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) [Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції (29–31 травня 2024 р., м. Одеса)]. – Одеса: Херсонська державна морська академія, 2024. – С. 237-239

12. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Оптимізація параметрів налаштування авторульового пристрою безекіпажного катера з застосуванням методів математичного моделювання. / Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2024. – С. 968-971

13. Burunin, A., 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: зб. матеріалів I Міжн. науково-практ. конф. – Одеса: ОНМУ,.- С. 22-25.

14. Андрій Бурунін, Ганна Грудініна. (2024) Аналіз роботи нечіткого регулятора у якості авторульового швидкісного катеру. The 10th International scientificand practical conference “Computer-integrated technologies of automation of technological processes” (November 05 – 08, 2024) Hamburg, Germany. International Science Group. 2024. P. 272-276. ISBN – 979-8-89504-798-9 DOI– 10.46299/ISG.2024.2.10

15. Бурунін А.П. Структура системи автоматичного керування безекіпажним патрульним катером. – Modern problems of humanity and scientific ways of solving them. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Bergen, Norway. August 27 – 30, 2024. Pages 168-172.

ABSTRACT

Burunin A.P. Complex automation of control processes of a small-sized unmanned surface vessel. - Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies (Field of knowledge 15 - Automation and instrument-making). - Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolaiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the current applied scientific problem of creating a scientific and methodological basis for the complex automation of small-sized unmanned surface vessels as a component of the innovative development of domestic shipbuilding.

The relevance of the dissertation research is due to the need for rapid and effective implementation of the latest achievements of robotics, artificial intelligence and operational control into maritime practice, the need to form a domestic market for advanced marine unmanned transport, environmental protection, security and defense technologies, and the need to develop and implement highly efficient ship automation systems for small and medium-sized shipbuilding in Ukraine.

The purpose of the dissertation work is to develop a scientific and methodological basis and technical solutions for the complex automation of control processes of a small unmanned surface vessel based on a systems approach, which ensures increased efficiency of its operation and the use of payload for its intended purpose.

The scientific novelty of the results obtained in the dissertation is as follows:

for the first time, based on the application of a systems approach and the methodology of existence equations, a general set of basic tasks for the external and internal design of a small-sized unmanned surface vessel as an object of automatic

control and a set of tasks for its complex automation have been formed, which forms the scientific and methodological basis for the design of the vessel, reduces the duration and improves the quality of design work;

for the first time, based on the application of a systems approach, a concept of modular autonomy of the research complex "Unmanned Surface Vessel - Payload" as an object of automatic control has been proposed, which provides for container transportation, storage and use of the payload, and generalized payload control algorithms have been developed as a theoretical basis for the effective use of such means of marine robotics for research of the marine environment;

the classification of marine robotics equipment was further developed by introducing into its composition an unmanned surface-underwater vessel of environmental protection purpose and a set of tasks for the synthesis of its automatic control system, which forms the scientific and methodological basis for the complex automation of marine robotics equipment of this class;

the neural network stabilization system on the course of a small unmanned surface vessel during its movement in conditions of wind and wave disturbances was further developed by training an artificial neural network configured for the minimum number of vessel rudder shifts, using a database formed by mathematical modeling of the dynamics of a small vessel, which increases the efficiency of the vessel's steering device;

the generalized structure of the automatic control system of the "snorkel" system of a transport-type unmanned surface-underwater vessel, which provides air supply to the vessel's thermal engine during its underwater movement, which ensures the possibility of its operation in difficult weather conditions, was improved.

The scientific significance of the results of the work lies in creating a scientific and methodological basis for the rapid and effective introduction into the domestic shipbuilding industry of new knowledge and promising technical solutions for the complex automation of small-sized unmanned surface vessels, which will ensure the technological sovereignty of Ukraine.

The practical significance of the research results lies in their direct impact on the accelerated development of small and medium-sized shipbuilding in Ukraine and, in particular, the processes of designing automatic control systems for small-sized unmanned surface vessels.

The results of the research can be used in the development of automatic control systems for small-sized surface robot vessels intended for performing scientific research, transport and security maritime missions.

The introduction of the dissertation substantiates the relevance of the research topic, shows its connection with scientific programs and topics, formulates the object and subject of the research, the goal and its main tasks, presents the research methods and justification of the reliability of the obtained results, determines the scientific novelty and practical significance of the results of the work, reflects the completeness of the presentation of the results in publications and the degree of testing at scientific and technical conferences.

The first section of the dissertation provides general information about the small-sized unmanned surface vessel, the composition and structure of its equipment as a control object, presents the results of the analysis of modern automatic control systems for such vessels and justifies the tasks of their complex automation. The goal and tasks of the research are formed.

The second section of the dissertation is devoted to the presentation and application of the principles of the system approach and mathematical modeling of the dynamics of a small-sized unmanned surface vessel, which form the methodological basis of its complex automation. The set of robotic sea missions, the set of operations for designing the automatic control system of the ship, as well as the set of internal design tasks of the ship formulated as a result of the research form the information basis for creating an unmanned vessel as a control object intended for environmental monitoring and protection of shallow water areas, their cleaning from dangerous objects of anthropogenic origin.

The third section of the dissertation is devoted to the synthesis and study of the system of automatic stabilization on the course of a small-sized unmanned

surface vessel as one of its internal design tasks. The effectiveness of PD, PID, fuzzy and neural network controllers, which provide automatic stabilization on the course of the vessel under the action of wind and wave disturbances, is investigated using the method of a computer experiment. A comparative analysis of the effectiveness of these controllers is presented in terms of accuracy of speed and minimization of the number of rudder shifts. It was found that, in comparison with the PD regulator, the number of ship rudder shifts during the operation of the PID regulator is reduced by 10-11%, and the accuracy of course keeping is significantly improved (up to 21%). The use of a fuzzy regulator allowed to halve the time of the transition process: from 60 seconds to 30 seconds, and significantly increase the accuracy of course keeping. It was found that the neural network regulator allows you to adjust the permissible deviation of the ship from the given course, depending on the external conditions and the ship's movement mode, which makes it possible to adapt the operation of the ship auto-steering device depending on the mission task and the hydroclimatic characteristics of the water area.

The fourth section considers the issues of automation of control of a small-sized unmanned surface vessel as a carrier of payload. Based on the system approach, a classification of payload (marine robotics) has been proposed and the feasibility of its placement in special electrified platforms – automatic containers of a special design has been shown. A concept of modular autonomy has been proposed for the research complex being created “Small-sized unmanned surface vessel – Payload”, which provides for container transportation, storage and use of the payload. The existing classification of marine unmanned vehicles has been supplemented by introducing small-sized unmanned surface-submarine vessels into it, which improves the scientific and methodological basis for their creation. The basic structure of the equipment of the “snorkel” system, which ensures the operation of the vessel’s thermal engine during underwater movement, and the generalized structure of the automatic control system for such an energy system have been developed, which forms a theoretical basis for the synthesis of automatic control systems for the energy equipment of a surface-submarine vessel.

Keywords: small unmanned surface vessel, moving object, automatic control system, mathematical modeling, systems approach, equation of existence.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗЕКІПАЖНИЙ НАДВОДНИХ СУДЕН І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	22
1.1 Загальні відомості про малорозмірне безекіпажне надводне судно	22
1.2 Склад та структура обладнання малорозмірного безекіпажного надводного судна як об'єкта керування	28
1.3 Огляд і аналіз сучасних систем автоматичного керування малорозмірними безекіпажними надводними суднами	33
1.4 Комплексна автоматизація МБНС як магістральний шлях підвищення його ефективності	36
1.5 Постановка задачі дослідження	44
Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МАЛОРОЗМІРНОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА ЙОГО КОМПЛЕКСНОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ	48
2.1 Методологія системного підходу та її застосування для комплексної автоматизації МБНС	48
2.2 Задачі створення та критерії управління безекіпажного надводного судна на мілководних морських акваторіях (на прикладі катера для природоохоронних місій)	50
2.3 Формування головних задач та основних режимів роботи МБНС	63
2.4 Математичне моделювання динаміки МБНС як інструментарій оцінки ефективності функціонування автостернового пристрою судна	69
Висновки до розділу 2	72

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ НА КУРСІ МАЛОРОЗМІРНОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА	74
3.1 Автоматична стабілізація на курсі як складова завдання комплексної автоматизації МБНС	74
3.2 Дослідження процесів стабілізації МБНС на курсі із застосуванням ПД-, ПД- та нечіткого регуляторів з традиційними налаштуваннями	76
3.3 Удосконалення ПД- та нечіткого регулятора курсу МБНС та дослідження впливу зовнішніх збурень на якість стабілізації судна на курсі	88
3.4 Стабілізація курсу малорозмірного безекіпажного судна з використанням штучної нейронної мережі	100
Висновки до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИМ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ ЯК НОСІЄМ ЗАСОБІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ	111
4.1 Загальні зауваження	111
4.2 Розробка множини алгоритмів керування МБНС як носієм бортових засобів морської робототехніки	112
4.3 Автоматизація керування корисним вантажем МБНС науково-дослідницького та природоохоронного призначення	116
4.4 Особливості автоматизації малорозмірного безекіпажного надводно-підводного судна транспортного типу	130
Висновки до розділу 4	147
ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	154
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи	169
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АКС	– автоматичний контейнер спеціальний
АПА	– автономний підводний апарат
БЛА	– безпілотний літаючий апарат
БНС	– безекіпажне надводне судно
БПА	– буксируваний підводний апарат
БЦК	– береговий центр керування
ВМС	– виконавчий механізм стерна
ВПМ	– вантажний пристрій маніпуляційний
ЗМР	– засіб морської робототехніки
КВ	– корисний вантаж
МБНС	– малорозмірне безекіпажне надводне судно
МБНПС	– малорозмірне безекіпажне надводно-підводне судно
НБЧ	– надводний безекіпажний човен
ООКП	– обчислювач оптимального кута перекладки стерна
ПД	– пропорційно-диференційний регулятор
ПІД	– пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор
СЕЕС	– суднова електроенергетична система
САК	– система автоматичного керування
СПП	– спуско-підйомний пристрій
СППА	– самохідний прив'язний підводний апарат
ТЗ	– технічне завдання
ІНМ	– штучна нейронна мережа

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуального прикладного наукового завдання створення науково-методологічного підґрунтя комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден (МБНС) як складової інноваційного розвитку вітчизняного суднобудування.

Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена наступними чинниками, стратегічно важливими для водотранспортної галузі України:

необхідність швидкого та ефективного впровадження у морську практику новітніх досягнень робототехніки, штучного інтелекту та оперативного керування;

необхідність формування внутрішнього ринку передових морських безекіпажних транспортних, природоохоронних, охоронних та оборонних технологій;

необхідність розробки і впровадження високоефективних систем автоматизації суден для малого і середнього суднобудування України.

Таким чином, комплексна автоматизація МБНС — це не просто технологія, а ключовий інструмент модернізації українського суднобудування, що поєднує економіку, безпеку, науку та освіту в єдину систему інноваційного розвитку галузі.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках Угоди про наукове та науково-технічне співробітництво з Державним науково-дослідним інститутом випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки та в рамках госпдоговірної науково-дослідної роботи №2358 «Розробка концепції та організаційно-технічних вимог до проектування і будівництва засобів морської робототехніки оборонного призначення», шифр «ЗМР-1».

Метою дослідження є розробка науково-методологічного підґрунтя та технічних рішень комплексної автоматизації процесів керування малорозмірним безекіпажним надводним судном на основі системного

підходу, що забезпечує підвищення ефективності його функціонування та застосування корисного вантажу за призначенням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні науково-технічні завдання:

формування науково-методологічних основ комплексної автоматизації МБНС на принципах системного підходу;

вдосконалення технічних рішень щодо систем автоматичного керування МБНС, націлених на підвищення морехідності таких суден;

розширення складу МБНС за рахунок нового виду МБНС – малорозмірного безекіпажного надводно-підводного судна, та розробка системи автоматичного керування ним;

удосконалення систем автоматичного керування корисним вантажем МБНС як головним інструментом для реалізації безлюдних технологій дослідження й охорони територіальних вод України.

Об'єкт дослідження: процеси керування малорозмірним безекіпажним надводним судном та його корисним вантажем в умовах автономного функціонування.

Предмет дослідження: науково-методологічні основи комплексної автоматизації МБНС, закони керування, алгоритми, структури та технічні засоби комплексної автоматизації процесів керування МБНС.

Методи дослідження: системний підхід і теорія множин – для формування науково-методологічних основ комплексної автоматизації МБНС; теорія автоматичного керування, теорія нечіткої логіки та штучних нейронних мереж – для синтезу систем автоматичного керування МБНС; методи математичного моделювання – для формалізації опису МБНС як об'єкту керування; методи комп'ютерного експерименту – для перевірки ефективності функціонування синтезованих систем автоматичного керування МБНС.

Наукова новизна отриманих результатів:

вперше на основі застосування системного підходу та методології рівнянь існування сформовано генеральну множину основних задач зовнішнього і внутрішнього проектування малорозмірного безекіпажного надводного судна як об'єкта автоматичного керування та множину задач його комплексної автоматизації, що утворює науково-методологічну основу проектування судна, скорочує тривалість та підвищує якість проектних робіт;

вперше на основі застосування системного підходу запропоновано концепцію модульної автономії дослідницького комплексу «Безекіпажний надводний катер – Корисний вантаж» як об'єкту автоматичного керування, яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу, та розроблено узагальнені алгоритми керування корисним вантажем як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища;

отримали подальший розвиток класифікація засобів морської робототехніки шляхом уведення до її складу надводно-підводного безекіпажного судна природоохоронного призначення та множина задач синтезу його системи автоматичного керування, що утворює науково-методологічну основу комплексної автоматизації засобів морської робототехніки такого класу;

отримала подальший розвиток нейромережна система стабілізації на курсі малорозмірного безекіпажного надводного судна при його русі в умовах вітро-хвильових збурень шляхом навчання штучної нейронної мережі, налаштованої на мінімальну кількість перекладок керма судна, з використанням бази даних, сформованої шляхом математичного моделювання динаміки малорозмірного судна, що підвищує ефективність функціонування кермового пристрою.

удосконалено узагальнену структуру системи автоматичного керування системою «шноркель» надводно-підводного безекіпажного судна транспортного типу, яка забезпечує подачу повітря до теплового двигуна

судна при його підводному русі, що забезпечує можливість його експлуатації у складних погодних умовах.

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується: коректністю постановки завдань дослідження, використанням апаратно-програмного моделюючого комплексу Cotmacs AP Lab та коректністю проведення комп'ютерних експериментів з перевірки ефективності функціонування синтезованих регуляторів МБНС.

Наукове значення результатів роботи полягає в тому, що вони утворюють науково-методологічну основу для швидкого та ефективного впровадження у вітчизняну галузь суднобудування нових знань та перспективних технічних рішень з комплексної автоматизації МБНС, що забезпечить технологічний суверенітет України.

Практичне значення результатів дослідження полягає в їх безпосередньому впливі на прискорений розвиток малого і середнього суднобудування України і, зокрема, процеси проектування систем автоматичного керування МБНС.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем автоматичного керування малорозмірними надводними судами-роботами, призначеними для виконання науково-дослідницьких, транспортних та охоронних морських місій.

Особистий внесок здобувача. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: у [1] – сформовано множину основних режимів функціонування МБНС та множину головних задач, які має реалізувати система автоматичного керування судно, а також запропоновано узагальнену функціональну схему системи автоматичного керування судном; у [2] – підготовлено і проведено комп'ютерний експеримент та виконано аналіз його результатів; у [3] – сформульовано та науково обґрунтовано множину основних задач щодо зовнішнього і внутрішнього проектування МБНС та запропоновано генеральну множину основних робіт для етапу внутрішнього проектування судна; у [4] – підготовлено і проведено

комп'ютерний експеримент та виконано аналіз його результатів; у [5] – запропоновано класифікацію корисного вантажу та концепцію модульної автономії для безекіпажного дослідницького комплексу, а також розроблено основні складові конструкцій автоматичних контейнерів та узагальнені алгоритми керування ними; у [7] – розроблено структуру регулятора для стабілізації руху МБНС на заданому курсі з використанням штучної нейронної мережі та опрацьовано результати його роботи.

Відомості про апробацію результатів дослідження. Основні положення і результати досліджень обговорювалися і отримали позитивні відгуки на 8 міжнародних науково-технічних конференціях: «Інновації в суднобудування та океанотехніці», 2022-2024 рр., м. Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова; «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 2022 р. і 2024 р., м. Херсон, Херсонська державна морська академія; «The 10th International scientific and practical conference “Computer-integrated technologies of automation of technological processes”», 2024 р., Hamburg, Germany; «The XXXIV International Scientific and Practical Conference», 2024 р., Bergen, Norway; I Міжн. науково-практ. конф. Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання. 2024 р., м. Одеса, Одеський національний морський університет.

Публікації. Основні положення та результати досліджень висвітлені у 15 друкованих наукових працях, у тому числі у 7 періодичних наукових фахових виданнях України категорії «Б» (1 стаття – одноосібно).

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 119 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 173 сторінок, у тому числі 44 рисунки і 27 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ МАЛОРОЗМІРНИХ БЕЗЕКІПАЖНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальні відомості про малорозмірне безекіпажне надводне судно

Безекіпажні надводні судна (БНС, в англomовній літературі – Unmanned Surface Vehicles – USVs або Maritime Autonomous Surface Ships – MASS) знаходять все більше застосування при виконанні завдань з морських транспортних перевезень, патрулювання, картографування, дослідження водних ресурсів та наукових досліджень, природоохоронних робіт та робіт із забезпечення морського права на морі у провідних морських країнах світу [1-2]. Створення та впровадження у морську практику такого виду морських суден на сьогодні оцінюється як магістральний напрямок розвитку водного транспорту [3].

У порівнянні з традиційними суднами БНС мають наступні переваги:

- можуть виконувати більш тривалі й небезпечні місії;
- мають нижчі витрати на технічне обслуговування та екіпажі для керування;
- мають малу вагу та невеликі розміри, що забезпечує підвищену маневреність і можливості розгортання на мілководних акваторіях (річкових й прибережних районах), де більші кораблі не можуть ефективно діяти;
- мають більшу потенційну вантажопідйомність і можливість дистанційно виконувати типові морські операції.

Виходячи з особливостей територіального моря та внутрішніх вод України та з урахуванням викликів сьогодення особливої уваги заслуговують малорозмірні безекіпажні надводні судна (МБНС (в англomовній літературі – Unmanned Surface Boats, USB, або Small Unmanned Surface Vessel SUSV), які характеризуються мобільністю, низькою вартістю та широким спектром задач,

які вони здатні вирішувати. Інтеграція сучасних сенсорних систем, засобів зв'язку та автономного керування дає змогу ефективно використовувати ці судна в автономному режимі в умовах складного морського середовища.

Для територіальних вод України це можуть бути місії з комплексного вивчення гідрофізичних та гідохімічних властивостей внутрішніх морів, озер, річок та інших внутрішніх водоймищ, дослідження наслідків техногенних катастроф на річкових інженерних спорудах, гуманітарне розмінування акваторій для забезпечення безпечного судноплавства та інших.

Узагальнюючи вимоги міжнародних класифікаційних товариств констатуємо, що маломірні судна – це самохідні плавальні засоби з потужністю головного двигуна 55 кВт або 75 к.с., несамохідні та вітрильні судна загальною місткістю менше 80 реєстрових тонн, моторні судна з двигунами будь-якої потужності, але валовою місткістю не більше 10 реєстрових тон.

Зазначимо, що в останні роки у зв'язку з високими темпами розвитку безекіпажних суден різного призначення термінологія цього виду морської робототехніки перебуває на етапі свого становлення. Тому у дисертації у якості об'єкту дослідження прийнято малорозмірне безекіпажне надводне судно (МБНС, яке об'єднує всі види плавзасобів, довжина яких не перевищує 24 метри згідно Регістру судноплавства України [4].

Аналіз науково-технічної літератури [5, 6] свідчить, що класифікація МБНС знаходиться на початковій стадії розвитку, тому на основі загального аналізу досвіду створення й застосування безекіпажних суден можна запропонувати наступну попередню класифікацію МБНС:

за розмірами:

- надмалі судна (довжина < 1 м);
- малорозмірні судна (1–7 м);
- судна середнього розміру (7–20 м);

за призначенням:

науково-дослідні (океанографічні дослідження);

промислові (офшорні операції, транспортні місії);
природоохоронні (екологічний моніторинг, ліквідація наслідків екологічних катастроф);

рятувальні (пошук і рятування, ліквідація аварійних ситуацій на морі);

воєнні (ударні, розвідувальні, патрульні, протимінні);

за ступенем автономності:

- дистанційно керовані оператором з берегового центру керування (БЦК);

- автоматизовані (коли частина функцій керування виконується автоматично, тобто без втручання оператора БЦК, а інша частина операцій потребує контролю з боку оператора);

- автоматичні (коли керування МБНС повністю виконується бортовою системою керування);

за архітектурою корпусу:

- однокорпусні;

- катамарани;

- тримарани;

за джерелом бортової енергії:

електричні;

дизельні,

сонячні;

гібридні;

за типом рушійної системи:

гвинтові (традиційні гвинтові двигуни);

водоетні (реактивні рушії);

вітрові (вітрильні конструкції для довготривалих місій);

хвильові (використовується енергія морських хвиль);

біонічні.

Деякі типові МБНС за даною класифікацією показано на рис. 1.1.



а – науково-дослідне (Канада)



б – науково-дослідне (США)



в – пасажирське (США)



г – протимінне (США)



д – оборонне одноразове (Україна)



е – транспортне (Австралія)



ж – протимінне (Франція)



з – оборонне (Туреччина)

Рисунок 1.1 – Малорозмірні безкіпажні надводні судні

Розглянемо тепер основні сфери застосування МБНС. Аналіз літератури [7-9] свідчить, що найбільш затребуваними є наступні три сфери застосування МБНС:

науково-дослідницька сфера – океанографія (гідротермодинаміка, акустики та оптика водного середовища) та батиметрія (побудова високоточних карт морського дна), моніторинг біорізноманіття (спостереження за морською флорою і фауною);

виробнича сфера – екологічний моніторинг: вимірювання параметрів водного середовища (температура, солоність, рН, наявність забруднень), інспекція гідротехнічних споруд (автономне обстеження мостів, дамб, нафтопроводів тощо), логістика (доставка вантажів до важкодоступних районів чи об'єктів), пошуково-рятувальні операції (використання в умовах ризику для людини) [10];

оборонна сфера: розвідка та спостереження (збір інформації в режимі реального часу за допомогою оптичних, інфрачервоних та радіолокаційних датчиків), боротьба мінами (виявлення, класифікація та знешкодження морських мін), бойове застосування (транспортування воєнних вантажів, ударні операції, охорона акваторій та портів, патрулювання та інспекція об'єктів).

Основними підсистемами МБНС як твердого тіла, що виконує керований рух у водному середовищі, є:

енергетичний модуль (акумулятори, генератори);
рушійно-кермовий комплекс (гвинти, водомети, керма);
навігаційна система (GPS/ГЛОНАСС), інерціальні модулі, гірокомпаси);
комунікаційна система (радіоканал, супутниковий зв'язок, ретрансляція);

система керування (бортовий комп'ютер, автопілот, алгоритмічне та програмне забезпечення);

модулі корисного вантажу (контейнери, змінні прилади тощо).

Загальновизнаними є наступні експлуатаційні переваги МБНС у порівнянні з іншими плавзасобами:

низькі експлуатаційні витрати – відсутність екіпажу забезпечує економію на витратах, пов'язаних із зарплатою, житлом та соціальними виплатами екіпажу, а також можливість здійснювати рейси без перерв на відпочинок екіпажу, що дозволяє підвищити ефективність та продуктивність транспортних перевезень;

безпека та мінімізація людських помилок – людський фактор часто є причиною аварій на морі, і автоматизація може знизити цей ризик;

екологічність – такі судна можуть бути спроектовані так, щоб мінімізувати викиди в довкілля шкідливих речовин, використовувати відновлювальні джерела енергії (наприклад, вітрові чи сонячні панелі);

можливість роботи в складних і небезпечних умовах – такі судна можуть працювати у районах з високими рівнями радіації, екологічного забруднення або в зонах, де присутність людей небезпечна (наукові дослідження в екстремальних умовах, рятувальні операції);

автономність та самостійність – завдяки високому рівню автоматизації, такі судна можуть самостійно орієнтуватися на маршруті, уникати перешкод, а також приймати рішення на основі даних з датчиків і відеокамер, що дозволяє їм працювати без постійного контролю з боку людей.

Разом з цим, МБНС мають низку недоліків, які необхідно подолати для ефективного впровадження безекіпажних суден у морську практику:

надійність функціонування – технічна несправність будь-якої системи МБНС може призвести до серйозних аварій; хоча технології будівництва суден та їх компонентів постійно удосконалюються, надійність безекіпажних систем ще потребує вдосконалення, особливо при експлуатації в складних умовах;

правова складова експлуатації МБНС – на цей час поки відсутні чіткі нормативні акти та міжнародні правила для безекіпажних суден; наприклад, є невирішені питання відповідальності у випадку аварії за участю МБНС;

організація спеціалізованої берегової інфраструктури для обслуговування МБНС – будівництво нових портів і терміналів, засобів зв'язку та моніторингу акваторій, розробка додаткових систем для взаємодії з іншими суднами і береговими службами;

кібербезпека МБНС – оскільки безекіпажні судна сильно залежні від програмного забезпечення, навігаційних і комунікаційних систем, вони можуть бути вразливими до хакерських атак або збоїв у системах, що може призвести до крадіжки даних або несанкціонованого захоплення судна;.

соціальні питання (питання трудової зайнятості) – заміна людського екіпажу на автоматизовані системи може призвести до скорочення робочих місць, особливо в морських портах та судноплавстві, що створить соціальні та економічні проблеми для працівників;

обмежена адаптивність в екстремальних умовах – хоча безекіпажні судна можуть працювати в більшості умов, вони все ще можуть стикатися з проблемами в екстремальних ситуаціях, де людська інтуїція і досвід можуть бути необхідними для прийняття швидких рішень.

1.2 Склад та структура обладнання малорозмірного безекіпажного надводного судна як об'єкта керування

З огляду на зростаючі потреби у підвищенні мобільності, автономності та зниженні ризиків для особового складу, безекіпажні надводні судна набувають особливого значення в сучасних умовах морських наукових досліджень, морського патрулювання та охорони критичної інфраструктури, ведення оборонних дій на морі. Будучи технічним об'єктом з обмеженими розмірами та енергетичними ресурсами, МБНС вимагає спеціального підходу до структуризації його обладнання з урахуванням функцій, що мають виконуватися у повністю автономному або дистанційно-керованому режимі.

Обладнання МБНС з позицій автоматизації керування доцільно класифікувати за такими ознаками [11-14]:

навігаційна система (НС): GPS/GNSS-приймачі, інерційна навігаційна система (INS), гіроскопи, компас, лог, ехолот;

система руху (СР): електродвигуни або двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), гвинторульові комплекси, керовані стерна, водомети тощо;

енергетична система (ЕС): акумулятори, генератори, джерела живлення резервного типу, системи заряджання;

система автоматичного керування (САК): бортовий комп'ютер (центральний або графічний процесор CPU/GPU), контролери руху, модулі логіки ухилення/виявлення перешкод;

сенсорна система (СС): радіолокатори, камери денного та нічного бачення, лідари, гідроакустичні сенсори (в умовах мілководдя);

система зв'язку (СЗ): системи радіозв'язку, супутникові комунікації, ретранслятори, телеметрія;

система самодіагностики (ССД): контролери критичних станів, датчики температури, вологості, перевантаження, автоматичні вимикачі живлення;

система корисного вантажу (СКВ): наукові та природоохоронні модулі, комплекси радіоелектронної боротьби, безекіпажні підводні, надводні та авіаційні роботи (опційно).

Розглянемо тепер структуру керованої функціональної взаємодії вказаних систем.

З огляду на необхідність автономного прийняття рішень, структура обладнання МБНС як об'єкта керування базується на модульно-ієрархічному принципі [15] з виділенням наступних рівнів:

інформаційно-вимірювальний рівень – обробка первинних даних з сенсорів і перетворення їх у навігаційно-керуючі параметри;

рівень прийняття рішень – функціонування інтелектуального ядра системи керування МБНС, яке виконує траєкторне планування, ухилення від перешкод, адаптивне керування;

рівень виконавчих систем – приводи основних та допоміжних виконавчих механізмів МБНС (рульові та палубні механізми тощо);

рівень бортових джерел енергії;

рівень зв'язку – забезпечення обміну даними між МБНС та БЦК або іншими керуючими платформами (у мережевій архітектурі).

Функціонування зазначених підсистем забезпечується при дотриманні наступних принципів:

компактність і модульність – для зручності модернізації та ремонту;

надійність у морському середовищі – захист від корозії, гідроізоляція, температурна витривалість;

стійкість до електромагнітних завад – особливо важливо для бойових платформ;

резервування критичних підсистем – мінімізація ризику втрати керування.

Узагальнену структуру обладнання МБНС як об'єкта керування доцільно представити у вигляді блок-схеми, де кожна система взаємодіє із центральним обчислювальним модулем через цифрові або аналогові інтерфейси (рис. 1.2).

Інформаційно-вимірювальний рівень призначений для збору даних про навколишнє середовище, положення МБНС у просторі та його технічний стан. До основних компонент цього рівня входять:

GPS/GNSS-модуль – визначає координати судна з точністю до кількох метрів;

інерційна навігаційна система – забезпечує оцінку положення та орієнтації при втраті інформації від GPS;

гіроскоп та акселерометр – відстежують кути крену, диференту, прискорення судна;

відеокамери, радар та лідар – призначені для виявлення об'єктів, навігації в умовах обмеженої видимості;

ехолот – вимірює поточну глибину під корпусом судна;

технічні датчики виконавчих механізмів МБНС (температура, заряд, струм тощо) – контролюють стан енергосистеми та критичних вузлів судна.

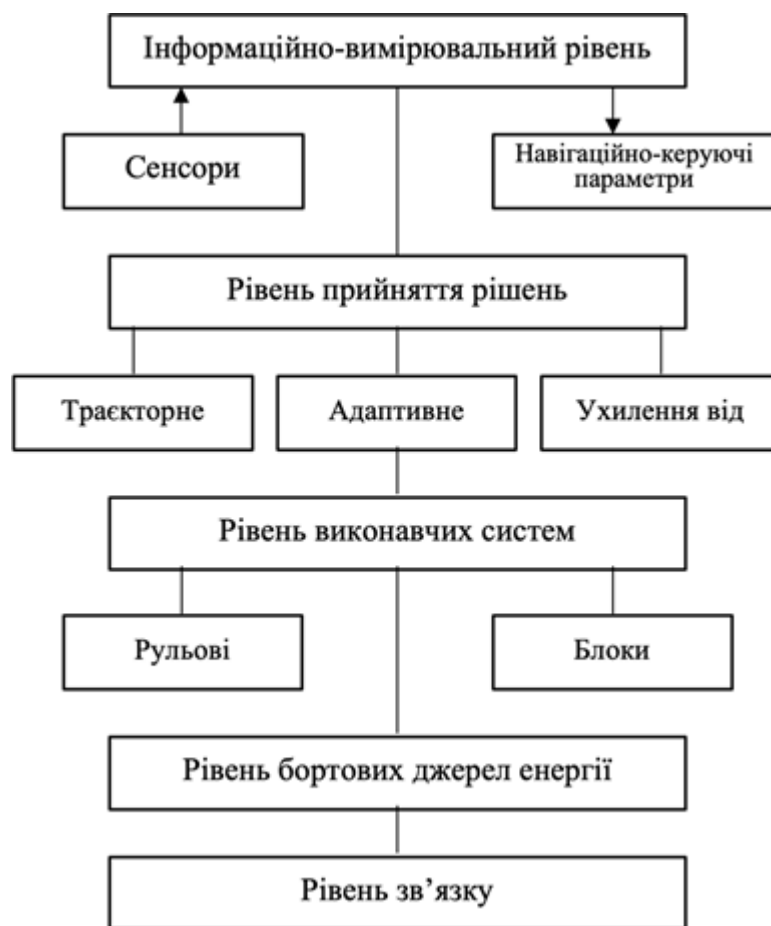


Рисунок 1.2 – Узагальнена структура обладнання МБНС як об'єкта керування

Рівень прийняття рішень призначений для обробки даних, планування місії, ухвалення рішень щодо керування та навігації МБНС. До основних компонент цього рівня входять:

бортовий комп'ютер / процесор – центральний блок керування з ОС реального часу;

модулі керування рухом – реалізують алгоритми стабілізації, траєкторного руху МБНС;

система ухилення від перешкод – аналізує навколишню обстановку, коригує курс у разі виявлення навігаційної перешкоди;

програма самодіагностики – виявляє збої, приймає рішення щодо керування МБНС за аварійним сценарієм;

інтерфейси зв'язку з виконавчими механізмами та сенсорами МБНС (інтерфейси CAN, UART, Ethernet).

Виконавчий рівень призначений для реалізація команд, отриманих з рівня прийняття рішень.

До основних компонент цього рівня входять:

гребний електродвигуни та/чи двигун внутрішнього згоряння – основне джерело рушійної сили.

рушії (гвинти, водомети) та стерновий пристрій – реалізують обертальні або векторні маневри МБНС та його просторовий рух;

драйвери потужності – модулі для передачі керуючих сигналів з процесора на виконавчі механізми;

актуатори допоміжних систем судна – системи запуску корисного вантажу, палубні механізми постановки буїв тощо.

Рівень зв'язку призначений для забезпечення обміну даними між МБНС та БЦК або іншими суднами або центрами керування.

До основних компонент цього рівня входять:

модулі радіозв'язку (UHF/VHF) – стандартні коротко- та середньохвильові передавачі;

супутникові модулі (Starlink, Iridium) – для зв'язку на великі відстані або для роботи на віддалених акваторіях;

передавач телеметрії – надсилає до БЦК інформацію про технічний стан судна та про навігаційну обстановку на робочій акваторії в реальному часі;

приймач команд оператора БЦК – дає змогу переходити до дистанційного керування у разі потреби.

Дані з інформаційно-вимірювального рівня надходять до рівня прийняття рішень, де відбувається їх фільтрація, обробка та інтерпретація.

Рівень прийняття рішень формує керуючі сигнали до механізмів. Виконавчого рівня.

У разі отримання зовнішньої команди або запиту, рівень зв'язку передає її до рівня прийняття рішень.

Кожен рівень має зворотний зв'язок — для моніторингу успішності виконання та аварійного повідомлення.

1.3 Огляд і аналіз сучасних систем автоматичного керування малорозмірними безекіпажними надводними суднами

Малорозмірні безекіпажні надводні судна відіграють усе більшу роль у морських операціях як цивільного, так і військового характеру. Їх використання дозволяє зменшити ризик для життя екіпажу, забезпечити тривале патрулювання, автоматизоване дослідження та оперативне реагування в критичних зонах. Центральним елементом ефективного функціонування БНС є система автоматичного керування (САК), яка забезпечує автономність, адаптивність і надійність у складних морських умовах.

Проблемам синтезу САК для МБНС присвячено значну кількість наукових публікацій [16-19].

Так, у статті [16] досліджено САК безекіпажного судна з вітрильною установкою. Авторами розроблено відносно прості алгоритми керування для симетричних аеродинамічних профілів жорстких вітри. Однак, питання повної автоматизації такого судна у статті не розглядаються.

У статті [17] представлено огляд 9-ти різних підходів до синтезу МБНС з метою підвищення ефективності стабілізації на курсі (рис. 1.3).

Авторами було досліджено САК на основі ПІД-регулятора, адаптивну систему керування зі зворотним кроком керування, нечіткий регулятор та інші.

Отримані результати свідчать про перспективність побудови САК для курсової стабілізації МБНС на основі нечітких та нейромережних регуляторів.

Проте, завдання повної автоматизації БНС автори не розглядали.

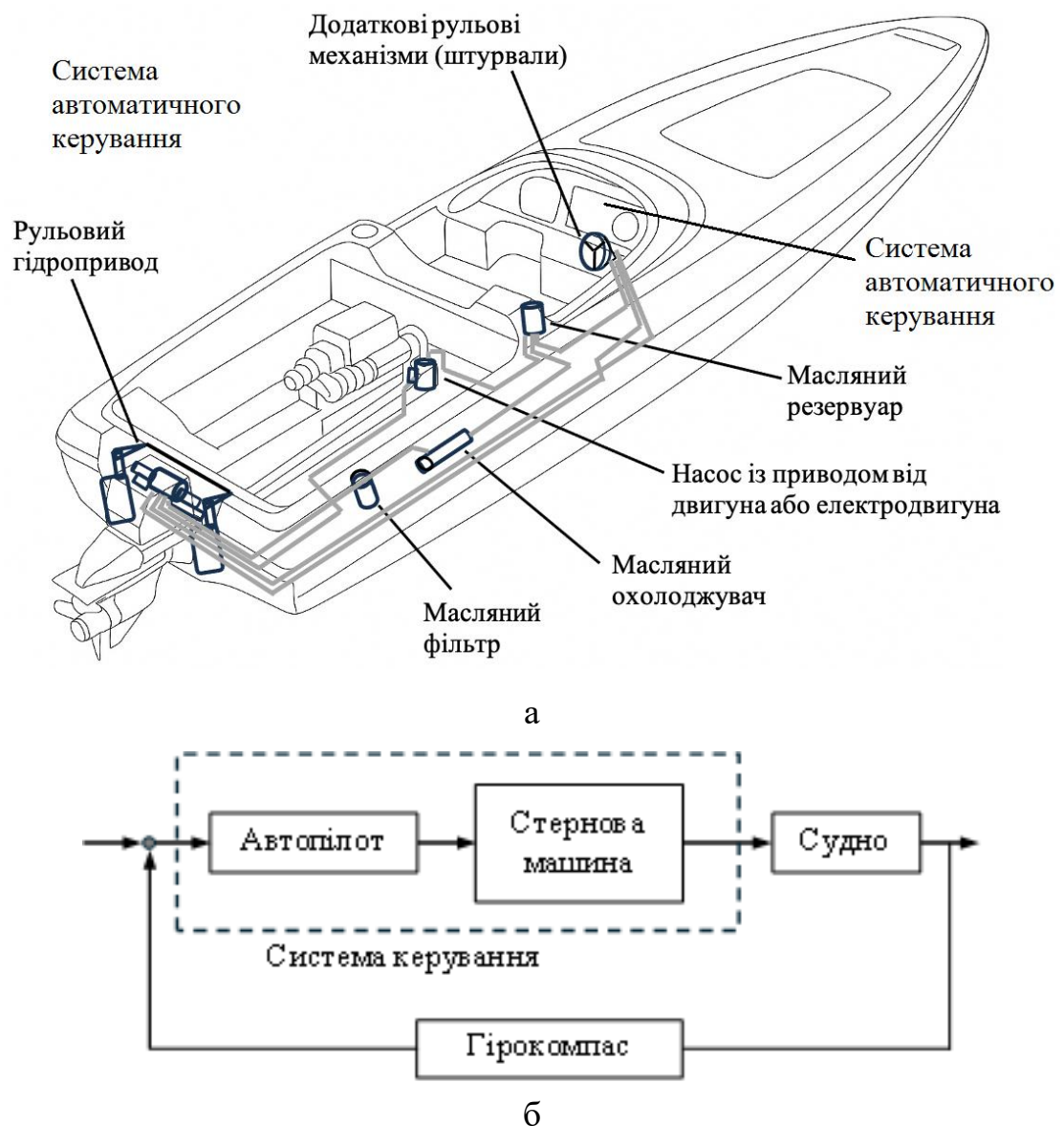


Рисунок 1.3 – МБНС як об’єкт керування (а) та його САК (б) за [17]

У статті [18] представлено адаптивний метод керування БНС зі спостерігачем завад, який використовує адаптивний закон для оцінки та компенсації помилки спостерігача.

Структурна схема САК БНС показана на рис. 1.4.

Результати моделювання роботи САК ілюструють ефективність запропонованого контролера, який може реалізувати відстеження траєкторії з систематичною невизначеністю та змінними в часі збуреннями. Однак, поза увагою авторів залишились питання комплексної автоматизації БНС як носія корисного вантажу різного призначення.

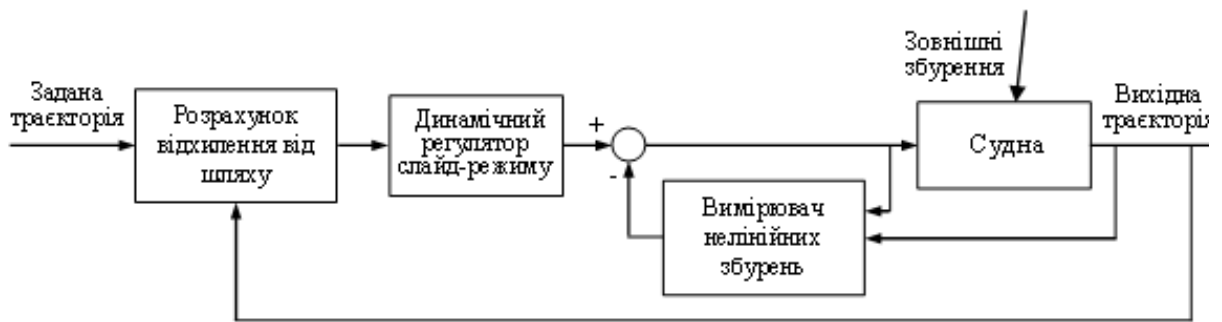


Рисунок 1.4 – Структурна схема САК БНС за [18]

У роботі [19] представлено результати огляду та аналізу сучасних систем керування траєкторією БНС. Автори відзначають, що система контролю за маршрутом є однією з основних вимог для автономних кораблів, оскільки вона гарантує, що судно може відстежувати заздалегідь визначений шлях з невеликими похибками перехресного шляху. Автори надають огляд керівних законів і контролерів для БНС та аналізують найбільш використовувані технології для керування маршрутом БНС. Однак, питання автоматизації БНС як єдиної системи автори статті не розглядають.

У дослідженні [20] запропоновано інноваційний підхід до внутрішньої структури БНС, коли внутрішній корпус судна може автоматично повертатися у вертикальний стан у разі нахилу зовнішнього корпусу. Такий підхід є важливою складовою автоматизації БНС, зокрема, у напрямку захисту корисного вантажу від морської хитавиці, однак не охоплює повний перелік задач його автоматичного керування.

Досить повно і всебічно аналіз і загальний огляд нової технології та розвитку БНС наведено в публікації [21]. Роботу відрізняє комплексний підхід огляду, який зосереджено на останніх технологічних досягненнях і розробках у галузі безкіпажних суден. Авторами запропоновано шість напрямків актуальних досліджень, включаючи розширений інтелект і автономію, високоінтегровані сенсорні системи та мультимодальне виконання завдань, збільшену витривалість і стійкість, супутниковий зв'язок і взаємозв'язок, безпеку й захист. На жаль, дослідження присвячене лише інформаційній

складовій процесу автоматизації і не охоплює повний перелік завдань керування БНС.

Таким чином, ознайомлення з сучасними досягненнями у напрямку розробки САК МБНС свідчить про суттєвий прогрес у дослідженнях, які стосуються окремих систем таких суден, і відсутність досліджень, як б ставили за мету повну автоматизацію таких засобів морської робототехніки на основі системного підходу [22].

Системний підхід відноситься до методичного способу узагальнення, аналізу та синтезу складних явищ шляхом вивчення взаємозв'язків між різними компонентами в цілому. На цей час вказаний метод успішно використовується при проектуванні засобів морської робототехніки [23]

Тому далі розглянемо розв'язок прикладного наукового завдання комплексної автоматизації МБНС на основі застосування методології системного підходу.

1.4 Комплексна автоматизація МБНС як магістральний шлях підвищення його ефективності

Малорозмірні безекіпажні надводні судна стають важливим елементом сучасних морських систем для виконання як цивільних, так і оборонних завдань. Їхнє використання охоплює моніторинг акваторій, наукові та природоохоронні дослідження, пошуково-рятувальні операції, патрулювання та оборонні операції.

На цей час ефективне функціонування МБНС неможливе без комплексної автоматизації, яка охоплює всі аспекти роботи судна — від безпечної навігації до технічної діагностики його виконавчих механізмів.

1.3.1. Поняття комплексної автоматизації МБНС та її мета.

Комплексна автоматизація МБНС передбачає інтеграцію всього спектру функціональних систем судна в єдину керовану архітектуру.

Завдання комплексної автоматизації МБНС полягає в забезпеченні автономного функціонування судна шляхом інтеграції бортових технічних засобів, інтелектуальних алгоритмів керування та систем висвітлення навігаційної обстановки для досягнення високої ефективності виконання поставлених завдань в умовах мінімального або повністю відсутнього втручання оператора. При цьому комплексна автоматизація спрямована на:

- підвищення точності та надійності навігації;
- адаптацію до змін навколишнього середовища та перешкод;
- забезпечення стійкості до збоїв і загроз;
- оптимізацію використання енергоресурсів та керування рухом;
- реалізацію завдань застосування корисного вантажу МБНС за призначенням.

Тобто, мета комплексної автоматизації МБНС полягає в забезпеченні автономного керування всіма бортовими системами для виконання завдань за призначенням судна та його корисного вантажу в режимі мінімального або нульового людського втручання.

1.3.2. Основні задачі комплексної автоматизації, виходячи з принципів системного підходу. До задач можна віднести декілька традиційних окремих задач, реалізацію яких необхідно розглядати з єдиних позицій:

- автоматичне керування рухом, включаючи стабілізацією судна на курсі чи траєкторії;

- автоматичне прийняття рішень щодо керування судном в умовах невизначеності зовнішніх збурень;

- навігаційне забезпечення плавання та ухилення від навігаційних перешкод;

- автоматична самодіагностика технічного стану судна та його виконавчих механізмів у реальному часі;

- автоматичне керування бортовою системою автономного енергозабезпечення судна;

- автоматичне керування корисним вантажем МБНС;

автоматичне забезпечення стійкого зв'язку МБНС з оператором БЦК або іншими центрами керування.

Очевидно, що просте об'єднання перелічених окремих задач автоматизації МБНС не гарантують розв'язок головного завдання – успішного виконання місії МБНС з мінімальним або повністю відсутнім втручання оператора БЦК.

Виходячи з сучасного уявлення про взаємозв'язок матерії, енергії та інформації як трьох невід'ємних характеристик будь-якого технічного об'єкту [24], та доповнивши його четвертим зв'язком – корисна функція цього об'єкта [23], який тісно пов'язаний з першими трьома характеристиками, отримаємо чотири головні напрямки комплексної автоматизації МБНС, які повністю відповідають методології системного підходу (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Головні напрямки комплексної автоматизації МБНС, виходячи з принципів системного підходу

Критерії системного підходу	Матерія	Енергія	Інформація	Корисна функція
Системні складові МБНС	Корпус МБНС	Енергетична система МБНС	Інформаційно-керуюча система МБНС	Експлуатаційні властивості МБНС
Завдання автоматичного контролю та керування системних складових МБНС	А) Контроль міцності та цілісності корпусу МБНС та герметичних корпусів обладнання	Б) Керування та контроль працездатності суднової енергетичної системи	В) Керування та контроль працездатності систем навігації, зв'язку та автоматичного керування	Г) Керування режимами роботи судна, контроль якості функціонування судна

Отримані на основі системного підходу головні напрямки комплексної автоматизації МБНС дають змогу синтезувати конкретний перелік задач автоматизації для кожної системної складової МБНС.

Очевидно, що реалізація завдань А, Б, В і Г утворює зміст наукових досліджень та інженерно-конструкторських робіт комплексної автоматизації МБНС.

Розглянемо зміст конкретних вказаних чотирьох завдань автоматизації окремих системних складових МБНС.

А) Контроль плавучості, міцності та цілісності корпусу МБНС і герметичних корпусів його електрообладнання виконується з метою забезпечення надійної та безпечної експлуатації судна в умовах зовнішніх механічних, гідродинамічних, кліматичних та інших впливів.

Такий контроль дозволяє своєчасно виявити дефекти, які можуть призвести до виходу з ладу критичних елементів судна, втрати плавучості, порушення керованості чи навіть повної втрати судна.

Цілі контролю міцності та цілісності корпусу судна та герметичних корпусів його електрообладнання полягають у забезпеченні:

гарантії безпеки конструкції корпусу судна – виключення руйнування чи деформації при роботі в складних умовах (удари, хвилювання, вітер, зіткнення);

захисту внутрішніх систем судна – контроль водонепроникності корпусу судна та корпусів електроніки;

своєчасного виявлення пошкоджень – для проведення технічного обслуговування або ремонту до настання аварійної ситуації.

Такий контроль включає в себе розв’язок наступних задач комплексної автоматизації:

контроль плавучості, осадки, крену і диференту МБНС;

контроль водонепроникності та герметичності – за допомогою сенсорів затікання та сенсорів тиску;

контроль міцності конструкцій – за допомогою сенсорів напружень і вібрацій на корпус та найбільш відповідальні елементи систем судна;

контроль температурного та вологісного режиму всередині корпусів електрообладнання;

контроль антикорозійного захисту.

Б) Керування та контроль працездатності суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) МБНС забезпечують безперебійну та безпечну роботу всіх підсистем судна, а також його здатність виконувати поставлені завдання в автономному режимі.

Керування і контроль СЕЕС організують для:

забезпечення надійного енергопостачання всіх функціональних систем МБНС: рушійного комплексу, навігації, зв'язку, автоматичного керування, систем обслуговування корисного вантажу;

оптимізації витрат енергії для досягнення максимальної тривалості автономного плавання та ефективності виконання місії;

профілактики аварій та пошкоджень за рахунок раннього виявлення несправностей або відхилень у роботі джерел живлення;

підвищення живучості — своєчасне перемикання на резервні або альтернативні джерела енергії при пошкодженні основного джерела енергії;

автоматизації та самодіагностики – зменшення потреби в зовнішньому втручанні завдяки автономним алгоритмам моніторингу й регулювання.

Таким чином, керування та контроль електроенергетичною системою судна містять наступні задачі комплексної автоматизації:

контроль параметрів судна – рівень заряду/розряду акумуляторних батарей (АкБ), вхідна/вихідна напруга та струм, температура елементів живлення, частота та якість живлення (для систем змінного струму);

керування джерелами енергії – запуск/зупинка двигунів внутрішнього згоряння (ДВС) або дизель-генераторів, керування зарядом/розрядом акумуляторів або суперконденсаторів, перемикання між основними та резервними джерелами живлення (в т.ч. гібридними);

бортовий енергоменеджмент – пріоритетний розподіл енергії між підсистемами в умовах дефіциту, автоматичне вимкнення не критичних споживачів у разі аварії або низького заряду, оптимізація режимів руху з урахуванням енергетичного балансу;

діагностика та сигналізація – сповіщення про збої, перевищення критичних значень температури, напруги, струму, автоматичне ведення журналу подій для подальшого аналізу та технічного обслуговування;

інтерфейси зв'язку з системою керування судном – передача даних про стан енергосистеми до головного керуючого комп'ютера, отримання команд від САК МБНС або людини-оператора, підтримка автономних алгоритмів ухвалення рішень при втраті зв'язку.

В) Керування та контроль працездатності систем навігації, зв'язку та автоматичного керування МБНС виконується з метою забезпечення точного позиціонування, надійного обміну інформацією та ефективного виконання місій у режимі автоматичного або автоматизованого керування.

Мета керування та контролю полягає у наступному:

забезпечення просторового руху судна з високою точністю;

реалізація сценаріїв групового руху та ухилення від навігаційних небезпек;

забезпечення застосування корисного вантажу судна за призначенням згідно завдань місії;

підтримання безперервного інформаційного обміну даними з оператором або іншими суднами;

самодіагностика обладнання МБНС та корисного вантажу.

Автоматизація вказаних процесів належить до задач комплексної автоматизації МБНС.

Г) Контроль процесів комплексної автоматизації та керування режимами роботи МБНС (та контроль якості функціонування судна) виконується для забезпечення ефективної та надійної роботи судна у змінних умовах середовища та місії.

Метою такого керування є:

гарантувати відповідність поведінки судна поставленому завданню (патрулювання, використання корисного вантажу, повернення тощо);

забезпечити надійний перехід між режимами роботи без втрати керованості;

підвищити енергоефективність та живучість систем судна;

виявляти відхилення від нормативних характеристик роботи та запобігати збоям та відмовам;

реалізувати адаптивне реагування на зміну умов (погода, зв'язок, виявлення перешкод).

Контроль процесів комплексної автоматизації МБНС передбачає:

контроль процесів проектування судна як об'єкта автоматичного керування, які ґрунтуються на принципах системного підходу;

контроль якості функціонування включає оцінку точності руху (відхилення від маршруту, стабільність курсу при дії зовнішніх збурень), оцінку швидкодії систем керування (реакція на команди керування, маневреність), аналіз ефективності ухилення від перешкод, адаптації до змін, моніторинг рівня автономності (кількість ручних втручань, рівень самостійного ухвалення рішень) та контроль відповідності поведінки стандартним сценаріям.

Керування режимами функціонування МБНС включає:

керування режимами роботи судна – автоматичне перемикання між режимами (запуск/вихід у черговий режим, слідування маршрутом, слідування за об'єктом, патрулювання за шаблоном, режим ухилення від небезпеки, повернення на базу);

оптимізацію роботи енергосистеми та виконавчих механізмів залежно від обраного режиму;

підтримку спеціальних режимів (робота з корисним вантажем, економія ресурсу тощо).

Автоматизоване документування процесів функціонування МБНС та зворотний зв'язок передбачає реєстрацію режимів та подій для подальшого аналізу, збір статистики ефективності та надійності, формування звітів про якість виконання місії.

Автоматизація вказаних процесів керування режимами роботи та контроль якості функціонування МБНС належить до задач комплексної автоматизації малорозмірного безекіпажного надводного судна.

На рис. 1.5 наведено основні задачі комплексної автоматизації МБНС, сформульовані на основі системного підходу.



Рисунок 1.5 – Основні задачі комплексної автоматизації МБНС

Таким чином, завдяки розв'язку вказаних задач МБНС перетворюється з простої керованої рухомої водної платформи на інтелектуальну автономну самохідну систему, здатну без прямої участі людини-оператора з високою точністю виконувати завдання та підтримувати високу якість своєї роботи протягом усього циклу місії.

Зауважимо, що наведений вище перелік задач комплексної автоматизації МБНС може слугувати науково-методологічною основою для започаткування окремої галузевої програми України по створенню нових засобів морської робототехніки, а її успішний розв'язок вимагає залучення групи профільних науково-дослідних, проектно-конструкторських та суднобудівних підприємств.

Тому у дисертації досліджуються розв'язки лише деяких окремих та найбільш актуальних задач наведеного переліку.

1.5 Постановка задачі дослідження

Аналіз сучасних тенденцій розвитку морської робототехніки вказує стійке зростання інтересу до застосування безкіпажних надводних суден (БНС) в різних сферах морської діяльності – від науково-дослідної до пошуково-рятувальної та охорони морської інфраструктури.

Особливе значення набувають малорозмірні БНС, які вирізняються мобільністю, низькою вартістю експлуатації, здатністю до групового застосування та високою пристосовуваністю до умов обмеженого простору або мілководдя.

Разом з тим, ефективне функціонування таких суден можливе лише за умови високого рівня автономності, що, у свою чергу, потребує комплексної автоматизації всіх ключових процесів керування: стабілізації руху, ухилення від перешкод, енергоменеджменту, а також технічної діагностики і обміну даними з оператором берегового центру керування.

В реальних умовах експлуатації, особливо в складному морському середовищі, роль автоматизованих і, тим більше, автоматичних рішень критично зростає, адже залежність від оператора має бути мінімальною або повністю відсутньою.

Попри інтенсивний розвиток галузі морської робототехніки, існує недостатня кількість уніфікованих рішень для комплексної автоматизації саме

малорозмірних МБНС, які мають обмежені ресурси за енергоспоживанням, обчислювальною потужністю та вантажопідйомністю.

Більшість існуючих підходів щодо автоматизації орієнтовані на середні та великі безекіпажні судна та не враховують специфіку експлуатації безекіпажних суден у прибережних умовах.

Таким чином, розробка теоретичних засад і прикладних рішень з комплексної автоматизації процесів керування МБНС є актуальним прикладним науковим завданням, вирішення якого має важливе значення для розвитку вітчизняної морської робототехніки, підвищення технологічної незалежності, обороноздатності та безпеки морських акваторій та внутрішніх вод України.

Як показав проведений вище аналіз, комплексна автоматизацій МБНС – це складний процес, для реалізації якого доцільним та можливим є використання, у першу чергу, вже розроблених науково-технічних рішень, успішно апробованих для інших засобів морської робототехніки.

Так, вітчизняними та зарубіжними науковцями успішно вирішуються питання безпечного мореплавства безекіпажних надводних суден [25, 26] та питання групового керування морськими апаратами-роботами різного призначення [27, 28].

Однак проведений аналіз також виявив низку невирішених задач автоматизації, які є характерними тільки для МБНС та вимагають подальшого розвитку їх систем автоматичного керування. До таких задач, у першу чергу, слід віднести відсутність комплексного підходу до автоматизації таких суден як носіїв корисного навантаження різного призначення, що функціонують в умовах дії зовнішніх вітро-хвильових збурень.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування МБНС шляхом їх комплексної автоматизації на основі застосування системного підходу.

Для досягнення поставленої мети необхідним є розв’язок наступних задач:

формування науково-методологічних основ комплексної автоматизації таких суден шляхом постановки задач зовнішнього і внутрішнього їх проєктування як об'єктів автоматичного керування, ґрунтуючись на принципах системного підходу (задача автоматичного керування та контролю Г);

подальший розвиток та вдосконалення технічних рішень щодо систем автоматичного керування МБНС, націлених на підвищення морехідності таких суден, зокрема, на їх здатність зберігати керованість та безпечно здійснювати плавання при дії вітро-хвильових збурень (задача автоматичного керування та контролю В);

розширення складу МБНС за рахунок нового виду малорозмірних безекіпажних суден – безекіпажного надводно-підводного судна та розробка системи автоматичного керування ним (задача автоматичного керування та контролю Г);

удосконалення систем автоматичного керування корисним вантажем МБНС (науковими та природоохоронними приладами, підводними апаратами різного призначення) як головним інструментом для реалізації безлюдних технологій дослідження й охорони територіальних вод України (задача автоматичного керування та контролю Г).

Виходячи з актуальності застосування МБНС в інтересах вітчизняних організацій у дисертації головна увага приділена питанням автоматизації наступних суден:

малорозмірних безекіпажних патрульних суден, призначених для охорони мілководних захищених акваторій України;

малорозмірних безекіпажних суден, призначених для виконання науково-дослідницьких та природоохоронних місій в інтересах вітчизняних організацій

Висновки до розділу 1.

1. На основі аналізу науково-технічної літератури по безекіпажним надводним суднам встановлена актуальність створення малорозмірних безекіпажних надводних суден для охорони мілководних морських, річкових та озерних акваторій, на яких розташовані об'єкти морської критичної інфраструктури та проводиться промислово-господарська діяльність держави.

2. Описано склад та узагальнену структуру обладнання малорозмірного безекіпажного надводного судна як об'єкта автоматичного керування та сформульовано основні задачі комплексної автоматизації такого судна, виходячи з принципів системного підходу.

3. Дано визначення поняттю комплексної автоматизації та показана актуальність завдання комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден, які спроможні забезпечити ефективне та безаварійне їх використання при виконанні науково-дослідницьких, природоохоронних та інших морських операцій в інтересах держави.

4. Виходячи з принципів системного підходу, сформульовано головні напрямки та основні задачі комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден.

5. Визначено актуальні задачі дисертаційного дослідження, які охоплюють формування науково-методологічних основ комплексної автоматизації на основі системного підходу, подальший розвиток та вдосконалення систем автоматичного керування МБНС та його корисним вантажем, а також уведення до розгляду нового об'єкта морської робототехніки – малорозмірного безекіпажного надводно-підводного судна та розробку системи автоматичного керування таким судном.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МАЛОРОЗМІРНОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА ЙОГО КОМПЛЕКСНОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Методологія системного підходу та її застосування для комплексної автоматизації МБНС

Зростання вимог до ефективності, безпеки та надійності морських операцій обумовлює розвиток автономних морських платформ, серед яких важливу роль відіграють малорозмірні безекіпажні надводні судна (МБНС). Особливості таких об'єктів — обмежені габарити, автономність, мобільність, низька помітність — вимагають застосування сучасних підходів до їх проектування й експлуатації.

Одним із таких підходів є методологія системного аналізу, яка забезпечує цілісність бачення об'єкта, його функціональних завдань та взаємодії з середовищем.

Системний підхід – це методологія наукового пізнання та проектування, яка розглядає складні об'єкти як системи з елементами, зв'язками, структурами та функціями. До основних принципів системного підходу належать [22, 23, 29, 30]:

- цілісність – розгляд об'єкта як єдиного функціонального цілого;
- ієрархічність – виділення рівнів керування та рівнів підсистем;
- модульність – поділ системи на функціональні модулі;
- інтеграція – узгоджене функціонування елементів МБНС.

Для складних технічних об'єктів, таких як МБНС, системний підхід дозволяє забезпечити оптимальне поєднання апаратного та програмного забезпечення, узгодженість між задачами навігації, керування, енергозабезпечення, зв'язку та діагностики.

Зауважимо також, що у напрямку проектування засобів морської робототехніки (ЗМР) добре зарекомендував себе інженерний підхід до впровадження системного підходу, який виражається у застосування «рівнянь існування ЗМР», що структуровані у вигляді чотирьох системних складових малорозмірного безекіпажного надводного судна: «Корпус МБНС», «Енергетична система МБНС», «Інформаційно-керуюча система МБНС» та «Експлуатаційні властивості МБНС» (див. табл. 1.1).

Малорозмірні безекіпажні надводні судна мають ряд характеристик, які ускладнюють процес їх автоматизації:

- обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси;
- складність адаптації до мінливих морських умов;
- висока щільність розміщення електронних та механічних компонентів;
- високі вимоги до показників надійності в експлуатації.

Ці особливості зумовлюють необхідність узгодженого проектування усіх підсистем на основі системного підходу.

Основні підсистеми, що формують архітектуру комплексної автоматизації МБНС, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 — Підсистеми комплексної автоматизації МБНС

Підсистема	Основні функції
1. Інформаційно-вимірювальна	Збір даних про положення, курс, швидкість, навігаційну обстановку
2. Обчислювальна	Обробка даних, прийняття рішень, реалізація алгоритмів
3. Керуюча	Виконання команд управління, стабілізація
4. Комунікаційна	Передача даних з/до берегових станцій, інших МБНС
5. Енергетична	Забезпечення енергією систем, моніторинг заряду
6. Діагностична	Виявлення несправностей, контроль технічного стану

Таким чином, табл. 2.1 містить основний перелік напрямків прикладних досліджень з комплексної автоматизації МБНС.

Далі у дисертації досліджуються деякі завдання, притаманні керуючій підсистемі (п.3, табл. 2.1).

Застосування принципів системного підходу до завдань комплексної автоматизації МБНС доцільно виконувати у вигляді наступних основних етапів:

- системний аналіз вимог – визначення цілей комплексної автоматизації МБНС, критеріїв для оцінки ефективності автоматизації та обмежень;

- системне проектування – структуризація МБНС як об'єкта керування, вибір узагальненої структури системи автоматичного керування МБНС;

- моделювання – створення математичної моделі динаміки МБНС як об'єкта керування та проведення комп'ютерних експериментів для перевірки ефективності функціонування системи автоматичного керування МБНС.

2.2 Задачі створення та критерії управління безекіпажного надводного судна на мілководних морських акваторіях (на прикладі судна для природоохоронних місій)

Виходячи з принципів системного підходу, визначимо множину основних задач щодо зовнішнього і внутрішнього проектування нового типу надводного судна-робота – безекіпажного надводного судна, спроможного виконувати природоохоронні місії на мілководних акваторіях держави.

Прибережні мілководні акваторії відносяться до таких, що найбільш активно використовуються у господарській діяльності морських держав. Водночас ці акваторії сприймають великий антропогенний вплив у результаті промислової діяльності та воєнних конфліктів. На сьогодні це найбільш характерно для прибережної частини територіальних вод України, де за останні два роки у результаті воєнних дій накопичилась велика кількість екологічно небезпечних та вибухонебезпечних об'єктів.

Тому природоохоронний моніторинг та охорона мілководних акваторій, їх очищення від небезпечних об'єктів антропогенного походження сьогодні мають розглядатись як єдина задача роботизованих морських місій.

Малорозмірні безекіпажні надводні судна на цей час є одним з перспективних засобів морської робототехніки. Оснащення МБНС змінним приладовим, інструментальним та комунікаційним обладнанням робить їх ефективним технічним засобом для виконання широкого переліку роботизованих природоохоронних місій.

Особливо ефективним вбачається застосування МБНС у прибережних водах (до 12 морських миль), де спостерігається найбільша морегосподарська діяльність.

Процес проектування таких суден як об'єктів автоматичного керування доцільно виконувати як єдиний комплекс робіт зовнішнього і внутрішнього проектування засобу морської робототехніки [31].

Такі судна доцільно створювати для реалізації наступних роботизованих морських операцій:

для приладового моніторингу підводного, надводного та повітряного простору морської акваторії P_M ;

для взяття проб донного ґрунту, води та повітря на морській акваторії P_S з метою їх подальшого експрес-аналізу на борту МБНС або у береговій лабораторії;

для пошуку та обстеження затонулих об'єктів, які утворюють загрози життю і здоров'ю людей та створюють загрозу судноплавству P_{SE} (складова гуманітарного розмінування акваторій);

для виконання технічних робіт P_T за допомогою бортових засобів морської робототехніки – автономних підводних апаратів, прив'язних самохідних та буксированих підводних апаратів, малорозмірних безекіпажних суден та безпілотних літальних апаратів коптерного типу.

Узагальнену множину природоохоронних операцій МБНС можна представити наступним чином:

$$P_{USB} = \{P_M; P_S; P_{SE}; P_T\}. \quad (2.1)$$

Розглянемо тепер особливості зовнішнього проектування природоохоронного МБНС, коли встановлюється його відповідність експлуатаційним вимогам (застосуванню за призначенням).

Аналіз показує, що обґрунтування технічних характеристик МБНС та обґрунтування технічних характеристик його приладового та інструментального обладнання утворює окрему прикладну наукову задачу. Її розв'язок можливий на основі застосування системного підходу [22, 23], який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного судна на його енергетичне та інформаційне забезпечення, рівень автоматизації та комунікаційні можливості як морського робота, врахування низки експлуатаційних властивостей судна.

Такий взаємний вплив між складовими МБНС доцільно аналізувати у наступній послідовності операцій:

природоохоронне завдання U_Z , яке має виконати МБНС;

морська технологія U_T , яку має реалізувати МБНС для виконання завдання U_Z ;

множина природоохоронних робіт U_J , які треба виконати в автоматичному режимі за даною технологією U_T ;

множина задач U_F для автоматичного керування виконавчими механізмами Y_{USB} , які реалізують роботи U_J в автоматичному режимі.

Таким чином, маємо наступну послідовність операцій S щодо проектування системи автоматичного керування МБНС:

$$S = U_Z \rightarrow U_T \rightarrow U_J \rightarrow U_F. \quad (2.2)$$

Множина задач U_F утворює інформаційну базу для формування переліку природоохоронного обладнання судна Y_{USB} і може бути використана для формування технічного обрису майбутніх складових МБНС – його

приладового та інструментального обладнання, яке визначає функціональні (експлуатаційні) властивості судна, а також для формування вимог до системи автоматичного керування МБНС як носія цього обладнання.

Оскільки природоохоронний МБНС має велику групу G_{USB} бортових засобів природоохоронного призначення та морської робототехніки (літальних та підводних апаратів-роботів), його архітектурно-конструктивний тип доцільно обирати у вигляді одноострівного тримарана з баковою надбудовою, а корисний вантаж розміщати на верхній палубі [32].

На основі залучення принципів системного підходу проектування МБНС як об'єкта автоматизації можна представити наступними фазами:

формулювання основних чинників майбутнього застосування МБНС X_P (постановча фаза, кінцевим продуктом якої є розробка технічних вимог до майбутнього судна);

проектування продукту (креативна фаза, кінцевим результатом P_P якої є загальна структура та склад продукту K , його попередні матеріальні M , енергетичні E , інформаційні I та експлуатаційні J характеристики);

технічне конструювання продукту C_P (інженерна фаза, кінцевим результатом якого є технічний проект, який відповідає технічним вимогам до судна).

Таким чином, у загальному випадку з позицій системного підходу проектування природоохоронного судна можна представити множиною базових операцій:

$$S = \{X_P; P_P; C_P\}|_G. \quad (2.3)$$

Сформуємо основні переліки обладнання, необхідного для розв'язку задач судна як об'єкта керування згідно (2.1), у вигляді трьох основних груп:

групи приладового обладнання G_D , яке включає прилади екологічного моніторингу та експрес-аналізу водного та повітряного середовища G_{D-E} , а також гідроакустичні, магнітометричні та оптичні прилади G_{D-D} для пошуку

екологічно небезпечних та вибухонебезпечних предметів, які утворюють загрозу життю і здоров'ю людей та створюють загрозу судноплавству;

групи інструментального обладнання G_I , яке включає дистанційно керовані розмивачі ґрунту та насоси для відкачування ґрунту G_{I-H} , необхідні для очищення донної поверхні мілководних акваторій, дистанційно керовані маніпулятори G_{I-M} для виконання технічних робіт під водою на мілководних акваторіях та дистанційно керовані установки підводного бетонування G_{I-B} для виконання будівельних підводних робіт, метою яких є захист водного середовища від антропогенних джерел забруднення;

групи бортових засобів морської робототехніки G_{MR} , за допомогою яких виконуються детальний приладовий моніторинг великих за площею акваторій G_{MR-M} та виконуються технічні підводні та надводні роботи G_{MR-J} на таких акваторіях.

Тоді повний перелік обладнання, призначеного для виконання природоохоронних задач (1) можна представити множиною:

$$G_{USB} = \{G_D; G_I; G_{MR}\} = \{G_{D-E}; G_{D-D}; G_{I-H}; G_{I-M}; G_{I-B}; G_{MR-B}; G_{MR-O}\}. \quad (2.4)$$

Результатом зовнішнього проектування МБНС має бути визначення загальних експлуатаційних та техніко-економічних вимог J_S до судна як об'єкта автоматизації. На цьому етапі виконується:

- аналіз областей та умов використання судна J_{S-A} ;
- розробка узагальненої концепції його застосування J_{S-C} ;
- операційне моделювання основних режимів роботи судна J_{S-M} ;
- техніко-економічне обґрунтування J_{S-F} .

Тоді підмножина J_S робіт з формування експлуатаційних та техніко-економічних вимог буде мати вид:

$$J_S = \{J_{S-A}; J_{S-C}; J_{S-M}; J_{S-F}\}. \quad (2.5)$$

Таким чином, на етапі зовнішнього проектування на основі параметричних досліджень перспективних МБНС як агентів берегового центру керування (БЦК) природоохоронними місіями, та на основі аналізу їх взаємодії з іншими складовими БЦК, прогнозуються необхідні загальні характеристики майбутнього судна як об'єкта автоматичного керування та виконується оцінка його функціональної ефективності.

Отримані техніко-економічні вимоги МБНС J_s дають змогу сформулювати технічне завдання (ТЗ) на проектування судна.

Відношення (2.1)-(2.5) утворюють науково-методологічне підґрунтя для постановки і розв'язку задач зовнішнього проектування судна, призначеного для природоохоронних місій на мілководних акваторіях.

Розглянемо тепер задачі внутрішнього проектування МБНС, які стосуються розробки судна як інженерного автоматично керованого об'єкта.

З позицій автоматичного керування МБНС доцільно розглядати як спеціалізований периферійний пристрій берегового центру керування, який дистанційно керує процесом збору та обробки інформації про водне середовище.

У зв'язку з цим до сучасних МБНС висувається низка вимог, характерних для роботизованих технологічних процесів. Зокрема, це:

- вимоги щодо забезпечення надійності конструкції судна як інженерного об'єкта в екстремальних морських умовах експлуатації;
- вимоги щодо енергетичного забезпечення функціонування МБНС на протязі виконання автономної морської місії;
- вимоги до рівня їх інформаційного забезпечення, зокрема, вимоги до системи автоматичного керування судном та системи його навігації і зв'язку з БЦК;
- вимоги до показників експлуатаційної ефективності застосування МБНС – продуктивності його роботи, повноти та достовірності отримуваних результатів вимірювань характеристик водного середовища, складності технічного обслуговування МБНС та інші.

Тому для формулювання задач створення МБНС також використано системний підхід, який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного інноваційного технічного об'єкта [22, 23].

Теоретичним підґрунтям застосування системного підходу для створення МБНС у цій роботі прийнято концепцію аналізу складних систем, яка всі процеси розглядає шляхом аналізу «рівнянь існування» таких засобів за матеріальним критерієм (рівняння мас і об'ємів морського робота), за енергетичним та інформаційним критеріями, та за критерієм експлуатаційної ефективності створюваного засобу робототехніки (табл. 1.1).

Розробку МБНС пропонується виконувати як послідовність наступних робіт:

- аналіз технічних вимог J_S до МБНС як периферійного пристрою БЦК згідно (2.5) як результат зовнішнього проектування судна;
- дослідницьке проектування МБНС J_{DR} ;
- ескізне проектування МБНС J_{DE} ;
- технічне проектування МБНС J_{DT} ;
- розробка робочої конструкторської документації J_{DD} для будівництва МБНС;
- будівництво МБНС J_B ;
- випробування МБНС J_T .

Таким чином, генеральна множина основних робіт J_{USB} , направлених на розв'язок задач зі створення МБНС на етапі внутрішнього проектування, має вигляд:

$$J_{USB} = \{J_S; J_{DR}; J_{DE}; J_{DT}; J_{DD}; J_B; J_T\}. \quad (2.6)$$

Дамо короткий аналіз особливостей виконання проектної частини робіт J_{DR} , J_{DE} , J_{DT} і J_{DD} , наведених у (2.6).

Метою етапу дослідницького проектування є вибір раціональної форми корпусу судна (роботи J_{DR-H} з обґрунтування гідродинаміки корпусу), який би відповідав вимогам до морехідності та забезпечував виконання всього переліку режимів роботи судна.

Крім того, необхідно виконати роботи з обґрунтування основних параметрів судна і його систем J_{DR-P} , що забезпечують виконання заданих вимог (вибір головної енергетичної установки та рушійно-рульового комплексу судна, інтегрованої електроенергетичної системи судна, яка б забезпечила оптимізацію процесів зберігання та ефективного керованого використання бортової енергії з метою збільшення часу виконання місії).

Також на цьому етапі на основі аналізу ТЗ формується концепція МБНС як носія обладнання для дослідження водного середовища J_{DR-C} .

При цьому з урахуванням принципів системного підходу визначаються в першому наближенні:

- основні масогабаритні J_{DR-G} характеристики МБНС;
- енергетичні J_{DR-E} характеристики МБНС;
- інформаційні J_{DR-I} характеристики проектного судна.

Крім того, на цьому етапі розробляється інформаційно-керуюче обладнання судна та формуються закони керування J_{DR-U} ним згідно алгоритмам виконання досліджень водного середовища.

Це забезпечує автоматичне керування безпечним рухом малорозмірного безкіпажного надводного судна та його науково-дослідним обладнанням, зв'язок між судном та БЦК.

Важливою складовою робіт J_{DR-U} цього етапу є синтез систем автоматичного керування, які забезпечують ефективне застосування групи МБНС та розробку вбудованих систем діагностики їх технічного стану

Таким чином, це етап синтезу архітектурно-конструктивного типу та визначення основних розмірів судна, у процесі якого системно зв'язуються його гідродинамічні характеристики та характеристик рушіїв, структури устаткування і спорядження, технічних даних і режимів руху.

Підмножина J_{DR} робіт дослідницького проектування МБНС буде мати вид:

$$J_{DR} = \{J_{DR-H}; J_{DR-P}; J_{DR-C}; J_{DR-G}; J_{DR-E}; J_{DR-I}; J_{DR-U}\}. \quad (2.7)$$

Вихідною інформацією робіт цього етапу є креслення загальних видів раціонального варіанта МБНС, а також документація про його технічні, економічні і експлуатаційні характеристики. На підставі цих матеріалів ухвалюється рішення щодо доцільності подальшої розробки цього варіанту проекту судна.

Метою ескізного проектування (підмножина робіт J_{DE}), зазвичай, є широкі теоретичні J_{DE-T} та експериментальні J_{DE-Ex} дослідження елементів і систем МБНС, виготовлення і дослідження у басейнах фізичної моделі корпусу судна (складова робіт $J_{DE-M} \in J_{DE}$).

За результатами цих досліджень уточнюють гідродинамічний розрахунок судна, розрахунки стійкості і керованості, а також характеристик надійності МБНС (складова робіт $J_{DE-R} \in J_{DE}$). На підставі цих розрахунків вносять відповідні виправлення в компоновання МБНС, уточнюють вагові розрахунки.

Тобто, у результаті ескізного проектування отримується проектна конструкторська документація, яка містить принципові конструктивні рішення і дає загальне уявлення про будову та принцип дії МБНС, а також дані, що визначають його відповідність призначенню.

Підмножина J_{DE} робіт ескізного проектування МБНС буде мати вид:

$$J_{DE} = \{J_{DE-T}; J_{DE-Ex}; J_{DE-M}; J_{DE-RC}\}. \quad (2.8)$$

Метою технічного проектування є розробка конструкторської документації, яка містить остаточне технічне рішення щодо конструкції та складу обладнання МБНС. При цьому має бути виконана множина робіт J_{DT} ,

яка охоплює повний опис конструкції судна J_{DT-O} , оцінку відповідності конструкторських рішень вимогам ТЗ J_{DT-TT} , оцінку рівня технологічності будівництва судна J_{DT-BT} та оцінку складності його експлуатації та ремонту J_{DT-OR} .

Підмножина J_{DT} робіт технічного проектування МБНС буде мати вид:

$$J_{DT} = \{J_{DT-O}; J_{DT-TT}; J_{DT-BT}; J_{DT-OR}\}. \quad (2.9)$$

Метою заключного етапу проектування є розробка робочої конструкторської документації. Підмножина робіт J_{DD} цього етапу спрямована на практичну реалізацію заявлених характеристик і параметрів МБНС. На цьому етапі випускається вся технічна документація J_{DD-TD} , необхідна для будівництва, складання та монтажу як окремих агрегатів і систем, так і судна у цілому. Розробляються креслення загальних видів агрегатів МБНС, складальні і детальні креслення окремих його частин. Проводяться: експериментально-дослідницькі роботи J_{DD-ER} , пов'язані із впровадженням нових матеріалів, типів конструкцій; випробування міцності та ресурсні випробування конструкцій; стендові випробування J_{DD-SR} окремих систем та устаткування. Інформація, отримана на цьому етапі, дозволяє уточнити дані про проект і внести відповідні корективи в розрахунки, виконані на попередніх етапах.

Підмножина J_{DD} робіт цього етапу проектування МБНС буде мати вид:

$$J_{DD} = \{J_{DD-TD}; J_{DD-ER}; J_{DD-SR}\}. \quad (2.10)$$

У процес проектування слід також включити виготовлення дослідних зразків МБНС і їх випробування – лабораторні і морські, оскільки в ході цих випробувань визначаються фактичні характеристики судна і ступінь забезпечення вимог ТЗ. При виготовленні дослідних зразків здійснюється відпрацьовування технічної документації і технології виготовлення МБНС.

За підсумками цього етапу ухвалюється рішення про запуск системи в серійне виробництво.

Аналіз показує, що проектування МБНС – це ітераційний процес, причому ітерації здійснюються як між основними етапами проектування, але і усередині кожного з них.

Відомо [33], що для контролю ефективності конструкторських рішень доцільно використовувати «рівняння існування» МБНС за основними показниками його функціонування згідно системному підходу:

«рівняння існування» за критерієм CM_{USB} «Матерія» – рівняння мас і об'ємів МБНС;

«рівняння існування» за критерієм CE_{USB} «Енергія» – рівняння енергетичного балансу МБНС (вид та параметри енергетичного забезпечення споживачів енергії МБНС);

«рівняння існування» за критерієм CI_{USB} «Інформація» – рівняння балансу інформаційних потоків, що циркулюють в МБНС (внутрішні потоки інформації для керування виконавчими механізмами МБНС та зовнішні інформаційні потоки системи зв'язку між МБНС та БЦК);

«рівняння існування» за критерієм CF_{USB} «Корисна функція» – рівняння МБНС, яке оцінює ефективність застосування МБНС за призначенням (продуктивність, технічне обслуговування, зберігання, вплив на навколишнє середовище, транспортування, низькі власні фізичні поля, стійкість до штучних завад).

Розглянемо зазначені критерії більш детально.

У якості матеріального критерію CM_{USB} для оцінки можливості створення МБНС можна використовувати рівняння мас і об'ємів, які широко застосовуються у суднобудуванні:

$$M_{USB} = \sum_{i=1}^n m_{Ai} + \sum_{j=1}^k m_{Bk} \leq M_{TT}; \quad (2.11)$$

$$V_{USB} = \sum_{i=1}^n v_{Ai} + \sum_{j=1}^k v_{Bk} \leq V_{TT}, \quad (2.12)$$

де $\sum_{i=1}^n m_{Ai}$ – сумарна маса елементів постійного складу МБНС (елементи конструкції, електрообладнання, інформаційно-навігаційний та рушійно-кермовий комплекси тощо);

$\sum_{j=1}^k m_{Bk}$ – маса елементів змінюваного обладнання МБНС (прилади для дослідження водного середовища);

M_{TT} , V_{TT} – відповідно, гранично припустимі значення маси та об'єму МБНС згідно ТЗ;

n , k – кількість елементів МБНС, відповідно, постійного та змінюваного складу.

У якості енергетичного критерію CE_{USB} для оцінки можливості створення МБНС використаємо рівняння енергетичного балансу судна, яке характеризує рівень виконання вимог ТЗ:

$$P_{USB} \leq P_{TT}, \quad (2.13)$$

де P_{USB} , P_{TT} – відповідно, сумарна потужність джерел енергії поточного варіанту МБНС, що проектується, та потужність МБНС за вимогами технічного завдання.

Критерій CI_{USB} дає змогу оцінити можливість створення МБНС, який буде мати необхідний рівень автоматизації та інформаційно-комунікаційні характеристики згідно до вимог ТЗ.

До інформаційної складової МБНС доцільно віднести наступні складові:

- систему автоматичного керування просторовим рухом МБНС;
- систему інформаційного обміну між МБНС та БЦК (систему зв'язку);
- систему навігаційного забезпечення МБНС (сукупність різних технічних засобів та приладів, призначених для визначення просторового положення судна та контролю параметрів його руху);

систему автоматичного керування технологічним обладнанням судна (приладами та обладнанням, призначеним для дослідження водного середовища, тобто, у загальному випадку, корисним вантажем судна).

Тому рівняння існування МБНС за цим критерієм доцільно складати у формі системи з трьох основних аналітичних відношень:

$$CI_{USB-Mov} \geq CI_{USB-TT}; \quad (2.14)$$

$$CI_{USB-Com} \geq CI_{USB-TT}; \quad (2.15)$$

$$CI_{USB-Nav} \geq CI_{USB-TT}; \quad (2.16)$$

$$CI_{USB-Tech} \geq CI_{USB-TT}; \quad (2.17)$$

де $CI_{USB-Mov}$, $CI_{USB-Com}$, $CI_{USB-Nav}$, $CI_{USB-Tech}$ – відповідно, кількісні показники якості функціонування поточного варіанту інформаційно-керуючого обладнання МБНС, що проектується;

CI_{USB-TT} – показники якості функціонування інформаційно-керуючого обладнання МБНС згідно до вимог ТЗ.

Ефективність конструкторського рішення поточного варіанту МБНС за критерієм CF_{USB} «Функціональність» доцільно сформулювати як систему вимог, які мають забезпечувати основні експлуатаційні характеристики МБНС як засобу морської робототехніки згідно до вимог технічного завдання.

До таких вимог можуть відноситись::

продуктивність виконання дослідницьких завдань F_{USB-P} ;

рівень складності технічного обслуговування БНС F_{USB-S} ;

надійність системи зв'язку МБНС з БЦК F_{USB-R} ;

стійкість функціонування в умовах дії штучних завад F_{USB-AO} ;

рівень впливу на навколишнє середовище F_{USB-IE} .

Тому рівняння існування МБНС за критерієм «Корисна функція» доцільно складати у формі системи наступних аналітичних відношень, які характеризують ступінь відповідності поточного варіанту МБНС, що проектується, вимогам ТЗ:

$$CF_{USB-P} \geq CF_{USB-TT}; \quad (2.18)$$

$$CF_{USB-S} \leq CF_{USB-TT}; \quad (2.19)$$

$$CF_{USB-R} \geq CF_{USB-TT}; \quad (2.20)$$

$$CF_{USB-AO} \geq CF_{USB-TT}; \quad (2.21)$$

$$CF_{USB-IE} \leq CF_{USB-TT}; \quad (2.22)$$

де CF_{USB-P} , CF_{USB-S} , CF_{USB-R} , CF_{USB-AO} , CF_{USB-IE} – відповідно, кількісні показники поточного варіанту МБНС за критерієм CF_{USB} «Корисна функція»;
 CF_{USB-TT} – показники МБНС за критерієм CF_{USB} згідно до вимог ТЗ.

Таким чином, відношення (2.7)-(2.22) утворюють зручне інформаційне підґрунтя для проектувальників МБНС, оскільки дають змогу оперативно оцінювати відповідність поточного варіанту МБНС, що проектується, вимогам ТЗ.

Вони можуть використовуватись конструкторами на кожному з вище зазначених етапів (6) проектування МБНС.

2.3 Формування головних задач та основних режимів роботи МБНС

Попередній аналіз завдань для МБНС, які вони мають виконувати на акваторіях, що охороняються державою, свідчить про їх різноманітність та складність, оскільки ці завдання включають:

безпечну автоматичну навігацію (е-навігацію [34]) на акваторіях, для яких характерними є вітро-хвильові збурення і течії та які містять статичні та динамічні навігаційні завади;

висвітлення морської обстановки в трьох середовищах – надводному, підводному та повітряному, що вимагає оснащення суден відповідними системами сенсорів та засобами морської робототехніки (для оперативного вимірювання параметрів цих середовищ) і розробки систем автоматизованого та/чи автоматичного керування ними;

застосування корисного вантажу – бортових засобів морської робототехніки (малорозмірних суден, підводних апаратів та літальних апаратів коптерного типу) для оперативного обстеження великих за площею акваторій та підвищення продуктивності морських місій МБНС;

оснащення МБНС надійними системами зв'язку з береговими центрами керування (для передачі отриманої інформації у реальному часі);

Як об'єкти автоматизації МБНС утворюють особливий клас морських рухомих об'єктів, для яких характерним рух з високою швидкістю (40 вузлів і більше), часте маневрування зі значними прискореннями.

Крім того, оскільки МБНС є носіями інших засобів морської робототехніки, такі судна повинні мати ще дві функціональні властивості:

можливість позиціонування в точці (для спуску на воду та підйому з води корисного вантажу);

можливість рухатись з малими швидкостями (3-5 вузлів), які необхідні для застосування корисного вантажу за призначенням (наприклад, для роботи з прив'язними підводними апаратами різних типів).

Функціонування розглянутого класу надводних суден часто здійснюється в районах з обмеженими навігаційними умовами і вимагає великої точності утримання на заданій траєкторії, а робота з деякими видами корисного вантажу (наприклад, з буксированими та самохідними прив'язними підводними апаратами) вимагає високої точності підтримання швидкості руху МБНС.

У цілому, узагальнюючи на основі принципів системного підходу основні завдання експлуатації МБНС та з урахуванням [35] можна сформулювати основні режими його функціонування при повній автоматизації [36-38]:

автоматичне діагностування R_{DKI} механізмів, вузлів і систем МБНС перед початком виконання місії

автоматизоване діагностування R_{DBI} механізмів, вузлів і систем корисного вантажу МБНС перед початком виконання місії;

автоматичний вихід МБНС R_{B1} з бази до початкової точки маршруту місії;

автоматичне діагностування R_{DKB} механізмів, вузлів і систем МБНС та його корисного вантажу під час виконання місії;

автоматичний рух МБНС по заданій траєкторії R_{T1} під час переходу у робочу зону акваторії;

автоматичне маневрування МБНС R_M у робочій зоні акваторії та/чи автоматична стабілізація МБНС R_S у заданій точці заданої акваторії під час застосування корисного вантажу;

автоматизоване або автоматичне забезпечення застосування бортового корисного вантажу за призначенням (наприклад, запуск та прийом безекіпажних літальних апаратів коптерного типу, спуск на воду прив'язних та автономних ненаселених підводних апаратів, керування їх роботою та підйом їх на борт МБНС після завершення їх місії);

автоматичний рух МБНС R_{T2} по траєкторії переходу на нову акваторію чи повернення у кінцеву точку маршруту місії;

автоматичне повернення МБНС R_{B2} до бази;

автоматичне діагностування R_{DK2} механізмів, вузлів і систем МБНС після завершення місії;

автоматизоване діагностування R_{DB2} механізмів, вузлів і систем корисного вантажу МБНС після завершення місії.

Таким чином, множина R_{UPB} основних режимів функціонування МБНС містить наступні складові:

$$R_{UPB} = \{R_{DK1}; R_{DB1}; R_{B1}; R_{DKB}; R_{T1}; R_M; R_S; R_{T2}; R_{B2}; R_{DK2}; R_{DB2}\}. \quad (2.23)$$

Очевидно, що для всіх основних режимів роботи МБНС, крім режимів R_{DK1} , R_{DB1} , R_{DK2} та R_{DB2} , характерним є наявність дії зовнішніх збурень $\vec{F}_{FP}$ у вигляді векторів сил вітру $\vec{F}_{Wn}$, хвиль $\vec{F}_{Wv}$ та течії $\vec{F}_V$.

Узагальнюючи все вище сказане, констатуємо, що до головних задач, які висувуються до САК МБНС, слід віднести наступні задачі:

задача T_N безпечної навігації МБНС в основних режимах роботи (крім режимів крім режимів R_{DK1} , R_{DB1} , R_{DK2} , R_{DB2}); тут має передбачатись, крім дії зовнішніх збурень $\vec{F}_{FP}$, наявність навігаційних перешкод у вигляді інших плавзасобів;

задача T_E автоматичного керування бортовими джерелами енергії МБНС (двигунами внутрішнього згоряння чи іншими джерелами енергії);

задача T_P автоматичного керування головними та допоміжними (підрулюючими) рушійними пристроями МБНС;

задача T_R автоматичного керування кермовим пристроєм МБНС (кермом, насадкою);

задача T_C автоматичного керування корисним вантажем МБНС;

задача T_D автоматичної діагностики (контролю працездатності) обладнання МБНС та його корисного вантажу (режими R_{DK1} , R_{DB1} , R_{DKB} ; R_{DK2} , R_{DB2}).

Множина T_{UPB} головних задач САК МБНС має вигляд:

$$T_{UPB} = \{T_N; T_E; T_P; T_R; T_C; T_D\}. \quad (2.24)$$

Кожна з цих задач потребує розробки відповідних методів синтезу САК, математичних моделей функціонування та алгоритмічного забезпечення, а також їх практичної апробації. Успішний розв'язок задач множини (2.24) дасть змогу забезпечити високу ефективність застосування МБНС як мобільної платформи для засобів морської робототехніки (ЗМР) різних типів, що знаходяться на його борту.

Виходячи з аналізу множини (2.1) основних режимів функціонування МБНС R_{UPB} та множини (2.24) головних задач САК МБНС T_{UPB} , можна запропонувати наступну узагальнену функціональну схему системи

автоматичного керування малорозмірним безкіпажним надводним судном (рис. 2.1) [39, 40].

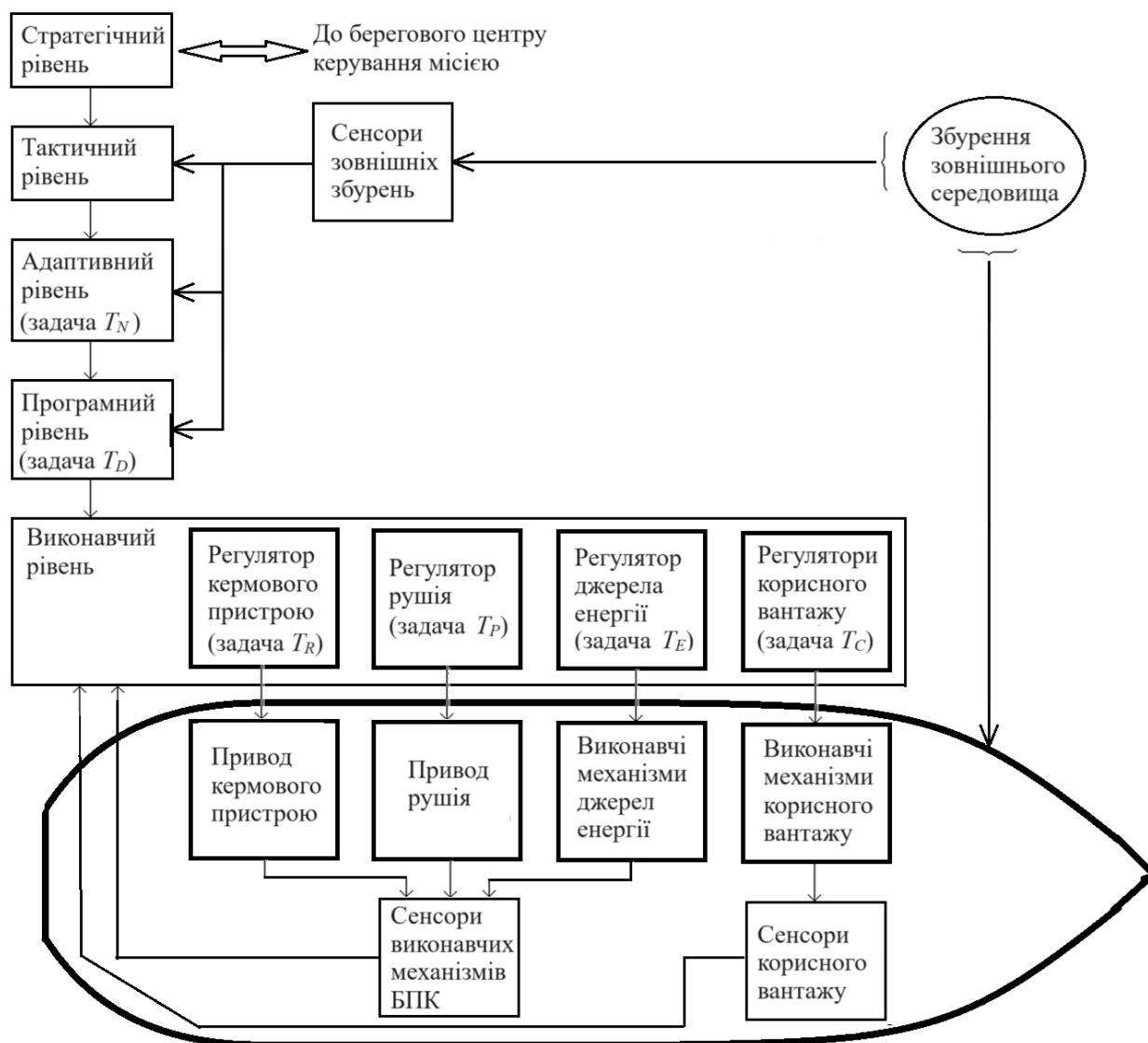


Рисунок 2.1 – Узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування МБНС

Як бачимо, узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування МБНС є багаторівневою і містить п'ять основних рівнів – виконавчий, програмний, адаптивний, тактичний і стратегічний.

Розглянемо вказані рівні більш детально.

Виконавчий рівень реалізує керування окремими виконавчими механізмами МБНС та його корисного вантажу в основних режимах його

функціонування згідно (2.23). На цьому рівні відбувається керування виконавчими механізмами судна – приводами кермового та рушійного пристроїв і виконавчими механізмами джерел енергії судна – насосами, компресорами, вентиляторами тощо.

Крім того, на цьому рівні відбувається керування виконавчими механізмами корисного вантажу – приводами пристроїв, які забезпечують його використання за призначенням (приводами автоматичних спуско-піднімальних пристроїв для бортових засобів морської робототехніки, приводами замків та фіксаторів цих засобів, кришок контейнерів та іншого палубного устаткування).

Програмний рівень САК МБНС реалізує окремі типові операції (наприклад, елементарні просторові переміщення БНС, окремі технологічні операції з корисним вантажем). Це реалізується за допомогою керуючих програм, які здійснюють узгоджене функціонування виконавчими механізмами БНС та корисного вантажу. На цьому рівні виконується аналіз інформації про зовнішнє середовище та поточний технічний стан виконавчих механізмів БНС та корисного вантажу, оперативно формуються послідовності базових технологічних операцій судна та контроль за їх виконанням для реалізації поставленої верхнім рівнем завдання (вибір траєкторій просторового руху МБНС, траєкторій руху виконавчих органів корисного вантажу тощо).

Таким чином, два нижніх рівні функціональної схеми системи автоматичного керування МБНС генерують керуючі команди для виконавчих механізмів БНС та його корисного вантажу. Для них джерелами команд є сигнали від верхніх рівнів керування, а також сигнали системи контролю за внутрішніми змінними - станом виконавчих механізмів БНС та корисного вантажу, які надходять від відповідних сенсорів.

Розглянемо тепер сутність та задачі, розв'язок яких реалізується на верхніх рівнях керування.

На стратегічному рівні керування морською місією МБНС розв'язується первісне завдання – загальне планування місії. Тут виконуються розрахунки щодо можливостей виконання головних завдань місії – аналіз досяжності заданих робочих акваторій, обґрунтування траєкторій руху МБНС та швидкісних режимів, перевірка необхідного енергетичного та інформаційного (комунікаційного та навігаційного) забезпечення місії, а також складаються плани-графіки практичної реалізації місії, включаючи застосування корисного вантажу.

На тактичному рівні з використанням результатів роботи стратегічного рівня формуються траєкторії просторового переміщення МБНС та послідовності виконання конкретних робіт згідно призначення судна та його корисного вантажу. При цьому враховується можливі обмеження, обумовлені збуреннями зовнішнього середовища – вітро-хвильовими збуреннями, течіями та навігаційними обмеженнями. На цьому рівні складаються детальні плани-графіки використання корисного вантажу згідно його призначенню, які передбачають узгоджену роботу палубного обладнання МБНС та, власне, конкретного засобу морської робототехніки, а також обладнання каналу комунікацій з береговим центром керування місією.

На адаптивному рівні керування місією МБНС виконується коригування планів-графіків функціонування судна та його корисного вантажу з урахуванням поточного технічного стану їх виконавчих механізмів та поточних значень зовнішніх збурень на основі інформації від відповідних груп сенсорів. Результатом роботи цього рівня системи керування є оптимальні рекомендовані траєкторії руху виконавчих механізмів судна та його корисного вантажу.

2.4 Математичне моделювання динаміки МБНС як інструментарій оцінки ефективності функціонування автостернового пристрою судна

Відомо [41], що при розробці та широкому впровадженні засобів морської робототехніки математичне моделювання динаміки об'єктів

автоматизації (у дисертації – динаміки МБНС) є ефективним інструментом для перевірки працездатності, верифікації та тестування алгоритмів керування суден та засобів океанотехніки.

Зазвичай, про розробці та дослідження систем керування суден останні з математичної точки зору описують як тверді тіла, які виконують керований рух у водному середовищі [42, 43].

Модель динаміки судна являє собою систему взаємопов'язаних диференціальних рівнянь відносно компонент векторів лінійних $v = (v_x, v_y, v_z)$ і кутових $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ швидкостей руху судна.

Зазвичай, при моделюванні динаміки судна форму його корпусу приймають у вигляді еліпсоїда обертання. За основну систему координат приймається жорстко прив'язана до судна декартова система координат, у якій початок координат знаходиться в центрі маси судна, вісь X орієнтована по діаметральній площині (в напрямку від корми до носа), вісь Y орієнтована по площині мідель-шпангоута, вісь Z перпендикулярно осям X і Y і проходить через центр маси судна. Головний вектор силової дії на судно позначимо $N = (N_x, N_y, N_z)$, а головний момент $M = (M_x, M_y, M_z)$.

Компоненти N_x , N_y і M_z , які мають найбільш важливе значення при аналізі керованості судна, називають відповідно повздовжньою, поперечною силою і горизонтальним моментом. Для складання рівнянь використовується принцип Даламбера, згідно якого сума усіх сил і моментів, що діють на судно з урахуванням інерції, дорівнює нулю.

Позначимо вектор кількості руху системи «корпус-рідина» через Q, а момент кількості руху цієї системи через K, тоді в рухомій системі координат векторне рівняння руху судна виглядає наступним чином [42]:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} + \omega \times Q &= N, \\ \frac{dK}{dt} + \omega \times K + v \times Q &= M. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Компоненти векторів Q і K можна виразити через кінетичну енергію E системи «корпус – рідина»:

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{\partial E}{\partial v_x}, Q_y = \frac{\partial E}{\partial v_y}, Q_z = \frac{\partial E}{\partial v_z}, \\ K_x &= \frac{\partial E}{\partial \omega_x}, K_y = \frac{\partial E}{\partial \omega_y}, K_z = \frac{\partial E}{\partial \omega_z}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Відомо [42], що для цифрового моделювання на ЕОМ систему рівнянь (2.26) у загальному вигляді записують відносно переміщень v_x, v_y, v_z і кутових швидкостей ристання ω_z , крену ω_x та тангажу ω_y судна наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} m_x \frac{dv_x}{dt} + m_z \omega_y V_z - m_y \omega_z V_y &= F_x; \\ m_y \frac{dv_y}{dt} + m_x \omega_z V_x - m_z \omega_x V_z &= F_y; \\ m_z \frac{dv_z}{dt} + m_y \omega_x V_y - m_x \omega_y V_x &= F_z; \\ J_x \frac{d\omega_x}{dt} &= +\omega_y \omega_z (J_z - J_y) + V_z V_y (m_z - m_y) M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} &+ \omega_x \omega_z (J_x - J_z) + V_x V_z (m_x - m_z) = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} &+ \omega_x \omega_y (J_y - J_x) + V_y V_x (m_y - m_x) = M_z; \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

де m_x, m_y, m_z – маса МБНС з приєднаними масами води по відповідних осях зв’язаної з судном системи координат (ЗСК); V_x, V_y, V_z – проекції вектора $\vec{V}_{USB}$ на відповідні осі ЗСК; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції вектора $\vec{\Omega}_{USB}$ на відповідні осі ЗСК; F_x, F_y, F_z – проекції вектора рівнодіючої зовнішніх сил $\vec{F}_{USB}$, що мають вплив на корпус МБНС, на відповідні осі ЗСК; J_x, J_y, J_z – моменти інерції МБНС з приєднаними моментами інерції води відносно відповідних осей ЗСК; M_x, M_y, M_z – проекції вектора рівнодіючої зовнішніх моментів $\vec{M}_{USB}$, що мають вплив на корпус МБНС, на відповідні осі ЗСК.

Однією із ключових проблем при комп’ютерному моделюванні руху судна є врахування і опис усіх зовнішніх і керуючих сил, що діють на судно.

Усі зовнішні і керуючі сили і моменти, які діють на корпус судна, діляться на п'ять основних груп: аеродинамічні сили і моменти, які виникають за рахунок обтікання корпусу судна повітрям; гідродинамічні сили і моменти, які виникають в результаті взаємодії корпусу судна із рідиною; сили ваги і плавучості; керуючі сили і моменти, які утворюють засоби керування судном, зокрема, рулі, гвинти, паруси та ін.; сили і моменти, які обумовлені вітровхвильовими збуреннями.

Представлена вище математична модель динаміки руху судна в горизонтальній площині повністю відповідає вимогам щодо досліджень системи автоматичного керування руху МБНС. Вказана модель лежить в основі програмно-апаратного комплексу «Cotmacs AP Lab» [44] кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів НУК ім. адм. Макарова, який використано у дослідженні.

Висновки до розділу 2

1. Показано роль методології системного підходу до розв'язку завдання комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден та надано перелік напрямків прикладних досліджень з їх автоматизації.

2. На прикладі природоохоронного МБНС сформовано узагальнену множину його роботизованих операцій та на основі системного підходу отримано множину основних задач щодо зовнішнього і внутрішнього проектування такого судна як об'єкта автоматизації.

3. Сформовано множину основних режимів функціонування МБНС патрульного призначення, яка включає базовий перелік операцій судна, починаючи від автоматичної діагностики обладнання і до застосування корисного вантажу судна з його призначенням.

4. Сформовано множину головних задач, які має реалізувати система автоматичного керування безекіпажним патрульним судном, яка охоплює задачі керування виконавчими механізмами судна та його корисним вантажем.

5. Запропоновано узагальнену функціональну схему системи автоматичного керування безекіпажним патрульним судном як теоретичну основу для синтезу структури та алгоритмічного забезпечення системи керування судном та його корисним вантажем.

6. Сформовано математичну модель динаміки малорозмірного безекіпажного надводного судна як інструментарію для дослідження ефективності систем керування судном методом комп'ютерного експерименту.

7. Сформульовані у результаті дослідження множина роботизованих морських місій, множина операцій по проектуванню системи автоматичного керування МБНС, а також множини задач внутрішнього проектування МБНС утворюють інформаційне підґрунтя для створення безекіпажного судна як об'єкта керування, що призначений для природоохоронного моніторингу та охорони мілководних акваторій, їх очищення від небезпечних об'єктів антропогенного походження.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ НА КУРСІ МАЛОРОЗМІРНОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

3.1 Автоматична стабілізація на курсі як складова завдання комплексної автоматизації МБНС

У сучасних умовах інтенсивного розвитку морських роботизованих технологій спостерігається підвищення попиту на малорозмірні безекіпажні надводні судна, здатні виконувати широкий спектр морських завдань у складних гідрометеорологічних умовах. Такі судна відіграють ключову роль у вирішенні як наукових та загальнопромислових, так і оборонних задач завдяки своїй мобільності, маневреності, низькій вартості та можливості транспортувати й застосовувати корисний вантаж в умовах схвильованого моря.

Комплексна автоматизація МБНС передбачає розробку сукупності технічних, програмних та алгоритмічних рішень, які забезпечують повну або часткову автономність функціонування судна під час виконання місій.

При цьому необхідно враховувати широкий спектр факторів, зокрема:

- конструктивні обмеження малорозмірних суден;
- змінні зовнішні умови (у першу чергу – вітро-хвильові навантаження);
- підвищені вимоги до стабільності параметрів руху МБНС;
- забезпечення необхідних умов для застосування корисного вантажу МБНС за його призначенням.

Одним з основних режимів експлуатації МБНС є режим морського переходу, коли необхідно забезпечувати стабілізований рух заданим курсом чи заданою траєкторією [11]. Зазвичай, такий режим протікає в умовах силової дії на корпус МБНС зовнішніх збурень вітро-хвильової природи [45]. Очевидно, що у такому режимі експлуатації суттєво більше витрачається

енергії з бортових джерел судна, а також інтенсивно експлуатується стерновий пристрій МБНС, що знижує його ресурс.

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

Зокрема, важливою прикладною науковою задачею є удосконалення традиційного автостернового пристрою судна [43] з метою зменшення числа переключень стерна при роботі судна в умовах дії вітро-хвильових збурень.

Вітро-хвильові збурення ускладнюють автоматичне судноводіння, що призводить до відхилення судна від заданого маршруту і зниження ефективності управління у цілому. Автостерновий пристрій може підтримувати заданий курс судна, але в умовах вітро-хвильових збурень працює неефективно, непродуктивно витрачаючи ресурс цього пристрою.

Для керування безекіпажними суднами розроблено велику кількість методів керування. Математичні моделі використовуються у нелінійних методах управління, у лінеаризуючих контролерах, контролерах ковзного режиму [46-49].

Відомі дослідження [19], у яких представлено аналіз сучасних моделей малих безекіпажних суден, що використовуються в морських місіях на практиці.

Розробка прототипів автопілотів використовується для тестування нових алгоритмів керування та надійності інших електронних компонентів, таких як датчики та мікропроцесори [50].

У статті [51] пропонується система автоматичного керування МБНС, призначеного для автоматизованого збір плаваючого на акваторії сміття. У роботі розроблено систему керування на основі нечіткої логіки. Під час випробування розроблена нечітка система керування виявилась прийнятною для керування USV з $\pm 2^\circ$. Максимальне навантаження судна було визначено на рівні 13 кг.

Однак, невирішеною і досить актуальною на даний час є проблема оптимізації роботи автостернового для безекіпажних суден за умов невизначеності параметрів вітро-хвильового впливу.

У дисертаційній роботі удосконалення автостернового пристрою МБНС досліджується методом комп'ютерного експерименту у три етапи:

етап-1 – дослідження якості керування процесом стабілізації МБНС на курсі із застосуванням ПД-, ПД- та нечіткого регуляторів з рекомендованим (традиційним) налаштуванням [52];

етап-2 – дослідження ефективності ПД- та нечіткого регулятора курсу МБНС за критерієм мінімізації кількості переключень стерна як шляху до зниження споживання енергії та економії ресурсу виконавчого механізму – стернової машини судна [53];

етап-3 – синтез нейромережевого регулятора курсу та перевірка ефективності його функціонування [54].

Нижче наводяться основні результати вказаних досліджень.

3.2 Дослідження процесів стабілізації МБНС на курсі із застосуванням ПД-, ПД- та нечіткого регуляторів з традиційними налаштуваннями

Проведемо оцінку якості роботи автостернового при утриманні на заданому курсі МБНС за умов зовнішнього впливу. Для виконання даної задачі, у якості регулятора керування переключенням стерна судна, використаємо по черзі ПД-регулятор, ПД-регулятор та регулятор з нечіткою логікою, рис. 3.1 [55, 56].

В моделюванні використовуються моделі двох малорозмірних суден, табл. 3.1. Моделювання динаміки суден за умов зовнішнього впливу проведено засобами апаратно-програмного моделюючого комплексу Cotmasc AP Lab [44], рис. 3.2.

Для обробки результатів моделювання в середовищі програмування Matlab розроблено додаток для якісної оцінки роботи регуляторів.

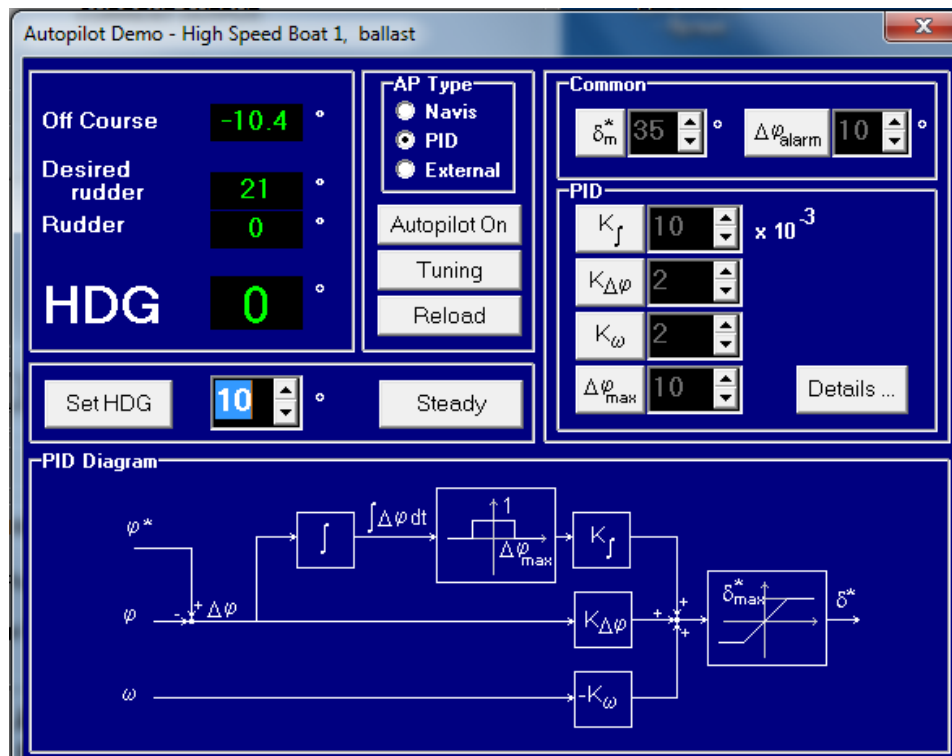


Рисунок 3.1 – Параметри та структурна схема ПД-регулятора

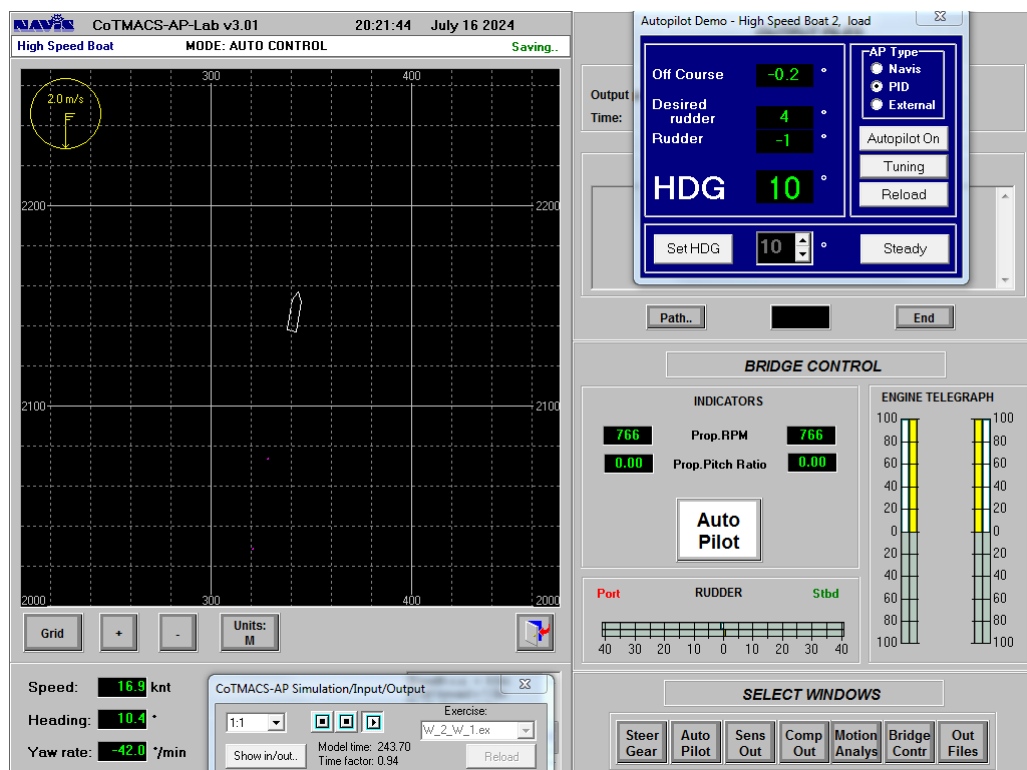


Рисунок 3.2 – Моделювання динаміки руху МБНС в умовах зовнішнього впливу

Параметри двох МБНС як об'єктів комп'ютерного експерименту наведені у табл.. 3.1.

Таблиця 3.1. Параметри суден як об'єктів моделювання

Параметри суден, що моделюється:	High speed boat 1	High speed boat 2
тип	швидкісне малорозмірне судно	швидкісне малорозмірне судно
водотоннажність, 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
два водометні рушії	+	+

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

швидкість судна – 17 вуз, (10 м/с);

курс – 10° ;

налаштування ПІД-регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_\omega = 2$.

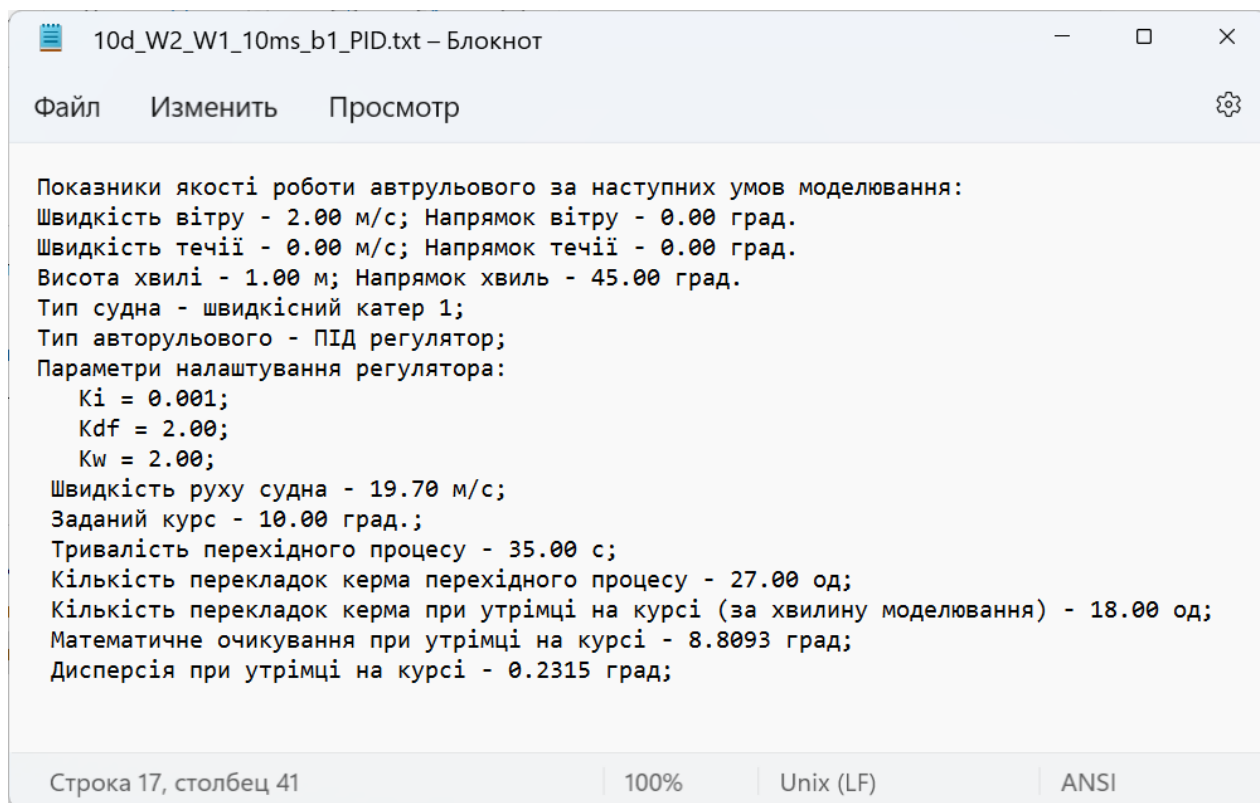
По завершенню моделювання програма формує базу даних у вигляді векторної залежності обраних параметрів руху, таких як: швидкість, курс, кутова швидкість, реальна перекладка стерна, бажана перекладка стерна (сигнал керування від автостернового).

Засобами програмування Matlab к.т.н. Грудініною Г.С. розроблено програмний застосунок, який обробляє та аналізує дані, отриманні шляхом моделювання, і надає кількісну оцінку щодо налаштування автостернового, а саме: тривалість перехідного процесу в секундах, кількість перекладок стерна до виходу на заданий курс в одиницях, кількість перекладок стерна за хвилину

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

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

Після обробки даних у додатку отримується результат за формою, показаною на рис. 3.3.



```
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;
```

Рисунок 3.3 – Кількісна оцінка якості роботи ПІД-регулятора

Нижче наведено результати комп'ютерних експериментів для двох МБНС (див. табл. 3.1) та для випадків використання ПІД-, ПД- і нечіткого регуляторів з традиційними налаштуваннями та після вдосконалення.

Експеримент № 1) Моделювання руху малорозмірного швидкісного судна «High speed boat1» з використанням в якості регулятора керування переключкою стерна ПІД-регулятора з наступними коефіцієнтами: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_{\omega} = 2$; ПД-регулятора з наступними коефіцієнтами: $K_i = 0$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_{\omega} = 2$ та регулятора з нечіткою логікою.

Результати моделювання роботи регулятора судна «High speed boat 1» наведені на рис. 3.4-3.6.

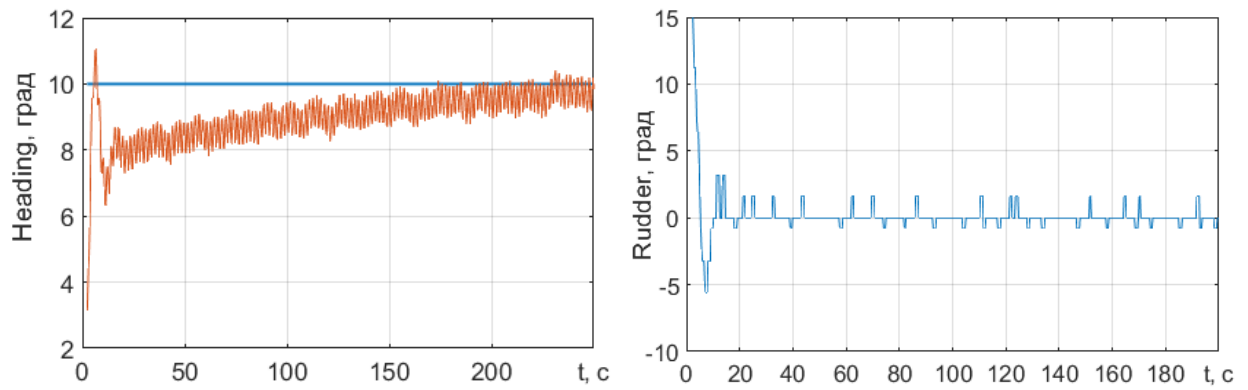


Рисунок 3.4 – Курс і перекладка стерна ПІД-регулятора «High speed boat1»

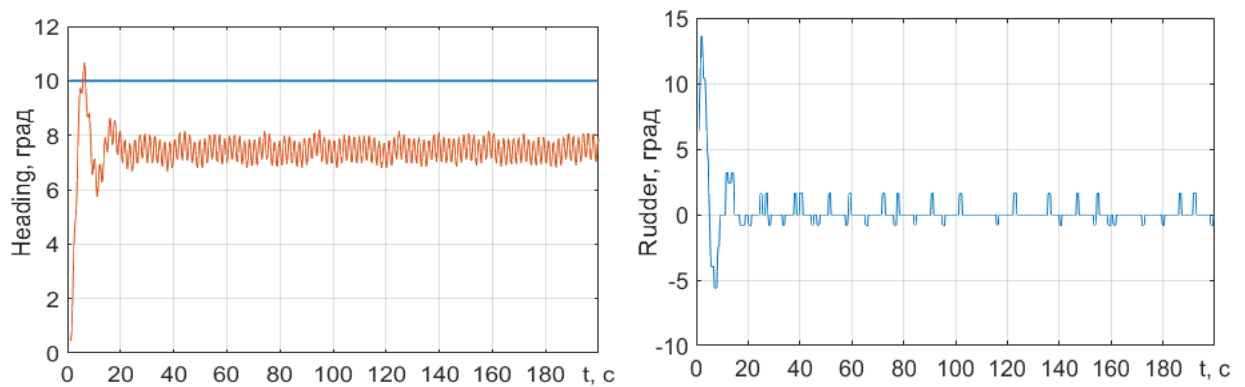


Рисунок 3.5 – Курс та перекладка стерна ПД-регулятора «High speed boat1»

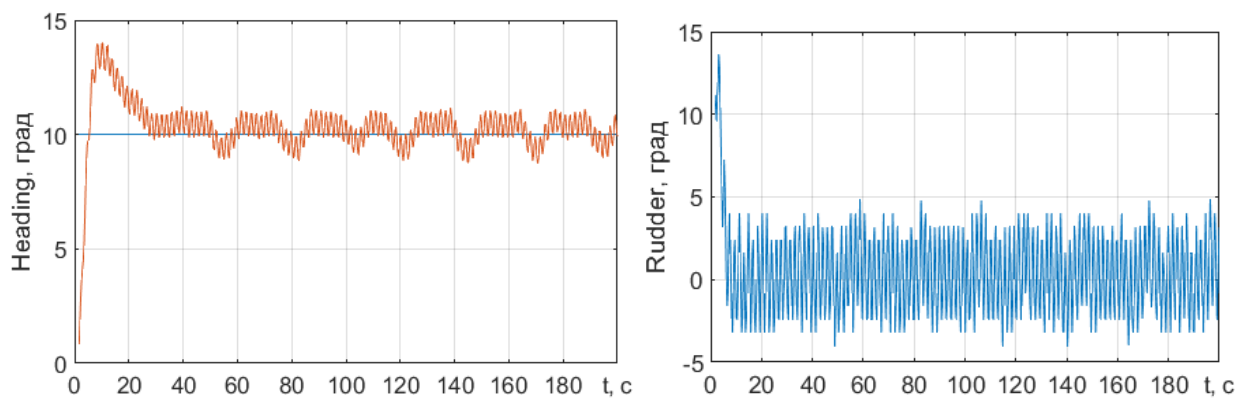


Рисунок 3.6 – Курс та перекладка стерна fuzzy-регулятора

Кількісну оцінку якості роботи регуляторів судна «High speed boat 1» представлено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Показники якості роботи регуляторів судна «High speed boat 1»

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень стерна перехідного процесу, од.	Кількість переключень стерна 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

Експеримент № 2) Моделювання руху судна «High speed boat 2» з використанням, в якості регуляторів керування переключенням стерна,

ПД-регулятора з наступними коефіцієнтами: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_{\omega} = 2$; ПД-регулятора з наступними коефіцієнтами: $K_i = 0$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_{\omega} = 2$ та регулятора з нечіткою логікою.

Результати моделювання наведені на рис. 3.7-3.9.

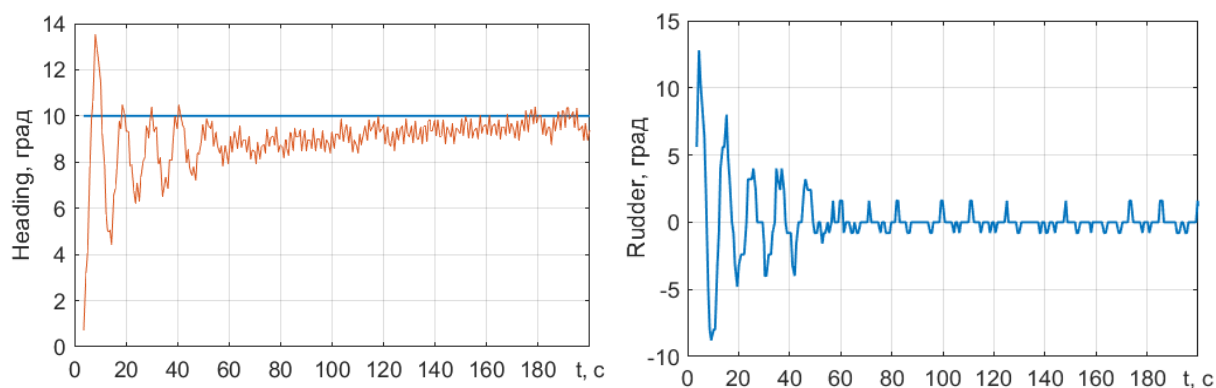


Рисунок 3.7 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

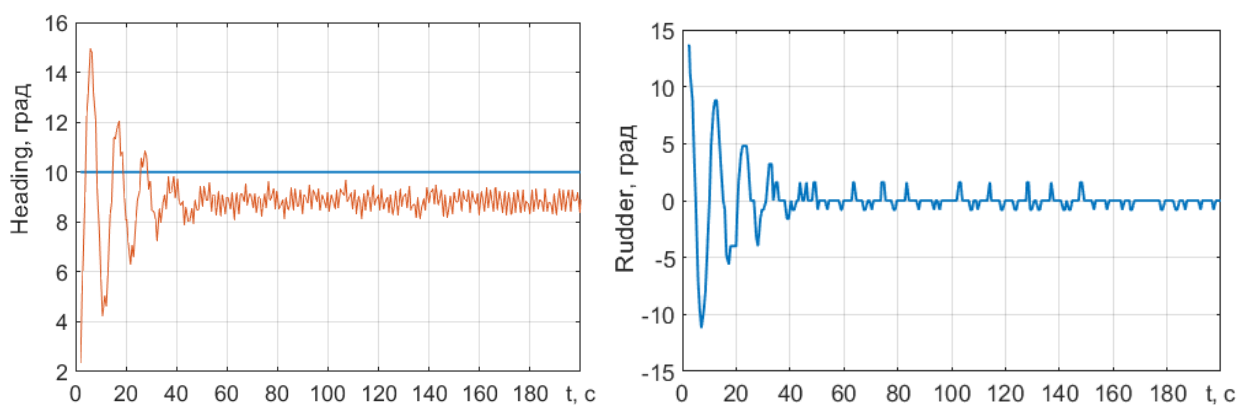


Рисунок 3.8 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

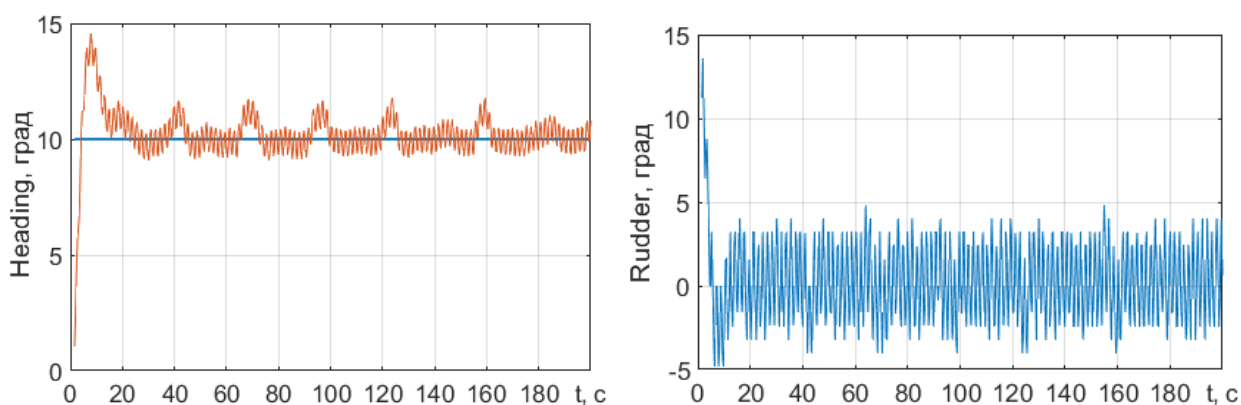


Рисунок 3.9 – Курс та стерно при роботі fuzzy-регулятора судна

Кількісну оцінку якості роботи регуляторів судна «High speed boat 2» представлено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Показники якості роботи регуляторів

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень стерна перехідного процесу, од.	Кількість переключень стерна 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

За проведеним аналізом встановлено, що традиційний ПД-регулятор потребує додаткового підлаштування, як для обох суден.

Для зменшення часу перехідного процесу та підвищення точності керування збільшимо згідно рекомендаціям коефіцієнт підсилення інтегральної та пропорційної ланок ПД-регулятора [55, 57]. Також, відкорегуємо правила керування нечіткого регулятора [58].

Експеримент № 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: $K_i = 0,08$; $K_{d\varphi} = 2$; $K_{\omega} = 20$.

Параметри налаштування ПД-регулятора: $K_i = 0$; $K_{d\varphi} = 3$; $K_{\omega} = 10$.

Результати моделювання наведені на рис. 3.10-3.12.

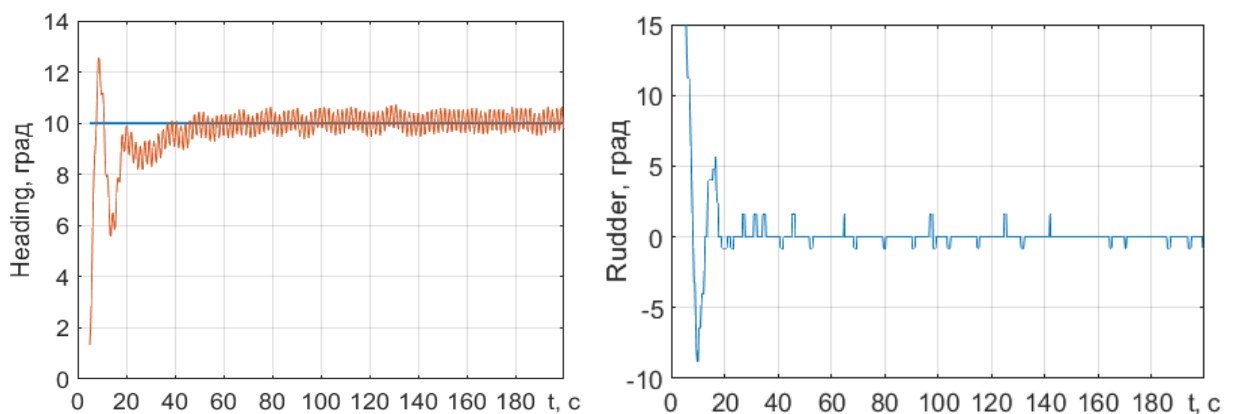


Рисунок 3.10 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 1»

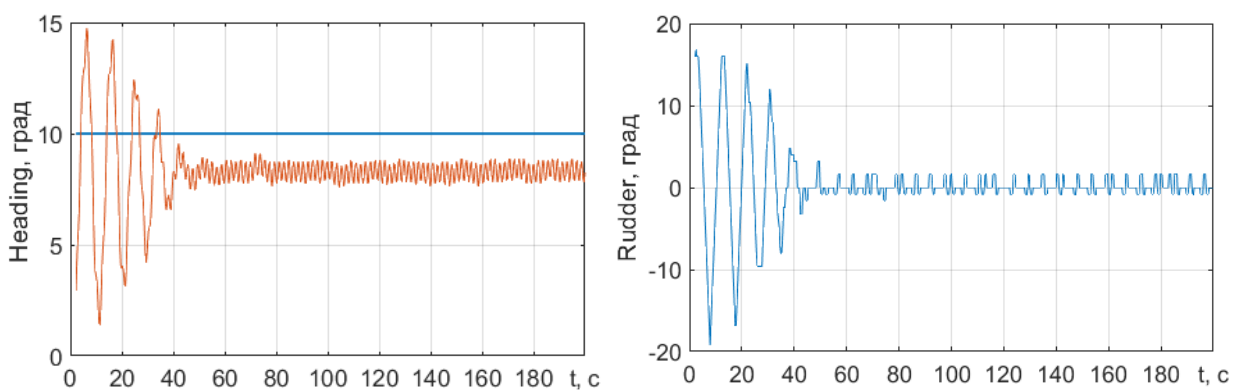


Рисунок 3.11 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 1»

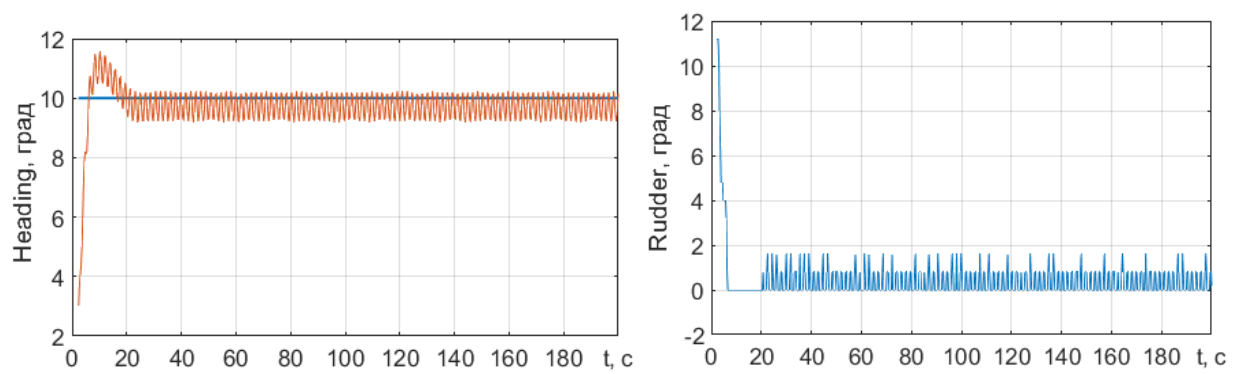


Рисунок 3.12 – Курс та стерно fuzzy-регулятора судна «High speed boat 1»

Кількісна оцінка результатів судна «High speed boat 1» у табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Показники якості роботи регуляторів

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

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

Експеримент № 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: $K_i = 0,03$; $K_{d\varphi} = 2$; $K_{\omega} = 2$.

Параметри ПД-регулятора $K_i = 0$; $K_{d\varphi} = 2$; $K_w = 10$;

Результати моделювання наведені на рис. 3.13-3.15.

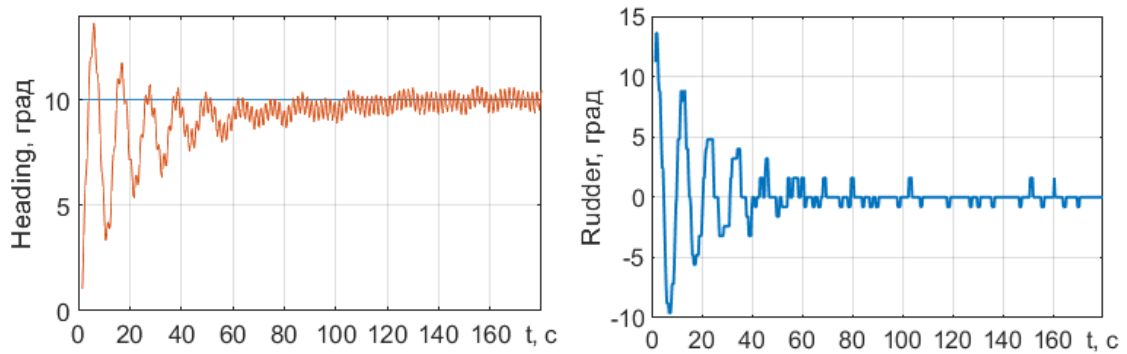


Рисунок 3.13 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

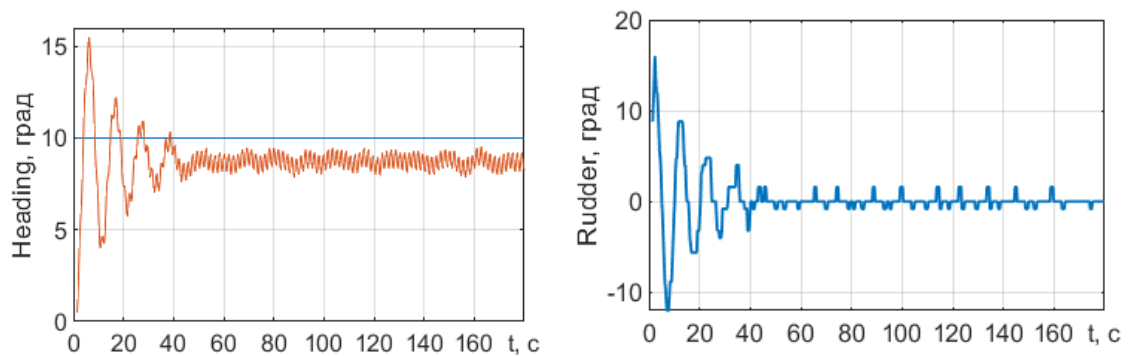


Рисунок 3.14 – Курс та стерно ПД-регулятора судна «High speed boat 2»

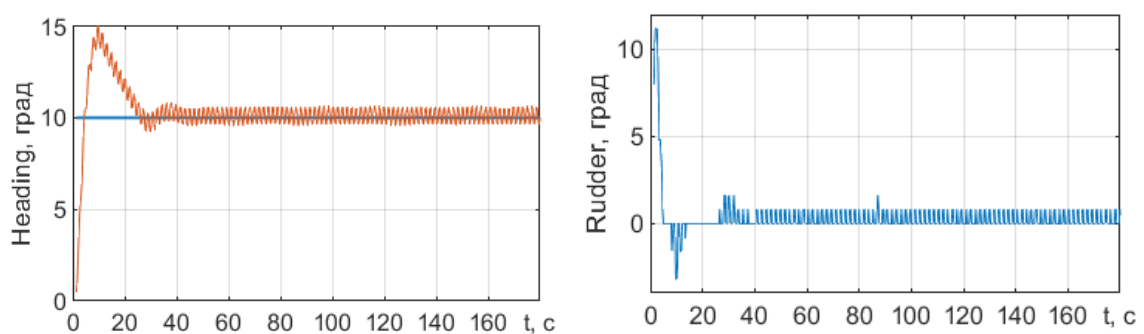


Рисунок 3.15 – Курс та стерно fuzzy регулятора судна «High speed boat 2»

Кількісна оцінка результатів судна «High speed boat 1» у табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Показники якості роботи регуляторів судна «High speed boat 2»

Тип регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень стерна перехідного процесу, од.	Кількість переключень стерна 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

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

В результаті вдалось скоратити кількість переключень стерна та підвищити точність керування, табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Підсумкова таблиця результатів комп'ютерного експерименту

№ експ	Тип рег.	Налаштування регулятора	Час перехідного процесу, с.	Кількість переключень стерна перехідного процесу, од.	Кількість переключень стерна при утриманні на курсі, од (за 1 хв. мод.)	Математичне очікування, град. (курс)	Дисперсія, град. (курс)
«High speed boat 1»							

Продовження табл. 3.6.

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	$K_i = 0; K_{d\varphi} = 2;$ $K_w = 10;$	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

За результатами дослідження можна встановити наступне:

технічну можливість вирішення завдання налаштування параметрів регулятора за умов невизначеності зовнішніх збурень, які діють на МБНС;

виявлено можливість оптимізувати роботу автостернового за кількістю перекладок стерна та точністю керування, поділивши його роботу на режими в залежності від зовнішнього впливу; при цьому, удосконалена САК, в залежності від зовнішніх умов, буде обирати необхідний режим роботи автостернового, що дозволить, у цілому, підвищити ефективність САК МБНС;

За порівнянням результатів першого і третього експериментів встановлено, що кількість перекладок стерна було зменшено на 11%, а точність утримання на курсі покращено на 21% (автостерновий з ПД-регулятором).

Для другого та четвертого експериментів – кількість перекладок стерна 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.

3.3 Удосконалення ПД- та нечіткого регулятора курсу МБНС та дослідження впливу зовнішніх збурень на якість стабілізації судна на курсі

3.3.1. Загальні зауваження. Дослідження впливу зовнішніх збурень на якість роботи автостернового пристрою МБНС проведемо з використанням апаратно-програмного моделюючого комплексу Cotmacs-AP-Lab [44].

Технічні параметри суден як об'єктів моделювання див. у табл. 3.1.

Розглянемо тепер моделювання динаміки судна в умовах зовнішнього вітро-хвильового впливу

Автостерновий пристрій, що розглядається, розроблений для класу малорозмірних швидкісних суден, тому для більш адекватної оцінки якості роботи автостернового в дослідженні використано два судна одного класу.

У даному підрозділі наведено фрагмент експерименту з одним судном – швидкісним катером «High speed boat 1» (ШК1).

Умови вітро-хвильового впливу обрано за порядковим номером експерименту (див. табл. 3.7).

Таблиця 3.7. Параметри вітро-хвильового впливу на МБНС

№ 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

3.3.2. Результати дослідження. На рис. 3.16-3.23 представлено графіки, що відображають курс судна та перекладку стерна за хвилину моделювання. Для кількісної оцінки якості роботи автостернового використовувався додаток, розроблений в програмному комплексі Matlab [52].

Результати оцінки представлено у таблицях наступних за графіками (табл. 3.8-3.16).

Експеримент № 1. Автостерновий з ПІД-регулятором. Налаштування ПІД-регулятора: $K_i = 10^{-3}$, $K_{d\varphi} = 2$, $K_{\omega} = 2$.

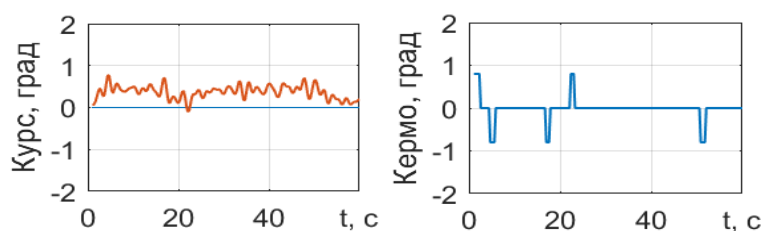


Рисунок 3.16 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

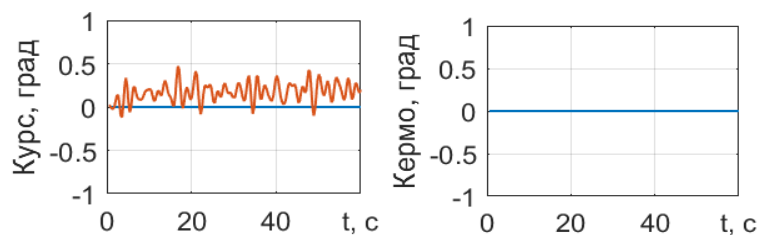


Рисунок 3.17 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.8. Результати дослідження

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

Експеримент № 2. Автостерновий з ПД-регулятором.

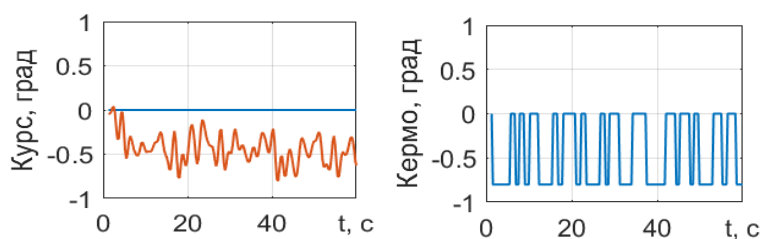


Рисунок 3.18 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

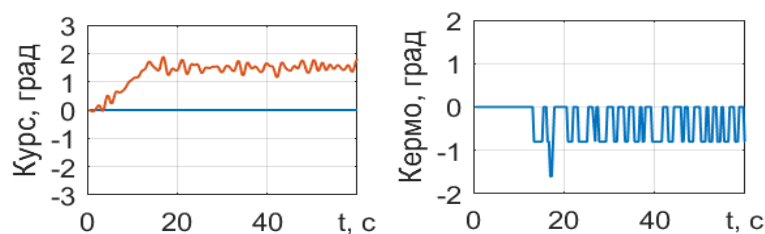


Рисунок 3.19 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.9. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок стерна (за хв. мод.), од.	Відхилення макс., град.	Математичне очікування	Дисперсія
	шв., м/с.	напр., град.	висота, 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

Експеримент № 3. Автостерновий з ПІД-регулятором.

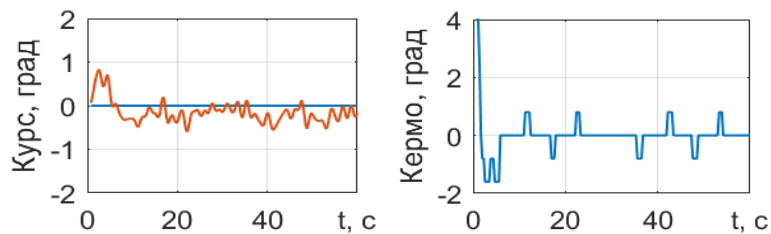


Рисунок 3.20 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

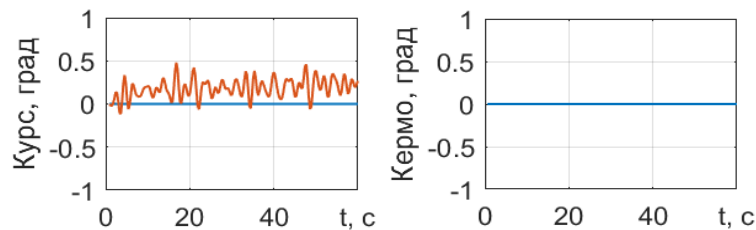


Рисунок 3.21 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.10. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок стерна (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

Експеримент № 4. Автостерновий з ПІД-регулятором.

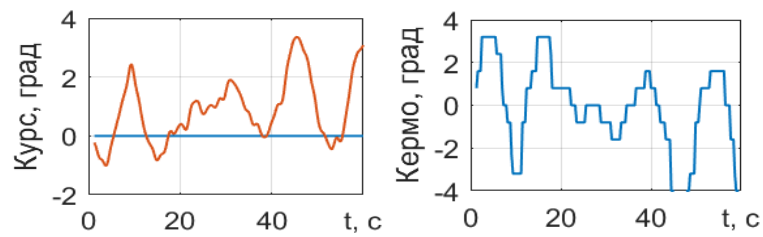


Рисунок 3.22 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

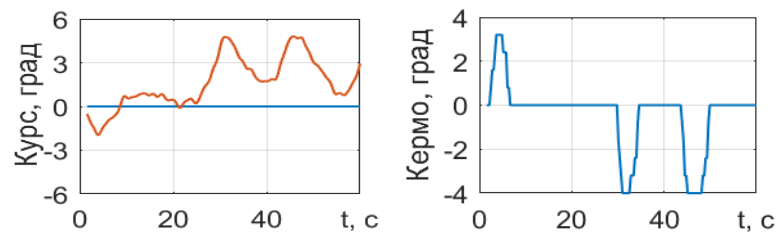


Рисунок 3.23 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.11. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок стерна (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

Експеримент № 5. Автостерновий з ПІД-регулятором.

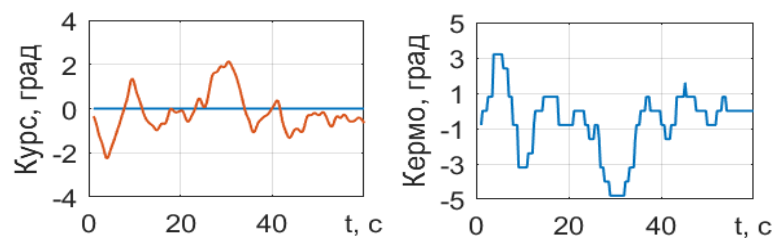


Рисунок 3.24 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

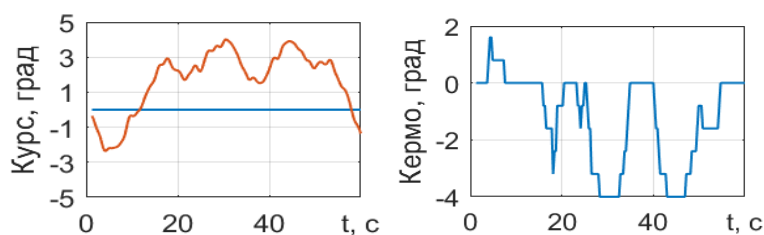


Рисунок 3.25 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.12. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок стерна (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

Експеримент № 6. Автостерновий з ПІД-регулятором.

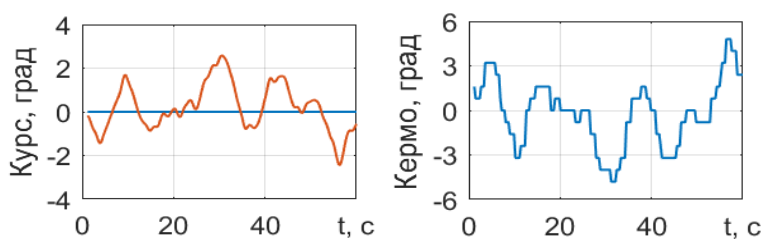


Рисунок 3.26 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

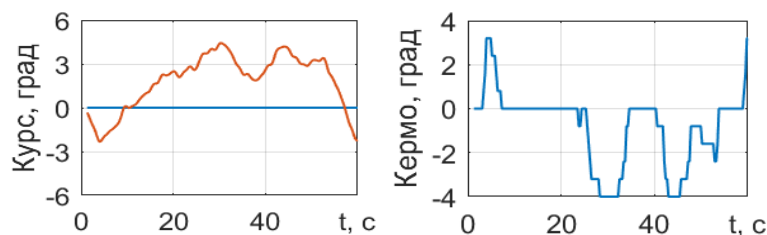


Рисунок 3.27 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.13. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість переключень стерна (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

Експеримент № 7. Автостерновий з ПІД-регулятором.

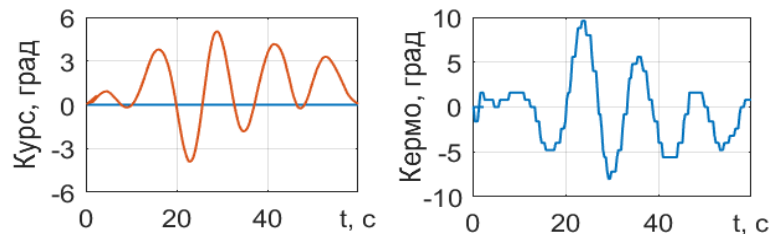


Рисунок 3.28 – Курс та переключення стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

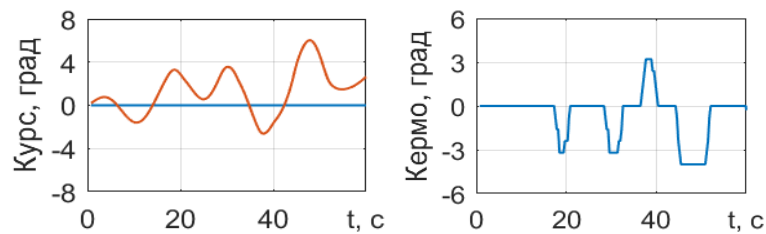


Рисунок 3.29 – Курс та переключення стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.14. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість переключень стерна (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

Експеримент № 8. Автостерновий з ПІД-регулятором.

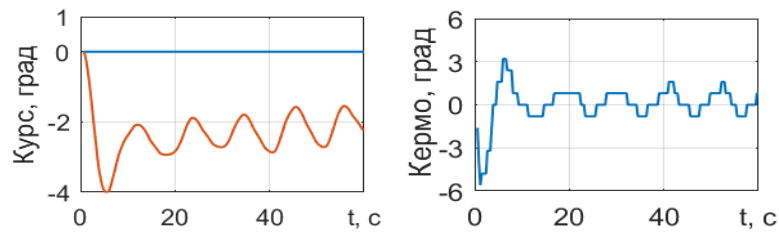


Рисунок 3.30 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

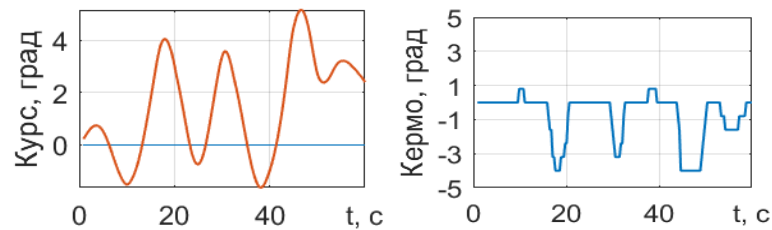


Рисунок 3.31 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.15. Результати дослідження

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

Експеримент № 9. Автостерновий з ПІД-регулятором.

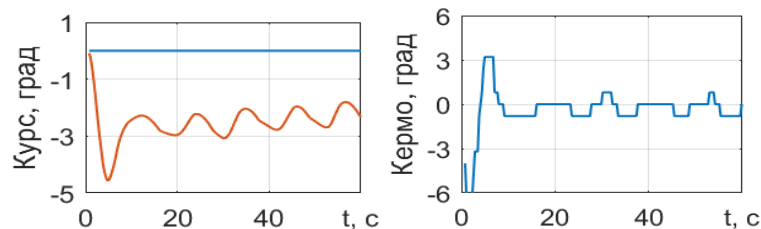


Рисунок 3.32 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з ПІД-регулятором

Автостерновий з нечітким регулятором.

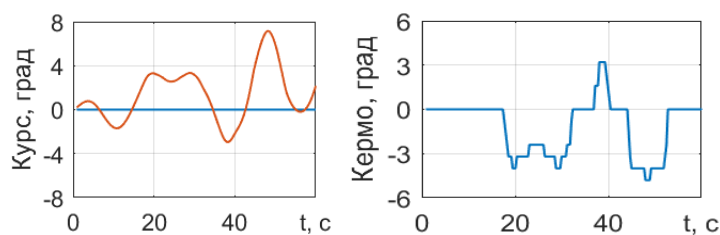


Рисунок 3.33 – Курс та перекладка стерна ШК 1 з нечітким регулятором

Таблиця 3.16. Результати дослідження

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		Кількість перекладок стерна (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

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

3.3.3. Аналіз отриманих результатів. Порівняння кількості перекладок стерна ШК1, керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, надано у табл. 3.17-3.18 та на рис. 3.24.

Таблиця 3.17. Кількість перекладок стерна ШК 1 з ПД-регулятором

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

Таблиця 3.18. Кількість перекладок стерна 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 перекладок стерна викликає боковий і кормовий вітер та хвилювання, що відповідає середньому стовпчику таблиць.

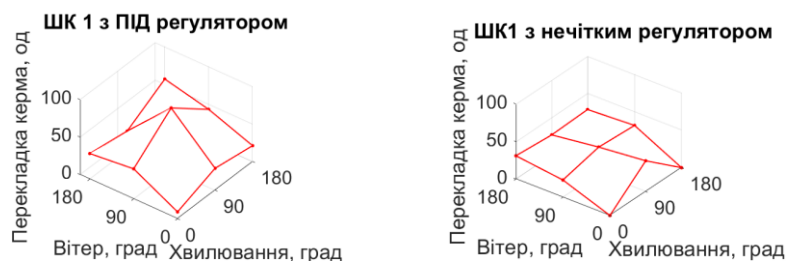


Рисунок 3.34 – Порівняння кількості перекладок стерна

Порівняння максимального відхилення від курсу ШК1, керованого ПІД-регулятором та нечітким регулятором, дано у табл. 3.19-3.20, рис. 3.35.

Таблиця 3.19. Максимальне відхилення від курсу ШК1 з ПІД-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 3.20. 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

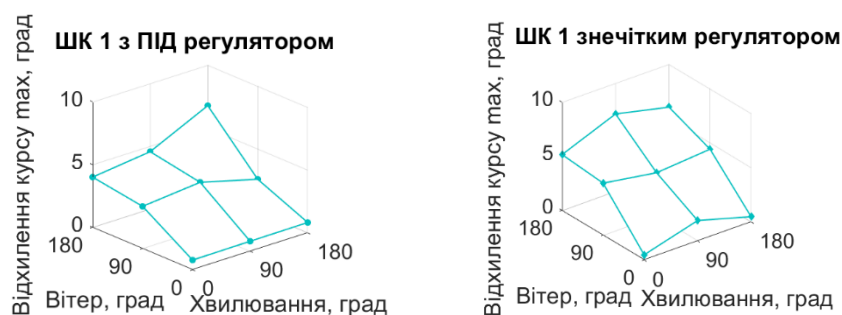


Рисунок 3.35 – Порівняння максимального відхилення

Порівняння математичного очікування ШК1 з ПД-регулятором та нечітким регулятором наведено у табл. 3.21-3.22 та на рис.3.36.

Таблиця. 3.21. 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 3.22. 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. 3.36.

Порівняння дисперсії ШК1, керованого ПД-регулятором та нечітким регулятором, наведено у табл. 3.3-3.4 та на рис. 3.36.

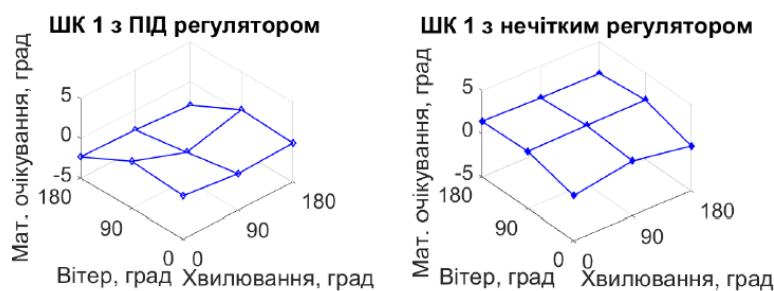


Рисунок 3.36 – Порівняння математичного очікування

Таблиця 3.23. Дисперсія ШК1 з ПІД-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 3.24. 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. 3.37.

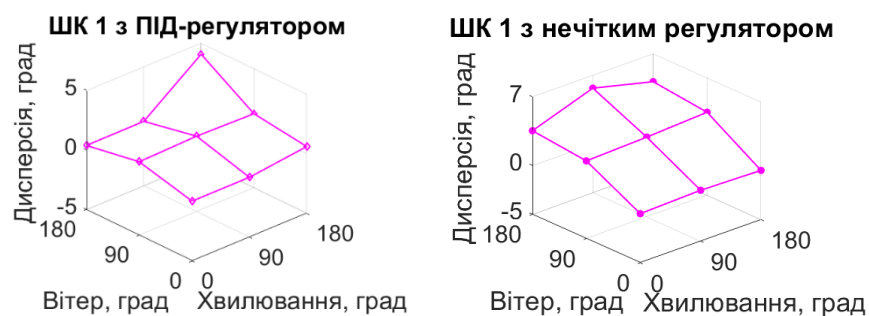


Рисунок 3.37 – Порівняння дисперсії

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 автостернового.

У якості узагальнюючого висновку за результатами комп'ютерного експерименту слід зазначити наступне:

розглянуто автостерновий пристрій з двома варіантами регуляторів стабілізації курсу – ПІД-регулятор та нечіткий регулятор;

для дослідження було обрано три основні напрямки впливу вітру та хвилювання: в ніс (0 град.); боковий (90 град.); кормовий (180 град.), які поєднувались у різних комбінаціях;

закон керування для нечіткого регулятора було задано у вигляді бази правил, розробленої з урахуванням досвіду людини-стернового під час управління малорозмірним судном за умов морського хвилювання; сутність такого керування полягає у фільтрації малих значень відхилення і кутового прискорення судна від заданих значень, а також, у ступінчастому відхиленні стерна, що значно знижує кількість його перекладок;

використання нечіткого регулятора дозволяє значно зменшити кількість перекладок стерна без значної втрати точності керування;

отримані результати моделювання дозволяють підвищити ефективність налаштування нечіткого регулятора з урахуванням різних умов вітро-хвильового збурення.

3.4 Стабілізація курсу малорозмірного безекіпажного судна з використанням штучної нейронної мережі

Штучні нейронні мережі (ШНМ) активно застосовуються в системах керування суднами, катерами та засобами морської робототехніки, сприяючи підвищенню якості керування, безпеці та ефективності морських операцій. Актуальність питання застосування ШНМ при керуванні морськими рухомими об'єктами широко розкрита авторами роботи [59], в якій проведено критичний аналіз та систематизацію існуючих досліджень у галузі застосування штучного інтелекту, включаючи глибоке навчання, для управління морськими судами.

З метою запобігання зіткненням і побудові точної траєкторії руху, авторами [60] запропоновано використання штучного інтелекту із контролерами руху для бразів.

Достатньо багато уваги приділяється питанню непередбаченого зовнішнього впливу на динаміку судна. Розробляються моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря [61, 62]. Основою моделі є щільно пов'язані згорткові нейронні мережі та поєднання глибоких нейронних мереж і інтервальних нечітких логічних моделей

Також ШНМ активно досліджуються для вдосконалення систем автоматичного керування судном. Розробляються контролери на основі ШНМ для автоматичного швартування суден, що спрямовані на підвищення безпеки та ефективності маневрів під час заходу в порт і причалювання [63]. Дослідження зосереджені на адаптивних нейромережевих контролерах для автоматичного швартування, які здатні підлаштовуватися до змін умов навколишнього середовища та динаміки судна [64].

У роботі [65] пропонується використання нейромережевої системи для управління курсом і позиціонуванням суден, що вирішує проблеми нелінійних багатовхідних систем із змінними умовами роботи.

Наявність зовнішніх впливів (вітер, хвилі), а також зниження маневрових характеристик на низьких швидкостях судна ускладнюють процедуру швартування. В дослідженнях [66, 67] запропоновано нову концепцію навчання ШНМ за допомогою методу нелінійного програмування.

За результатами виконаного аналізу літератури видно, що питання зовнішнього впливу на керованість судна залишається досить актуальним і на теперішній час. Очевидно, що вагомість даного впливу (вітер, хвилювання, течії) значною мірою залежить від класу судна.

Для малорозмірних безекіпажних надводних суден компенсація зовнішніх збурень має особливе значення з-за їх підвищеної чутливості до таких збурень та підвищених вимог до надійності функціонування стернового пристрою.

Багато дослідників сходяться на тому, що відхилення судна від заданого курсу внаслідок зовнішнього впливу можна дослідити і закласти в ПІ- чи ПІД-регулятор у вигляді прогнозованої моделі. Даний підхід є правильним,

оскільки спрощує роботу (структуру) самого регулятора і підвищує його ефективність. Однак, робота такого регулятора призводить до швидкого зношування виконавчого механізму стернового пристрою, оскільки останній в умовах дії зовнішніх збурень постійно працює в режимі перекладки стерна, намагаючись утримати малорозмірне судно на заданому курсі з мінімальною помилкою.

Тому завдання функціонування стернового пристрою з мінімальною кількістю перекладок стерна при одночасному збереженні прийнятної помилки стабілізації на курсі вимагає удосконалення системи автоматичного керування малорозмірного судна.

Для вирішення завдання обмеження кількості перекладок стерна, що виконує регулятор при утриманні судна на заданому курсі, пропонується застосування у структурі автостернового пристрою малорозмірного безекіпажного судна штучної нейронної мережі.

З цією метою роботи розглянемо можливість побудови нейромережевого регулятора для стабілізації курсу малорозмірного судна, який забезпечує мінімальну кількість перекладок стерна при одночасному збереженні прийнятної, попередньо заданої, помилки стабілізації на курсі в умовах дії на судно вітро-хвильових збурень.

Для цього необхідно розв'язати наступні основні завдання:

розробка структури регулятора, що містить штучну нейронну мережу та обчислювач оптимального кута перекладки стерна для визначення кута перекладки стерна в залежності від режиму руху, який задається системою керування вищого порядку;

формування бази даних для навчання штучної нейронної мережі на основі аналізу даних, отриманих шляхом попереднього математичного моделювання динаміки судна в умовах дії зовнішніх збурень;

перевірка працездатності роботи регулятора методом комп'ютерного експерименту.

Розглянемо завдання синтезу регулятора для стабілізації курсу судна.

Система автоматичного керування (САК) рухом судна за курсом вирішує наступні завдання: стабілізацію – автоматичне утримання судна на заданому курсі; маневрування – досить точне виконання отриманих сигналів керування.

Для реалізації завдання автоматичної стабілізації судна на курсі досить успішно використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор (див. п.р. 3.3) :

$$\alpha = k_1\psi + k_2\dot{\psi} + k_3 \int_0^t \psi dt$$

де α – кут перекладки стерна; $k_{1,2,3}$ – параметри керування; $\psi, \dot{\psi}$ – відповідно, відхилення судна від заданого курсу та перша похідна відхилення.

Принцип роботи такого регулювання полягає в тому, що зі збільшенням кута ψ та швидкості відхилення судна від курсу $\dot{\psi}$ збільшується кут перекладки стерна.

Далі будемо розглядати рушійно-стерновий пристрій «гвинт – стерно».

До регулятора надходить задане значення кута перекладки стерна α_3 та сигнал від датчика, який виробляє сигнал $\alpha_{дв}$, пропорційний куту відхилення судна від курсу.

Після обробки сигналу на двигун, що повертає стерно, подається відповідний сигнал керування у вигляді напруги живлення u .

Дійсний кут повороту стерна $\alpha_д$ за допомогою датчика зворотного зв'язку D_{33} порівнюється з заданим α_3 , що визначає тривалість роботи двигуна повороту стерна. Знак кута повороту визначається знаком напруги живлення.

Головним недоліком такого регулювання необмежена кількість перекладок стерна, які виконує регулятор, керуючись тільки відхиленням судна від заданого курсу. В умовах дії на судно зовнішніх збурень це призводить до невиправдано великої кількості перекладок стерна та інтенсивного зношування виконавчого механізму стерна (ВМС), проте, помилка $|\psi| > 0$ все одно має місце.

Для підвищення надійності та енергоефективності автостернового пристрою доцільно обмежити кількість переключень стерна з одночасною мінімізацією кількості переключень у залежності від заданого режиму руху судна R_{UPB} (див. п.р. 2.3) та зовнішніх вітро-хвильових збурень, інформація про які вимірюються системою сенсорів C_{33} . Для цього пропонується структура регулятора, що у своєму складі має ШНМ, яка буде визначати необхідний кут повороту стерна за ПІД-законом керування.

Знак та тривалість подавання напруги на двигун, який керує стерном, визначається відповідно до значення кута переключки стерна.

Функціональна схема регулятора для стабілізації курсу судна, що використовує штучну нейронну мережу, показана на рис. 3.38.

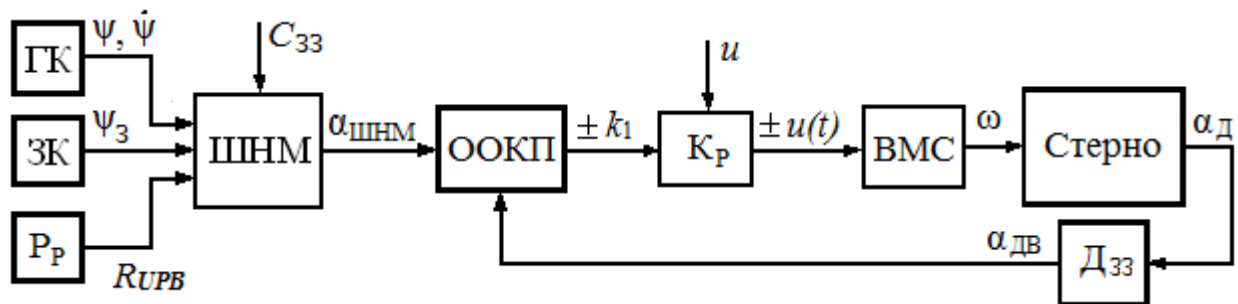


Рисунок 3.38. Функціональна схема регулятора для стабілізації курсу малорозмірного безекіпажного надводного судна

На рисунку позначено: ГК – гірокомпас; ЗК – задатчик курсу; К_р – перемикач, що подає живлення на виконавчий механізм стерна; ООКП – обчислювач оптимального кута переключки стерна; ψ_z , R_{UPB} – задані значення, відповідно, курсу судна і режиму його руху; Р_р – задатчик режиму руху; ψ – поточне значення курсу судна; u – напруга живлення виконавчого механізму стерна; ω – частота обертання ВМС.

Регулятор працює наступним чином. На вхід ШНМ надходять сигнали про поточний курс судна ψ та його кутову швидкість навколо вертикальної осі $\dot{\psi}$, а також сигнали від системи керування вищого рівня про заданий курс ψ_z .

судна ψ_3 та про заданий режим його руху R_{UPB} . Крім того, на вхід ШНМ надходить інформація про зовнішні збурення C_{33} , що діють на судно.

На виході ШНМ формується сигнал про необхідний кут перекладки стерна $\alpha_{\text{ШНМ}}$ за ПД-законом керування. Обчислювач ООКП визначає напрямок і тривалість сигналу повороту стерна. Його вихідний сигнал k_1 є керуючим для перемикача K_P , який подає напругу живлення на ВМС. Знак та тривалість подавання напруги на двигун, який повертає стерно, визначається відповідно до значення кута перекладки стерна $\alpha_{\text{ШНМ}}$.

За допомогою програмного пакету NNTool середовища Matlab отримано структуру нейромережного регулятора стабілізації курсу малорозмірного судна, наведену на рис. 3.39.

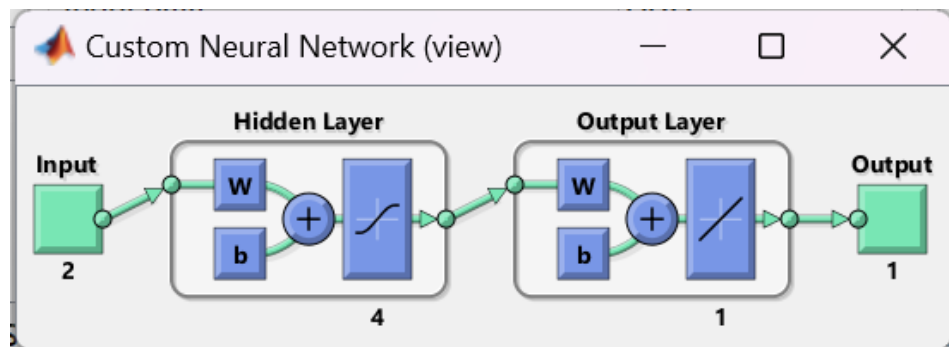


Рисунок 3.39 – Структура нейромережі

Отримана структура має наступні характеристики:

тип мережі – «Feed-forward backpropagation» з двома прихованими шарами;

перший шар містить 4 нейрони з функцією активації у вигляді тангенціальної сигмоїди;

другий шар складається з одного нейрона та лінійної функції активації.

Кількість нейронів прихованого шару було визначено експериментально у результаті аналізу якості навчання мережі.

Розглянемо тепер особливості побудови бази даних для навчання ШНМ. Режим руху судна (здатчик R_{UPB}) визначається в залежності від завдання, яке

виконує судно. Це може бути захід у порт, підхід до причалу, швидке переміщення з однієї точки маршруту в другу, рух за заданою траєкторією.

Також необхідно відзначити, що на точність утримання на курсі значно впливатимуть і зовнішні умови руху судна, які вимірюються системою сенсорів S_{33} . Наприклад, боковий вітер чи хвилювання водної поверхні призводять до значного відхилення від курсу.

Тому, при формуванні інформації, яка визначає допустиме значення кутів відхилення від курсу, необхідно враховувати дві складові – завдання руху та зовнішній вплив.

Для визначення оптимальних значень цих кутів застосовано метод математичного моделювання динаміки МБНС в умовах зовнішнього впливу [52, 51]. Для даного дослідження розроблено сценарії моделювання динаміки руху судна з різними комбінаціями вітро-хвильового впливу, за якими проведено серію комп'ютерних експериментів.

Зокрема, було досліджено динаміку руху малорозмірного катеру за наступних умов експлуатації: швидкість вітру – 10 м/с; напрямок вітру – 90° ; висота хвилі – 1 м; напрямок набігання хвилі – 180° .

У якості еталонної моделі регулятора курсу судна обрано ПІД-регулятор, на базі показників роботи якого сформовано вектори ψ та $d\psi$ для навчання нейронної мережі.

Було проведено серію комп'ютерних експериментів, в яких додатково проводилось індивідуальне налаштування параметрів ПІД-регулятора для досягнення найкращого результату [57],.

Якість керування при цьому оцінювалась за наступними критеріями: N_r – кількість перекладок стерна за хвилину моделювання; Dev_{max} – максимальне відхилення від курсу (помилка), градуси; Exp_{val} – математичне очікування, градуси; Var – дисперсія, градуси.

Виконаємо порівняльний аналіз роботи регуляторів стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього впливу.

Аналіз роботи синтезованого регулятора, оптимізованого за кількістю переключень стерна, проведено в системі Simulink Matlab. Під час моделювання судно повинно змінити свій курс з 0° на 135° і продовжити рух заданим курсом в умовах зовнішнього збурення. Умови моделювання: швидкість вітру – 10 м/с; напрямок вітру – 90° ; висота хвилі – 1 м; напрямок набігання хвилі – 180° .

Далі представлено результат моделювання руху судна, керованого по черзі ПД-регулятором (рис. 3.40), нечітким регулятором (рис. 3.41) та синтезованим регулятором з ШНМ (рис. 3.42).

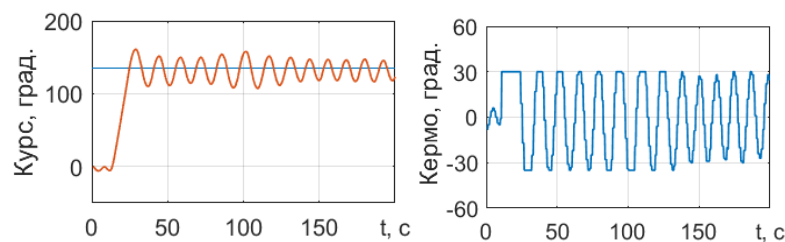


Рисунок 3.40 – Курс та переключка стерна судна, керованого ПД-регулятором

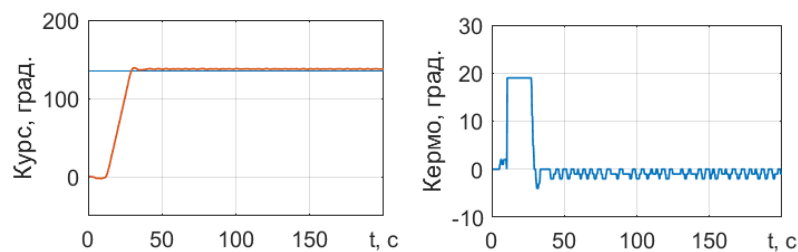


Рисунок 3.41 – Курс та переключка стерна судна, керованого нечітким регулятором

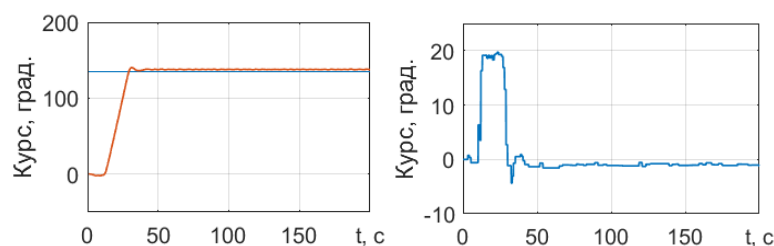


Рисунок 3.42 – Курс та переключка стерна судна, керованого регулятором на базі ШНМ

Порівняльний аналіз якості роботи регуляторів стабілізації курсу в умовах зовнішнього збурення представлено в табл. 3.35.

Таблиця 3.25. Аналіз якості керування

Тип регулятора	Вітер		Хвилювання		N_r (за хвилину моделювання), од.	Exp_{val} , градуси	Var , градуси	Dev_{max} , градуси
	швид- кість, м/с.	напря- мок, град.	висота хвиль, м.	напря- мок град.				
ПД	10	90	1	180	81	132	5.7	144.8
Fuzzy	10	90	1	180	40	137.5	0.45	137.9
ШНМ	10	90	1	180	32	137.7	0.05	138.1

Оцінка якості керування проводилась на інтервалі від 60 секунди по 120 секунду моделювання.

За результатами моделювання можна зазначити, що зовнішнє збурення суттєво впливає на якість керування МБНС. Цей фактор обумовлює необхідність корегування налаштувань регулятора в залежності від зовнішніх умов плавання та морської місії.

Очевидно, що ПД-регулятор має гірші показники якості керування в умовах сильного зовнішнього збурення. Також, до недоліку ПД-регулятора можна віднести необмежену кількість переключень стерна, яку він виконує при утриманні судна на курсі. Характерною особливістю даного регулятора є той факт, що за меншого зовнішнього збурення кількість переключень стерна майже не зменшується, змінюється лише кут повороту стерна.

Кращий результат отримано при роботі нечіткого регулятора – вдвічі менша кількість переключень стерна та вища точність керування (див. табл. 3.25). Слід відзначити, що даний регулятор налаштований не реагувати на відхилення від курсу менше за 2° . Тому можна сказати, що він має закладену статичну помилку.

Синтезований регулятор з ШНМ має регульоване обмеження на відхилення від заданого курсу, в залежності від зовнішніх умов та режиму

руху. На рис. 3.32. показана робота регулятора з обмеженням на відхилення, меншим за 2° . Тому на графіку він має схожу форму сигналу керування з нечітким регулятором, однак він має вищу ефективність за кількістю перекладок стерна.

Висновки до розділу 3

1. Розглянуто задачу автоматичної стабілізації на курсі МБНС в умовах дії вітро-хвильових збурень. Проаналізовано застосування чотирьох типів регуляторів — класичних ПД- та ПІ-регулятора, нечіткого регулятора та нейромережного — для реалізації функції стабілізації судна на курсі. Наведено порівняльний аналіз ефективності цих підходів з точки зору точності швидкодії та кількості перекладок стерна.

2. Проведено серію комп'ютерних експериментів з метою порівняння ефективності ПД- та ПІД-регуляторів, нечіткого та нейромережного регуляторів, які забезпечують стабілізацію МБНС на курсі в умовах вітро-хвильових збурень. Дослідження проводились для вох МБНС одного класу.

3. У результаті аналізу результатів комп'ютерних експериментів встановлено, що у порівнянні з ПД-регулятором кількість перекладок стерна МБНС про роботі ПІД-регулятора зменшується на 10-11%, а точність утримання на курсі суттєво покращується (до 21%). Застосування нечіткого регулятора дозволило вдвічі скоротити час перехідного процесу: з 60 секунд до 30 секунд, та значно підвищити точність утримання на заданому курсі.

4. В той же час встановлено, що ПІД-регулятор у порівнянні з нейромережним регулятором має гірші показники якості керування в умовах сильного зовнішнього збурення. Його недоліком є необмежена кількість перекладок стерна, яку він виконує при утриманні судна на курсі. Характерною особливістю даного регулятора є той факт, що за меншого зовнішнього збурення кількість перекладок стерна майже не зменшується,

змінюється лише кут повороту стерна. Перевагою ПД-регулятора є його універсальність та простота налаштування.

5. У порівнянні з ПД-регулятором карший результат показав нечіткий регулятор – він забезпечує вдвічі меншу кількість перекладок стерна та вищу точність керування. Слід відзначити, що даний регулятор налаштований не реагувати на відхилення від курсу менше за 2° . Тому можна сказати, що він має закладену статичну помилку.

6. У порівнянні з іншими регуляторами кращі показники якості керування має ШНМ-регулятор. База даних для навчання ШНМ була сформована з даних, отриманих шляхом математичного моделювання динаміки малорозмірного судна. У якості еталонної моделі керування було обрано ПД-регулятор, налаштований для обраного класу суден. Порівняльний аналіз максимального відхилення судна від курсу показує, що у нечіткого регулятора дане відхилення в середньому на два градуси більше.

7. Встановлено, що ШНМ-регулятор дає змогу регулювати припустиму величину відхилення судна від заданого курсу, в залежності від зовнішніх умов та режиму руху судна, що дає змогу адаптувати роботу автостернового пристрою МБНС у залежності від завдання місії та гідрокліматичних характеристик акваторії. Це дає можливість позбавитись від зайвого «підрулювання» і, навпаки, збільшувати чутливість для випадків, коли це необхідно для якісного виконання місії.

РОЗДІЛ 4

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИМ БЕЗЕКІПАЖНИМ НАДВОДНИМ СУДНОМ ЯК НОСІЄМ ЗАСОБІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

4.1 Загальні зауваження

На сучасному етапі розвитку засобів морської робототехніки відзначається стійка тенденція до впровадження безекіпажних морських платформ як носіїв спеціалізованих корисних вантажів, зокрема — бортових засобів морської робототехніки наукового та природоохоронного призначення [68]. Малорозмірні безекіпажні надводні судна розглядаються як перспективні носії для таких засобів завдяки своїй мобільності, низькій вартості та здатності виконувати задачі у складних морських умовах.

Разом із тим, на сьогоднішній день залишається невирішеною низка важливих наукових та прикладних задач, що ускладнюють створення комплексно автоматизованих МБНС з функцією ефективного використання бортових засобів морської робототехніки. Зокрема, до числа невирішених наукових задач належать:

задача автоматизованого керування корисним вантажем, яким виступають бортові засоби морської робототехніки; розв’язок цієї задачі передбачає розроблення спеціалізованих алгоритмів керування, що забезпечують підготовку, активацію, запуск відповідних технічних засобів для виконання функцій за призначенням та їх повернення на борт МБНС як носія цих засобів;

задача забезпечення працездатності МБНС в умовах дії вітро-хвильових збурень; розв’язок цієї задачі передбачає розширення функціональних можливостей МБНС за рахунок придання йому нових експлуатаційних властивостей та розробки заходів щодо автоматизації керування цим судном у нових для нього режимах експлуатації.

Зазначені задачі потребують комплексного вирішення з використанням методів системного аналізу, математичного моделювання, сучасної теорії автоматичного керування та програмно-апаратної інтеграції.

Дослідження має на меті закласти науково-технічне підґрунтя для створення ефективної архітектури управління МБНС нового покоління, що функціонують як багатоцільові морські платформи з можливістю виконання складних дій у динамічному та невизначеному середовищі.

У зв'язку з цим, у межах даної дисертаційної роботи ставиться задача розроблення теоретичних засад і практичних рішень щодо автоматизації керування малорозмірним безекіпажним надводним судном як носієм бортових засобів морської робототехніки, з урахуванням зазначених вище невіршених питань.

4.2 Розробка множини алгоритмів керування МБНС як носієм бортових засобів морської робототехніки

Одним з перспективних напрямків розвитку засобів морської робототехніки (ЗМР) є розробка і створення безекіпажних надводних суден, які, свою чергу, є носіями надводних, підводних і літаючих морських роботів [69, 70]. Такі судна мають водотоннажність від 5000 до 16000 тон і призначені для проведення океанських досліджень на великих відстанях від берегових центрів керування.

Однак, територіальні води України Азовського і Чорного морів (12 миль) та виключна морська економічна зона України (до 200 миль) виключають можливість використання таких безекіпажних надводних суден з-за їх низької економічної ефективності.

Це стимулює розробку і створення МБНС, які б мали меншу водотоннажність та відносно малі експлуатаційні витрати і, одночасно, мали б можливість транспортувати і застосовувати за призначенням малорозмірні надводні та підводні апарати і безпілотні літаючі апарати коптерного типу.

Попередній аналіз науково-технічної літератури свідчить, що сучасні завдання морської діяльності вітчизняних організацій на морі можна розділити на три великих напрямки [71]:

прикладні наукові дослідження морського середовища, пов'язані вивченням гідрофізичних та гідрохімічних характеристик водного середовища та їх впливу на клімат, природоохоронних робіт, робіт з підводної археології тощо;

промислові роботи на морі, пов'язані з видобуванням енергоносіїв та мінеральної сировини, будівельних матеріалів та харчових продуктів;

роботи, пов'язані з безпекою мореплавства – гуманітарне розмінування акваторій, протидиверсійна робота, захист від проявів морського тероризму та піратства.

Одним з головних напрямків технічного забезпечення розв'язку вказаних завдань є комплексне застосування засобів морської робототехніки різних типів – безекіпажних надводних суден різних типів, автономних та прив'язних підводних апаратів, а також безпілотних літаючих апаратів коптерного типу.

Тому розробка і створення МБНС як носіїв такої техніки є актуальним прикладним науковим завданням.

Малорозмірні безекіпажні судна відносяться до засобів морської робототехніки (ЗМР), які на цей час активно розвиваються [11, 72]. Однак, відомості про їх використання у якості носіїв інших типів ЗМР на сьогодні практично відсутні. Однією з головних задач творення такого виду морської техніки є розробка алгоритмічного забезпечення їх функціонування у нормальних та аварійних режимах. Важливість постановки такої задачі обумовлена потребою створення теоретичного підґрунтя для синтезу САК МБНС як носія ЗМР та керованої платформи для застосування ЗМР за призначенням.

Розглянемо можливий склад ЗМР, що знаходяться на борту МБНС та функціонування яких має бути забезпечено САК МБНС.

До типових бортових ЗМР МБНС належать [27, 73, 74]:

- надводні безекіпажні однокорпусні та двохкорпусні човни (НБЧ);
- автономні підводні апарати (АПА)
- самохідні прив'язні підводні апарати (СППА);
- буксирувані підводні апарати (БПА);
- безекіпажні літаючі апарати коптерного типу (БЛА).

Всі вище наведені бортові ЗМР оснащені пошуковими приладами та апаратурою для проведення досліджень водного середовища та повітряного простору згідно з місією, яку виконує МБНС. Автоматичне керування таким складним морським рухомим об'єктом, як МБНС, висуває жорсткі вимоги для його САК.

Алгоритмічне забезпечення є початковою документацією, з якої починається розробка САК МБНС, і містить бібліотеки алгоритмів, які регламентують функціонування всіх його виконавчих механізмів.

Розглянемо типовий варіант узагальненого алгоритму функціонування САК МБНС, який знаходиться у заданій точці моря і забезпечує роботу АПА (див. рис. 4.1).

Узагальнений алгоритм описує керування процесом спуску на воду i -го контейнера, в якому знаходиться i -й АПА, керування роботою АПА при виконанні підводної місії та поверненням контейнера і АПА на борт МБНС. Зазначимо, що зазвичай бортові ЗМР знаходяться у спеціальних контейнерах на палубі МБНС і опускаються за борт за допомогою спеціального палубного спуско-підйомного пристрою (СПП) маніпуляторного типу. Наведений узагальнений алгоритм описує лише один з режимів роботи МБНС та того палубного обладнання, яке задіяне для спуску/підйому ЗМР.

У загальному випадку, при розробці алгоритмічного забезпечення для МБНС необхідно синтезувати деяку множину базових алгоритмів $A_{\text{МБНС}}$, які охоплюють наступні основні складові САК такими суднами:

- автоматичні навігація, зв'язок та керування рухом МБНС (підмножина алгоритмів $A_{\text{НС}}$);

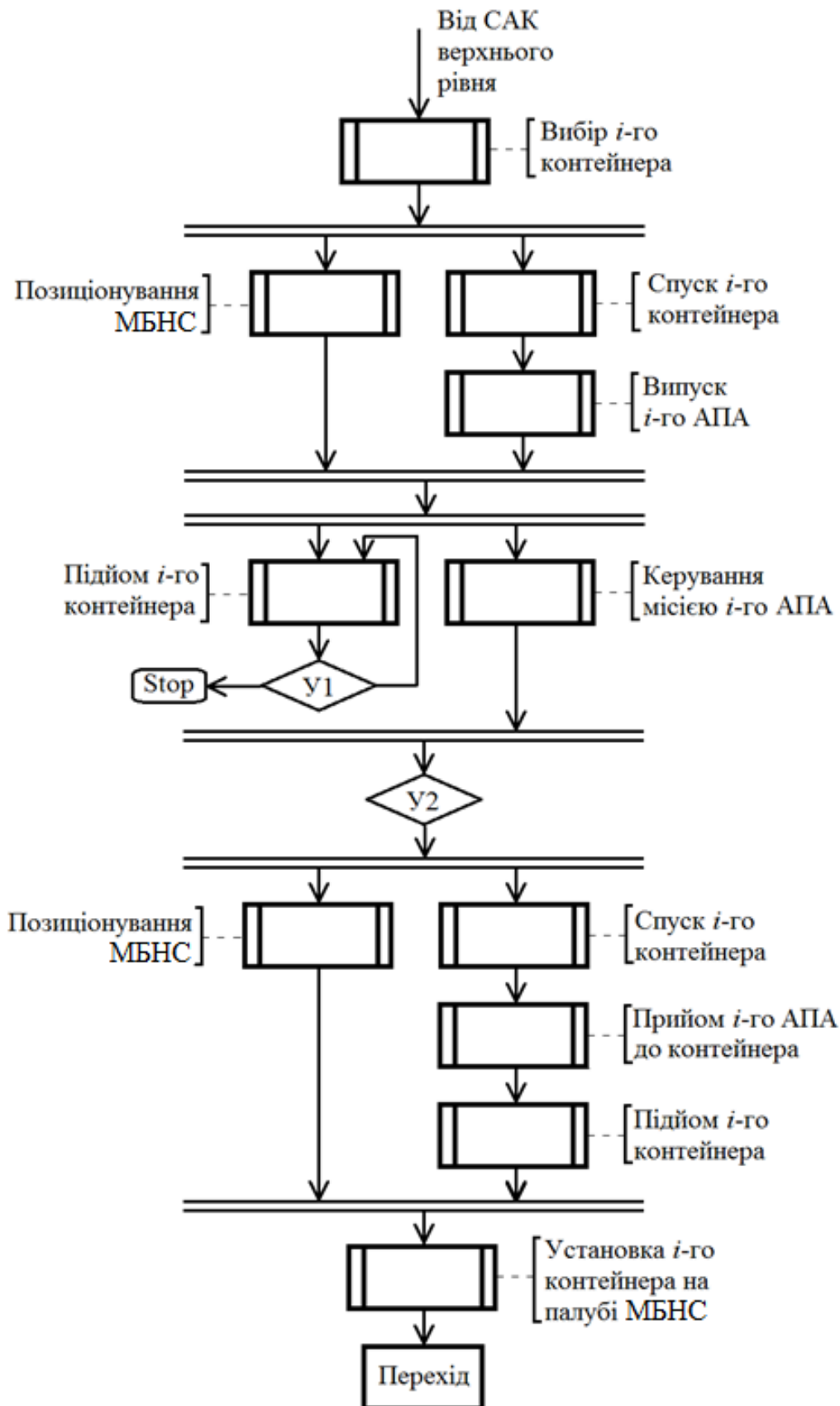


Рисунок 4.1 – Узагальнений алгоритм функціонування САК МБНС

- автоматичне керування електроенергетичною установкою МБНС
(підмножина алгоритмів A_{EE});

- автоматичне керування корисним вантажем МБНС – розташованими на його палубі ЗМР різного типу (підмножина алгоритмів A_P);
- автоматичне керування палубними механізмами МБНС, які використовуються для роботи з ЗМР (підмножина алгоритмів A_{DM}).

Тоді множину $A_{МБНС}$ алгоритмів керування МБНС як носієм бортових засобів морської робототехніки можна представити у вигляді відношення:

$$A_{МБНС} = \{A_{NC}; A_{EE}; A_P; A_{DM}\}. \quad (4.1)$$

Відношення (4.1) утворює перелік базових підмножин алгоритмів керування МБНС і може слугувати науково-організаційною основою для розробки алгоритмічного забезпечення як складової синтезу САК МБНС.

4.3 Автоматизація керування корисним вантажем МБНС науково-дослідницького та природоохоронного призначення

Малорозмірні безкіпажні надводні судна набувають все більш широкого застосування при вивченні й використанні морського середовища та його захисті від антропогенного впливу [75]. Очевидно, що основне завдання таких суден у цих морських операціях – бути носієм приладів та інструментів, за допомогою яких, власне, і виконуються наукові дослідження та природоохоронні місії. З позицій керування такі прилади й інструменти будемо називати корисним вантажем (КВ, в англomовній літературі – payload of the vessel, (PV).

У зв'язку з постійним розширенням морських операцій та підвищенням їх складності перелік типів корисного вантажу, який використовують з борту безкіпажних надводних суден при дослідженні морського середовища, також зростає [76, 77]. Це вимагає подальшого розвитку і вдосконалення систем керування як безкіпажними суднами, так і систем керування їхнім корисним вантажем.

У даному дослідженні будемо розглядати задачі автоматизації керування для двох основних видів КВ для МБНС – малогабаритних автономних ненаселених підводних апаратів для дослідження підводного середовища (АНПА, англomовній літературі – Autonomous Underwater Vehicles, AUV) і безпілотних літальних апаратів коптерного типу (в англomовній літературі – Unmanned Aerial Vehicles, UAV) – для дослідження повітряного морського середовища [78].

Для початку виконаємо аналіз особливостей автоматичного керування корисним вантажем МБНС як складової завдання його комплексної автоматизації, а також розробка складу обладнання та узагальнених алгоритмів керування основними видами корисного вантажу такого судна.

Попередні дослідження у напрямку синтезу систем керування безекіпажних надводних суден, в основному, стосувались їх електронної навігації та керування просторовим рухом [79]. Дослідження систем керування їх корисним вантажем на цей час вкрай обмежені [80].

Попередній аналіз публікацій дає змогу констатувати, що питання автоматизації КВ для МБНС знаходяться на початковій фазі їх дослідження і розробки.

Так, технічні рішення провідної фірми у галузі підводної техніки ECA GROUP» [81] являють собою громіздкі рамні конструкції та потребують ручного керування палубною командою науково-дослідного судна.

У роботі [82] наведено детальний огляд літератури щодо сучасних методик наведення стикування АНПА з підводним контейнером, визначаються їх відносні переваги та недоліки. Але повний цикл спуску та підйому контейнера у роботі не розглядається.

У статті [83] обговорюються рішення, які дають змогу АНПА повертатися до підводного контейнера (док-системи), механічно закріпитись, передати дані та отримати підзарядку бортових акумуляторів. Однак, задачу автоматичного спуску і підйому АНПА з контейнером автори не розглядають.

Публікації [84, 85] присвячені розробці системи підводної стиковки АНПА, яка поєднує в собі інтелектуальне розпізнавання об'єктів і глибоке навчання на основі принципу глибокого підкріплення (Deep Reinforcement Learning approach). Однак, питання повної автоматизації процесу випуску і повернення АНПА на борт судна у статті не розглядається.

Найбільш повне рішення проблеми автоматичного спуску та підйому АНПА міститься у патенті [86], де група підводних апаратів закріплюється у контейнері барабанного типу і послідовно випускається у воду для виконання групової місії. Недоліком такого технічного рішення є відсутність, власне, контейнера як місця тривалого зберігання АНПА з системою клімат-контролю, а також складність повернення АНПА на МБНС після виконання місії.

Щодо автоматизації застосування а цей час основні публікації присвячені розвитку ідеї «Drone-in-a-box» для транспортування і використання безпілотних літальних апаратів – квадрокоптерів та опису варіантів конструкції транспортних кейсів для них. Значна кількість таких кейсів уже ринково доступна.

Так, у [87-89] пропонуються варіанти транспортних кейсів для дронів у вигляді рюкзака чи ручної валізи. Однак такі кейси призначені тільки для зберігання дронів і не придатні для застосування в автоматичному режимі експлуатації.

Більш перспективним для завдань автоматизації є конструкція «Dronehub» [90], яка являє собою автоматичний контейнер, який забезпечує такі операції, як запуск дрона та його приземлення, процес зарядки акумулятора дрона. Контейнер оснащений клімат-контролем і метеостанцією, тому він може працювати за всіх погодних умов, що робить його ідеальним для використання у польових умовах. Інтелектуальне керування батареями підтримує оптимальну температуру батарей дрона, значно подовжуючи термін їх служби та продуктивність під час польоту.

Проте, конструкція контейнера не герметична і тому його не можна використовувати у морських умовах.

Ще один варіант конструкції автоматичного контейнера для дрона, призначеного для моніторингу процесів дорожнього руху, наведено у [91]. Конструкція являє собою док-станцію, є міцною, надійною та створеною для цілодобового застосування. Кожна док-станція забезпечує автоматичний зліт дрона, його приземлення та заряджання. Одна док-станція DJI важить менше 105 кг і займає площу менше 1 квадратного метра. Для налаштування потрібна лише фіксація на землі, доступ до живлення та Інтернету та швидке налаштування за допомогою пульта дистанційного керування.

Однак, конструкція док-станції не передбачає її використання в умовах морської хитавиці та заливання хвилями.

У матеріалі [92] описано конструкцію коробки для дрона, у якій він може автоматично заряджатись, а сама коробка служить платформою для зльоту та посадки дрона. Коробка стійка до вологи, легка і компактна, має пристрій для фіксації дрона після його посадки, не потребує складного технічного обслуговування.

Проте, конструкція коробки не герметична і не призначена для експлуатації у морському середовищі.

Аналіз оглядового матеріалу [93-95] показує, що незважаючи на суттєві досягнення у напрямку створення і застосування автоматичних контейнерів для дронів їх конструкції не призначені для використання у морських умовах.

Аналіз особливостей виконання морських досліджень у територіальних водах України вказує на необхідність створення і застосування МБНС, спроможних виконувати широкий спектр морських дослідницьких місій. Такі судна мають бути носіями широкого спектру обладнання для досліджень водного та повітряного середовища морської акваторії.

Комплексна автоматизація МБНС вимагає розробки систем керування не тільки, власне, судном, а й його корисним вантажем – підводними і повітряними апаратами-роботами як складових роботизованого

дослідницького комплексу «МБНС – КВ».. При цьому морське транспортування, зберігання і застосування КВ доцільно виконувати з використанням автоматичних контейнерів спеціальної конструкції.

Завдання автоматизації таких контейнерів належить до актуальних завдань повної автоматизації безекіпажних надводних суден і передбачає розробку конструкції та алгоритмів керування такими об'єктами, що і є головною метою дослідження.

Виходячи з принципів системного підходу [23] при аналізі сучасного стану автоматизації традиційних і безекіпажних надводних суден науково-дослідницького призначення корисний вантаж таких суден пропонується класифікувати у вигляді двох великих груп:

групи G_D КВ палубного зберігання і використання (в англomовній літературі – deck storage and use);

групи G_C КВ контейнерного зберігання і використання (в англomовній літературі – container storage and use).

Першу групу утворюють:

автономні ненаселені підводні апарати, G_{D-AUV} як носії вимірювальних приладів [96];

прив'язні самохідні (в англomовній літературі – Remotely Operated Vehicles) G_{D-ROV} підводні апарати як носії вимірювальних приладів та пробовідбірників води та ґрунту [97];

прив'язні буксировані (в англomовній літературі – Towed Underwater Vehicles) G_{D-TUV} підводні апарати як носії вимірювальних приладів [98];

опускні прилади і системи (в англomовній літературі – lowering devices and system, LDS) G_{D-LDS} для вимірювання гідрофізичних та гідрохімічних параметрів водного середовища [99].

Другу групу утворюють:

безпілотні літаючі апарати G_{C-UAV} (зазвичай, коптерного типу) [100];

метеозонди G_{C-WB} (в англomовній літературі – Balloon-borne) (гумові або пластикові кулі, які перед застосуванням автоматично заповнюються воднем або гелієм) [101].

Корисний вантаж першої групи розмішуються на палубі МБНС у спеціальних механізованих ложементax і призначені для вивчення підводного середовища, включаючи і донну поверхню. Такий КВ оснащений сенсорами гідрофізичних і гідрохімічних параметрів морського середовища, підводними фото-і відеокамерами, пробовідбірниками води і ґрунту, гідроакустичними та магнітометричними приладами, підводними маніпуляторами тощо. КВ такої групи, зазвичай, є багаторазовими і такими, що мають повертатись до МБНС після завершення підводної місії.

Корисний вантаж другої групи призначені для вивчення атмосфери над морем, оснащені фото- відео- та іншою науковою апаратурою і є одноразовим обладнання, яке не повертається до МБНС після виконання місії, або багаторазовим обладнанням, яке повертається до МБНС і є придатним для подальшого багаторазового застосування. Вони транспортуються безекіпажним судном до місця призначення у спеціальних контейнерах, які забезпечують їм необхідні кліматичні та механічні умови зберігання та автоматичне застосування за призначенням.

Зазначимо, що на цей час у якості носіїв цих груп КВ застосовуються традиційні науково-дослідні судна значних розмірів, які мають можливість розмістити велику кількість КВ різного призначення [102].

Сучасні задачі дослідження територіальних вод України вимагають масового застосування малорозмірних безекіпажних надводних суден – безекіпажних надводних суден довжиною від 5 до 20 метрів. Такі судна мають обмежену вантажомісткість і тому можуть одночасно перевозити обмежену кількість змінного КВ. Це обумовлює необхідність уніфікації КВ з позиції їх дистанційного керування та створення МБНС, які здатні бути носіями широкого спектру змінного КВ різного призначення.

Одним з можливих шляхів такої уніфікації є перехід до контейнерного зберігання КВ (група G_C) та до уніфікації палубного обладнання для роботи з цими контейнерами.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що на сьогодні створення контейнерів та пускових установок для засобів морської робототехніки розробляється для великих підводних апаратів і тільки за умов наявності людини-оператора. Для МБНС це неприйнятно, оскільки такі судна функціонують виключно автоматично.

Тому у роботі пропонується концепція модульної автономії для створюваного морського дослідницького комплексу «МБНС – КВ» як морського робота, який має у своєму складі змінний КВ широкої номенклатури. Сутність концепції полягає у створенні типорозмірного ряду КВ підводного та повітряного використання, які транспортуються та експлуатуються з борту МБНС за допомогою автоматичних контейнерів спеціальної конструкції (АКС). Причому, конструкція КВ та процеси керування ним уніфіковані з метою спрощення програмного та апаратного забезпечення і підвищення надійності функціонування обладнання судна та КВ.

Розглянемо склад обладнання АКС та особливості автоматичного керування ним більш детально на прикладах контейнерів для КВ двох типів: G_{D-AUV} та G_{C-UAV} .

Для G_{D-AUV} автоматичний контейнер $АКС_{D-AUV}$, у якому розміщується затискач з АНПА, розміщується на палубі МБНС разом з його вантажним пристроєм маніпуляційного типу (ВПМ). ВПМ призначений для автоматичного вивантаження платформи з затискачем та з АНПА у робочу зону підводного простору МБНС перед початком місії, випуску АНПА з платформи з затискачем для виконання підводної місії, приймання АНПА до платформи з затискачем після завершення місії та її повернення на палубу МБНС до $АКС_{D-AUV}$ після завершення місії.

Очевидно, що ступінь захисту AKC_{D-AUV} має бути не нижче $IP56$ (пилозахищений, захищений від морських хвиль).

Основні складові комплексу «ВПМ – AKC_{D-AUV} » для G_{D-AUV} показано на рис. 4.2,а, а фаза вивантаження платформи з затискачем та з АНПА у робочу зону підводного простору МБНС перед початком місії показана на рис.4.21,б.

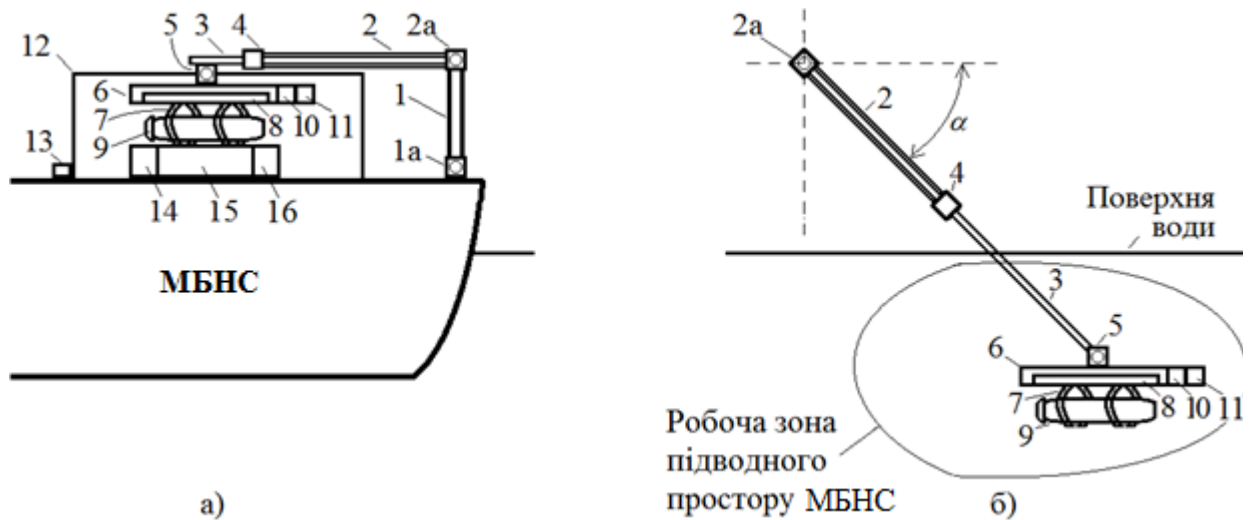


Рисунок 4.2 – Основні складові комплексу «ВПМ – AKC_{D-AUV} » для G_{D-AUV}

Конструктивно ВПМ представляє собою двохланковий вантажний механізм, перша ланка 1 якого спирається на поворотну по вертикалі основу з приводом 1а, а друга ланка 2 має телескопічну структуру і з'єднана з ланкою 1 за допомогою шарніра 2а з приводом. Шарнір 2а забезпечує дві керовані ступені рухливості для першої ланки 1 ВПМ – поворот навколо вертикальної осі першої ланки 1 на 360° і нахил вниз на кут α .

Висувна частина 3 другої ланки 2 має можливість виконувати поздовжній рух за допомогою привода 4.

На кінці висувної частини 3 другої ланки 2 знаходиться шарнір з приводом 5, який прикріплений до платформи 6 з затискачем 7 та його приводом 8, що утримує корпус АНПА 9 при його знаходженні всередині АКС та під час автоматичного переміщення АНПА у робочу зону підводного простору МБНС.

Платформа 6 містить також систему сенсорів її просторового положення під водою 10 та навігаційний маяк 11 (гідроакустичний чи оптичний) для автоматичного приведення АНПА до платформи 6 після виконання підводної місії.

До складу AKC_{D-AUV} входять:

зовнішній корпус 12 з розташованими боковими стулками (на рис. 4.2 не показані), які автоматично розкриваються за допомогою системи приводів 13 для виконання операції вивантаження на правий чи лівий борт МБНС платформи 6 разом з затискачем 7 і АНПА 9 перед початком місії та закриваються після прийому платформи з АНПА всередину AKC_{D-AUV} після завершення місії;

розташовані всередині AKC_{D-AUV} система локального керування 14 обладнанням контейнера, затискач з приводом 15 для фіксації положення АНПА «по-похідному», а також система клімат-контролю 16 всередині контейнера.

Узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування комплексом «ВПМ – AKC_{D-AUV} » для G_{D-AUV} як складова алгоритму автоматичного керування МБНС при виконанні ним місії дослідження морського середовища наведено на рис. 4.3.

Дамо опис окремих блоків алгоритму у порядку їх нумерації.

Б1 – ініціалізація програми використання комплексу «ВПМ – AKC_{D-AUV} » для виконання підводної місії; тут у бортовий контролер АНПА завантажуються код програми заданої місії, яку має виконати АНПА, а до системи керування ВПМ – програма його роботи, яка враховує вітро-хвильові збурення та положення МБНС відносно них.

Б2, Б3 – передстартова автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС»; тут на основі вбудованих сенсорів у автоматичному режимі перевіряється технічний стан виконавчих механізмів ВПМ та стан готовності АНПА до виконання місії.

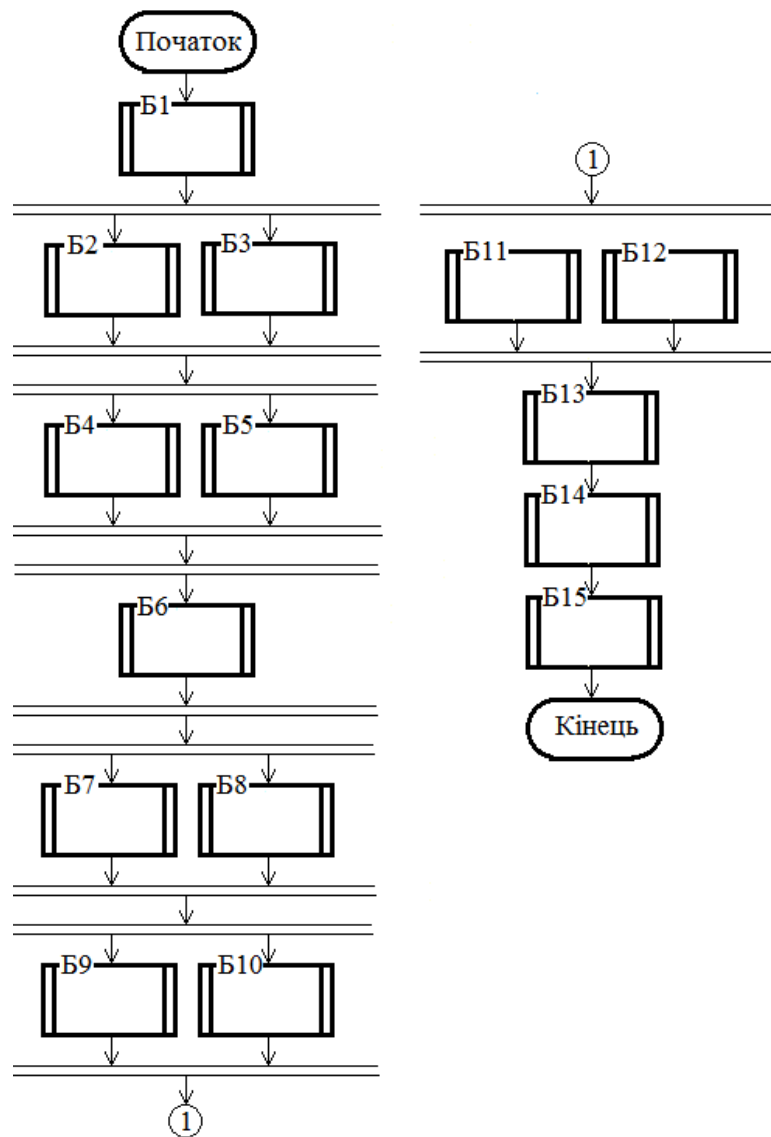


Рисунок 4.3 – Узагальнений алгоритм керування процесом випуску АНПА для виконання місії дослідження морського середовища

Б4 – розкривання бокових стулоч АКС; тут за допомогою системи приводів 12 ліва і права стулочки зміщуються спочатку, відповідно, вліво і вправо, вивільняючи шарнір з приводом 5, а потім зміщуються вперед, що забезпечує можливість подальшого кругового руху ланки 2 з платформою 6, затискачем 7 і АНПА 9 над палубою МБНС.

Б5 – переведення АНПА з положення «по-похідному» у положення «робоче» у результаті спрацювання затискача з приводом 14.

Б6 – робота шарніра з приводом 2а, що забезпечує поворот ланки 2 ВПМ з платформою 6, затискачем 7 і АНПА 9 навколо вертикальної осі першої

ланки 1; у результаті цього руху платформа з АНПА повертається на кут 180° і знаходиться над робочою зоною підводного простору МБНС.

Б7, Б8 – одночасна робота шарніра з приводом 2а (нахил ланки 2 вниз на заданий кут α) і привода 4 (поздовжній рух висувної частини 3 другої ланки 2); у результаті цих рухів платформа 6 разом з затискачем 7 і АНПА 9 потрапляє у робочу зону підводного простору МБНС (рис. 4.2,б).

Б9, Б10 – одночасна робота приводу 8 затискача 7 і механізмів руху АНПА (його рушійного пристрою та/або баластної системи); у результаті роботи цих механізмів затискач вивільняє АНПА для самостійного керованого руху, а АНПА відходить від платформи 6 для початку виконання підводної місії.

Б11, Б12 – одночасна робота шарніра з приводом 2а (підйом ланки 2 до значення кута $\alpha=0$ і привода 4 (поздовжній рух висувної частини 3 другої ланки 2 у зворотному напрямку); у результаті цих рухів платформа 6 разом з затискачем 7 знаходиться над робочою зоною підводного простору МБНС, причому висувна частина 3 другої ланки 2 знаходиться у початковому положенні.

Б13 – робота шарніра з приводом 2а, що забезпечує поворот ланки 2 ВПМ з платформою 6 і затискачем 7 навколо вертикальної осі першої ланки 1 у положення над АКС.

Б14 – закривання стулоч АКС, для чого система приводів 12 зміщує ліву і праву ступки назад, а далі, відповідно, вліво і вправо, ущільнюючи шарнір з приводом 5, що забезпечує для АКС_{D-AUV} ступінь захисту *IP56*.

Б15 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС» (крім АНПА).

Очевидно, що в основному алгоритм повернення АНПА на борт МБНС буде схожим з вище описаним алгоритмом. Особливістю цієї частини узагальненого алгоритму є приведення АНПА до платформи 6 за допомогою навігаційного маяка. При цьому платформа 6 має знаходитись у робочій зоні підводного простору в результаті виконання блоків Б1 – Б8.

Опишемо цю частину узагальненого алгоритму більш конкретно, вважаючи, що затискач 7 знаходиться у відкритому стані та готовий до прийому АНПА.

Блоки алгоритму повернення АНПА на борт МБНС, які будуть відрізнятися від однойменних на рис. 4.3, будемо позначати літерою «Ф».

БФ9 – включення навігаційного маяка як маркера знаходження платформи 6 для системи наведення АНПА.

БФ10 – автоматичний підхід АНПА у зону роботи затискача 7 платформи 6 та спрацювання затискача 7 на фіксацію АНПА на платформі 6.

БФ15 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС».

Описаний узагальнений алгоритм може бути основою для синтезу системи автоматичного керування процесом використання АНПА згідно до концепції модульної автономії дослідницького МБНС.

Очевидно, що для кожної складової групи G_D КВ палубного зберігання і використання має бути розроблено окремий тип АКС, який має враховувати особливості конструкції та використання відповідного КВ цієї групи.

Розглянемо тепер склад обладнання та особливості автоматичного керування АКС для G_{C-UAV} .

Такий контейнер також знаходиться на палубі МБНС, але не потребує додаткового палубного обладнання при експлуатації.

Зазначимо, що у науково-технічній літературі наводяться відомості лише про контейнери для UAV, які передбачають тільки ручні операції та сухопутне використання [18-20].

Тому, виходячи з пропонованої концепції модульної автономії та враховуючи розробки наукової школи «Підводна техніка» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, автор пропонує новий підхід до розробки і створення АКС G_{C-UAV} , який передбачає повну автоматизацію процесів транспортування, зберігання і застосування КВ типу одноразового UAV типу «коптер».

Конструктивно до складу такого АКС G_{C-UAV} входять (див. рис. 4.4):

зовнішній герметичний корпус 1 АКС з розташованою у його верхній частині кришкою 2, яка автоматично відкривається для випуску коптера з АКС;

розташовані у корпусі АКС виконавчий механізм 3 відкривання/закривання кришки АКС, механізм 4 висування ложементу 5 з коптером 6 та його фіксатором у положенні «по-похідному» 7, система 8 клімат-контролю для коптера, система 9 автоматичного керування коптером, система 10 живлення коптера, система 11 автоматичної діагностики коптера і технічного стану виконавчих механізмів і систем АКС.

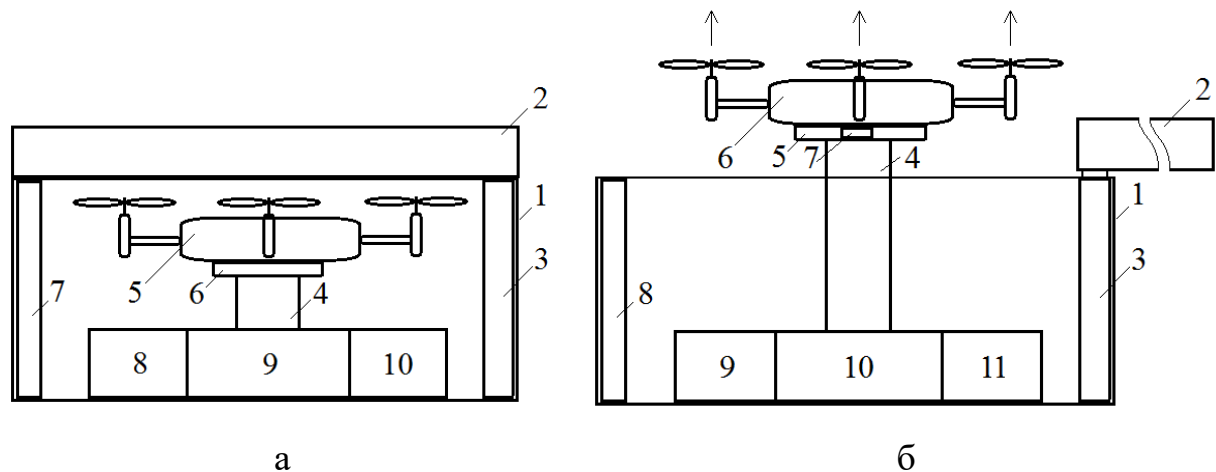


Рисунок 4.4 – Основні складові АКС G_{C-UAV} :

а – АКС у режимі «по-похідному»; б – АКС у режимі випуску коптера

Узагальнений алгоритм керування процесом випуску коптера для дослідження атмосфери над морем має наступні блоки:

Б1 – ініціалізація програми використання комплексу «ВПМ – АКС G_{C-UAV} » для виконання надводної місії; тут у бортовий контролер коптера завантажується код програми заданої місії, яку він має виконати, а до системи керування ВПМ – програма його роботи, яка враховує вітро-хвильові збурення та положення МБНС відносно них.

Б2, Б3 – передстартова автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВІМ – АКС G_{C-UAV} »; тут на основі вбудованих сенсорів у автоматичному режимі перевіряється технічний стан виконавчих механізмів ВІМ та стан готовності коптера до виконання місії.

Б4 – розкривання кришки 2 АКС; тут за допомогою виконавчого механізму 3 кришка 2 АКС спочатку піднімається на деяку висоту над корпусом 1, у результаті чого відбувається розгерметизація АКС, а потім розвертається на 180° відносно вертикальної осі виконавчого механізму 3, у результаті чого звільняється вертикальний простір над АКС для безперешкодного злету коптера.

Б5 – висування ложементу 5 з коптером 6 та його фіксатором 7 у верхнє (над корпусом 1) положення за допомогою механізму 4 (див. рис. 4.4, б).

Б6 – переведення коптера з положення «по-похідному» у положення «робоче» у результаті спрацювання фіксатора 7.

Б7 – зліт коптера.

Б8 – переведення ложементу 5 з фіксатором 7 у нижнє (початкове) положення за допомогою механізму 4.

Б9 – закривання кришки 2 АКС; тут за допомогою виконавчого механізму 3 кришка 2 АКС спочатку розвертається на 180° відносно вертикальної осі виконавчого механізму 3, у результаті чого вона займає положення «над корпусом 1», а потім опускається вниз і, таким чином, герметично закриває корпус АКС.

Б10 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових АКС G_{C-UAV} (крім коптера).

Таким чином, узагальнюючи наведені варіанти автоматичного керування комплексом «ВІМ – АКС $D-AUV$ » та АКС G_{C-UAV} , відзначимо, що концепція модульної автономії вимагає при синтезі систем керування МБНС та його КВ урахування наступних особливостей:

контроль гідрокліматичних умов застосування КВ – вітрових збурень, хвилювання морської поверхні тощо;

необхідність побудови розвинених підсистем автоматичної діагностики всього обладнання МБНС та його палубного устаткування;

необхідність узгодженого керування просторовим положенням і динамікою МБНС та його палубним устаткуванням і КВ відповідного типу.

Таку систему керування пропонується будувати як багаторівневу, яка включає наступні рівні:

рівень діагностики технічного стану МБНС, палубного обладнання та КВ;

рівень розгортання корисного вантажу у робочий стан;

рівень забезпечення застосування корисного вантажу за призначенням;

рівень згортання корисного вантажу багаторазового використання у початковий стан.

Важливою складовою синтезу систем керування комплексом «МБНС – КВ» є обґрунтований вибір системи сенсорів, які генерують інформацію про технічний стан та про поточне положення всіх виконавчих механізмів такого комплексу як об'єкту керування.

Таким чином, запропоновані два варіанти АКС та узагальнених алгоритмів керування ними свідчать про можливість і доцільність практичної реалізації концепції модульної автономії комплексу «МБНС – КВ» для широкого спектру задач роботизованого дослідження морського середовища.

4.4 Особливості автоматизації малорозмірного безекіпажного надводно-підводного судна транспортного типу

Розглянемо тепер другу задачу комплексної автоматизації МБНС, сформульовану в п.р. 4.1 – задачу забезпечення працездатності МБНС в умовах дії вітро-хвильових збурень.

Зазначимо, що у напрямку морської робототехніки останнім часом найбільша активність спостерігається у розробках малорозмірних та швидкісних безкіпажних надводних суден (МБНС) [103]. Актуальність останніх обумовлена успіхами України у боротьбі на морі (МБНС «Магура», «Сібебі» тощо) [104, 105].

Однак, методи застосування цих суден у природоохоронних та інших місіях свідчить про недоліки, які обмежують успішне застосування такого виду ЗМР у складних погодних умовах. Це пов'язано зі труднощами експлуатації в умовах, коли зовнішні збурення (вітер, хвиля) унеможливають автоматичне керування МБНС з необхідною якістю.

Одним з ефективних способів підвищення ефективності застосування швидкісних МБНС є зниження впливу вказаних збурюючих чинників шляхом тимчасового занурення ЗМР під воду, тобто включенням у морську надводну місію такого судна підводної складової руху. Тому сьогодні актуальним вбачається створення двохсередовищних (надводно-підводних) безкіпажних надводних суден, які б поєднували переваги надводних і підводних ЗМР.

Як вид морського транспорту малорозмірні безкіпажні надводно-підводні судна (МБНПС, в англomовній науково-технічній літературі – Unmanned Surface and Underwater Boat, USUB) належать для ЗМР спеціального призначення і використовуються для доставки корисних вантажів у складних умовах експлуатації (складні погодні умови, необхідність прихованого руху тощо). Висока їх затребуваність сьогодні обумовлена необхідністю виконувати морські транспортні місії у розширеному діапазоні зовнішніх збурень морського середовища.

Одним з важливих завдань створення МБНПС є створення високоефективних систем автоматичного керування ними, оскільки від якості керування напряму залежить ефективність їх застосування за призначенням.

Очевидно, що автоматичне керування таким засобом робототехніки суттєво відрізняється від керування суднами традиційної конструкції.

Це пов'язано, по-перше, з необхідністю забезпечення безпечного просторового руху МБНПС не тільки по поверхні моря, а й підводного керованого руху судна, і по-друге, з необхідністю якісного виконання надводної та підводної складових місії в умовах невизначеностей зовнішніх збурень, які діють на судно.

Слід зазначити, що питання конструкції МБНПС, у цілому, та синтезу їх систем автоматичного керування, зокрема, у науковій літературі практично відсутні. До найбільш описаних двохсередовищних пілотованих суден відносяться судна для морського туризму – двохмісні судна «Sea Breacher» американської компанії «Innespace Inc». та шестимісні судна «Jet Shark», а також найновіші човни цього типу – «Scubacraft 3» і «Scubacraft 6» [106, 107]. Корпуси цих човнів мають композитний корпус і забезпечують на поверхні максимальну швидкість 50 миль/год на повітряній подушці.

Надводний та підводний рух здійснюється за допомогою 4-тактного двигуна внутрішнього згоряння та гідрореактивного приводу, що працює від високопродуктивного насоса. Судна мають інтуїтивно зрозуміле керування зануренням, бортовий приймач GPS і підводний комп'ютер, а також бортову подачу повітря з резервним джерелом, ультракороткохвильовий радіозв'язок та підводний зв'язок. Глибина занурення судна – 50 метрів з тривалістю перебування під водою до 90 хв. та підводним рухом з підводною швидкістю 3 вузли.

Що ж стосується безкіпажних двохсередовищних суден, то найбільші досягнення отримані у рамках програми ЄС «I-SEAMORE» компанією iXblue, де створено лінійку з чотирьох БНПК “DriX H8”, “DriX H9”, “DriX O16” та “DriX O25” [108]. Судна DriX розроблені для роботи під дистанційним керуванням оператора, але передбачають високий рівень автономності.

Зовнішній вигляд МБНПС цієї серії показано на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Безкіпажні надводно-підводні судна DriX компанії iXblue як приклад можливого архітектурно конструктивного типу МБНПС

Судна DriX є, по суті, відкритою універсальною надводно-підводною платформою, яка спроможна транспортувати широкий діапазон корисних вантажів у своїй підводній гондол.

Комунікація з операцій можлива на дистанціях прямої видимості або за горизонтом через багатоканальну систему радіо- та супутникового зв'язку. Подальший аналіз літератури [109, 110] не виявив ознак розробки і створення двохсередовищних малорозмірних безкіпажних суден, що свідчить те, що даний тип малорозмірних суден знаходиться на початковій стадії свого розвитку.

Детальне вивчення конструкторських рішень суден компанії iXblue дає змогу виділити наступні характерні особливості такої техніки та форми її висвітлення у науково-технічній літературі:

розміщення корисного вантажу передбачається тільки у підводній частині судна (у підводній гондолі), що суттєво обмежує можливості суден як універсальних транспортних засобів;

опис суден як об'єктів керування надано тільки в обсягах загальної реклами, зокрема, зовсім відсутня інформація про керування надводним та

підводним рухом судна, також відсутня інформація про керування корисним вантажем судна та про особливості керування його основними підсистемами – енергетичною, навігаційною, баластною, крено-диферентною та іншими.

Таким чином, можна констатувати, що на цей час у науково-технічній літературі відсутня інформація щодо досліджень і розробок [111]:

безекіпажних надводно-підводних суден як носіїв корисного вантажу різних типів та призначення, які функціонують в умовах зовнішніх збурень;

систем керування безекіпажними надводно-підводними суднами як твердими тілами, які виконують керований рух на поверхні моря та у підводному положенні в умовах невизначеностей зовнішніх збурень.

При виконанні широкого спектру природоохоронних задач на акваторіях держави залучення МБНПС дасть змогу суттєво підвищити надійність морської транспортної місії, оскільки у випадку виникнення складних природних умов судно має змогу зануритись під воду і продовжити рух у підводному положенні або лягти у дрейф в очікуванні, погодні умови поліпшаться. У зв'язку з цим доцільно розглянути можливі застосування МБНПС для розв'язку завдань транспортного типу [112].

Згідно класифікації, наданій в [113], на цей час загальноприйнятим є підхід до класифікації видів морських безекіпажних апаратів, який ґрунтується на середовищі їх функціонування. У зв'язку з цим всі існуючі морські безекіпажні апарати розділяються на два види – надводні і підводні. У свою чергу, надводні апарати за призначенням рекомендується поділяти на бойові апарати та апарати забезпечення і підтримки.

Очевидно, що природоохоронні морські безекіпажні апарати необхідно відносити до апаратів забезпечення і підтримки, тому далі у цій статті будуть розглядатись саме такі засоби морської робототехніки.

Аналіз рекомендованої в [113, 114] класифікації безекіпажних надводних і підводних апаратів свідчить, що існуючий перелік засобів надводної та підводної морської робототехніки не містить відомостей про новий та перспективний для реалізації природоохоронних задач вид суден –

безекіпажні надводно-підводні судна, а їх можливе застосування в інтересах природоохоронних завдань держави до цього часу не розглядалось.

Очевидно, що прикладні наукові дослідження і проектні роботи у напрямку створення МБНПС доцільно починати з їх класифікації та визначення їх експлуатаційних властивостей (корисна функція, табл. 1.1), які б утворили науково-технічне підґрунтя для їх проектування та синтезу високоефективних систем керування ними.

У зв'язку з цим пропонується наступне доповнення до класифікації морських безекіпажних апаратів, яке передбачає введення окремого виду МБеА – безекіпажні надводно-підводні судна, які мають два рівноцінних середовища функціонування [111]:

вид – надводно-підводні;
тип (за масою) – малі (менше 500 кг), середні (500 – 10000 кг);
категорія – забезпечення та підтримки;
клас – природоохоронні, пошуково-рятувальні, гідрографічні, транспортні, навігаційного забезпечення, ретранслятори.

Розглянемо тепер основні особливості МБНПС як об'єкту керування, які необхідно врахувати при синтезі систем автоматизованого та автоматичного керування такими засобами морської робототехніки.

Аналіз конструкції та світовий досвід експлуатації таких суден свідчить, що при створенні вітчизняних зразків такої техніки слід враховувати:

- особливості гідродинаміки корпусу судна та її вплив на керування судном як твердим тілом, що рухається по водній поверхні та у товщі води (зміна керованості та ходовості МБНПС);
- особливості побудови енергетики судна, обумовлені можливим використанням двох різних типів бортових джерел енергії під час виконання місії;
- особливості побудови інформаційного забезпечення судна (систем навігації та зв'язку, сенсорів виконавчих механізмів судна), обумовлені

багаторазовою зміною зовнішнього робочого середовища у залежності від режимів надводного чи підводного ходу МБНПС;

- особливості побудови і реалізації морської місії МБНПС, що обумовлює необхідність розробки нової тактики одиночного та групового застосування МБНПС, яка б враховувала та ефективно використовувала його можливість керованої зміни середовища функціонування, а також необхідність уточнення режимів роботи судна у цілому та його виконавчих механізмів.

Вказані особливості лежать у руслі системного підходу [22, 23] і вимагають розробки науково обґрунтованих методів синтезу як узагальнених структур систем керування МБНПС, так і підсистем керування окремими виконавчими механізмами судна.

Зазначимо, що при розробці структури системи автоматичного керування МБНПС доцільно розділяти її на наступні п'ять функціональних рівнів: виконавчий L_E , програмний L_P , адаптивний L_A , тактичний L_T і стратегічний L_S [37].

Розглянемо особливості вказаних функціональних рівнів системи автоматичного керування МБНПС більш детально.

На стратегічному рівні L_S аналізується завдання для МБНПС (морська місія M_i), що надійшла радіоканалом або задана програмно в базі даних перед виходом МБНПС у море, планується загальне функціонування (стратегія) МБНПС для її виконання з урахуванням розмірів заданої акваторії, її глибин і течій (географічних координат акваторії, заданих множинами широти і довготи (Φ, Λ) , ізобат глибин моря $(\vec{H})$ та епюри поверхневих і підводних течій $(\vec{V}_W)$, навігаційних особливостей та обмежень цієї акваторії (активного судноплавства, видобувної промислової діяльності, «нечистих ґрунтів» тощо) та гідрометеорологічних характеристик зовнішнього середовища («рози вітрів» $\vec{V}_V$, морського хвилювання $\vec{V}_{BS}$, температури повітря $\bar{t}_A$ та води $\bar{t}_W$, наявності криги на частині акваторії $\bar{I}_S$ тощо).

Крім того, для визначення поточного положення МБНПС на акваторії використовується інформація від електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС) [115], звідки надходять його поточні географічні координати.

На тактичному рівні L_T планується реалізація прийнятої стратегії. Тут з урахуванням характеристик акваторії обираються методики виконання місії, обираються, обчислюються та оптимізуються траєкторії просторового переміщення МБНПС для реалізації його основних технологічних режимів роботи, формуються послідовності базових операцій у відповідності до стратегії функціонування МБНПС тощо.

На адаптивному рівні L_A коригуються рішення тактичного рівня з урахуванням технічного стану елементів МБНПС та фактичного стану зовнішнього середовища, задає поточні критерії оптимального керування, здійснює пошук оптимальних керуючих рішень у рамках обраної тактики виконання завдання, що надійшло від тактичного рівня керування. Тут із залученням методів математичного моделювання визначаються оптимальні швидкості руху МБНПС (наприклад, за критеріями максимальної продуктивності чи експлуатаційних витрат).

Програмний рівень керування L_P забезпечує узгоджене керування виконавчими механізмами в залежності від режиму роботи МБНПС. Тут синтезуються алгоритми групового керування виконавчими механізмами БНПК та генерується (або залучається з бази даних) їх програмна реалізація.

Виконавчий рівень L_E на основі задаючих впливів від програмного рівня L_P виробляє сигналимкерування виконавчими механізмами МБНПС згідно критеріям оптимальності, які задані на адаптивному рівні L_A .

Виходячи з вище сказаного, сформулюємо генеральну множину T_{USUB} задач синтезу систем керування МБНПС транспортноготипу у складі задачі керування просторовим рухом судна як твердого тіла, що може рухатись по морській поверхні та під водою T_M , задачі керування енергетичною системою

судна T_E , задачі керування інформаційною системою судна T_I та задачі керування морською місією судна у цілому T_F [111]:

$$T_{\text{USUB}} = \{T_M; T_E; T_I; T_F\}. \quad (4.2)$$

Генеральна множина (4.2) задач синтезу системи керування МБНПС транспортного типу сформована з урахуванням його специфіки як об'єкту керування і може слугувати підґрунтям для розробки узагальненого алгоритму та структури системи автоматичного керування судном в усіх основних режимах його застосування як транспортного засобу оборонного призначення.

Розглянемо напрямки розв'язку вказаної множини задач більш детально.

Аналіз задачі T_M , яка розглядає рух МБНПС по морській поверхні та під водою показує, що її розв'язок необхідно розглядати у складі шести підзадач:

підзадачі керованого процесу надводного руху судна T_{M-S} ;

підзадачі керованого процесу занурення судна на глибину роботи шноркеля T_{M-DS} ;

підзадачі керованого процесу підводного руху судна «під шноркелем» T_{M-US} ;

підзадачі керованого процесу занурення судна на робочу глибину T_{M-DJ} ;

підзадачі керованого процесу підводного руху судна на робочій глибині T_{M-UJ} ;

підзадачі керованого процесу спливання судна на поверхню моря T_{M-E} .

Таким чином, задачу T_M можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_M = \{T_{M-S}; T_{M-DS}; T_{M-US}; T_{M-DJ}; T_{M-UJ}; T_{M-E}\}. \quad (4.3)$$

Очевидно, що розв'язок підзадач T_{M-S} і T_{M-UJ} є тривіальним, оскільки надводний керований рух малорозмірних швидкісних суден та керований рух підводних апаратів є добре вивченим [116, 117].

До особливостей розробки системи автоматичного керування процесом занурення БНПК (підзадачі T_{M-DS} та T_{M-DJ}) процесу руху «під шноркелем» (підзадача T_{M-US}) належить вивчення особливостей та синтез алгоритмів керування його баластно-вирівнювальною та крено-диферентною системами, які мають забезпечити занурення судна та задане його просторове положення, необхідне для керованого траєкторного підводного руху у цих режимах.

До особливостей системи автоматичного керування процесом спливання МБНПС (підзадача T_{M-E}) належить вивчення особливостей та синтез алгоритмів керування його баластно-вирівнювальною та крено-диферентною системами, які мають забезпечити спливання судна на поверхню моря.

Аналіз задачі T_E , яка розглядає керування енергетичною системою МБНПС, показує, що її розв'язок необхідно розглядати, відповідно до (4.3), у складі шести головних підзадач:

підзадачі керованого процесу енергетичного забезпечення надводного руху судна T_{E-S} ;

підзадач керованих процесів енергетичного забезпечення занурення судна на глибину роботи «під шноркелем» T_{E-DS} та на робочу глибину T_{E-DJ} ;

підзадач керованих процесів енергетичного забезпечення підводного руху судна «під шноркелем» T_{E-US} та на робочій глибині T_{E-UJ} (останній передбачає зупинку головного теплового двигуна БНПК та живлення його рушійного комплексу від бортових акумуляторних батарей;

підзадачі керованого процесу енергетичного забезпечення спливання судна на поверхню моря T_{E-E} та запуску головного теплового двигуна.

Таким чином, задачу T_E можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_E = \{T_{E-S}; T_{E-DS}; T_{E-DJ}; T_{E-US}; T_{E-UJ}; T_{E-E}\}. \quad (4.4)$$

Розв'язок підзадач T_{E-S} і T_{E-U} також є тривіальним, оскільки керування енергетичними установками надводних малорозмірних швидкісних суден та керування енергетичними установками підводних апаратів також є добре вивченим [118, 119].

До особливостей розробки системи автоматичного керування енергетичною установкою МБНПС в режимі занурення судна (підзадачі T_{E-DS} та T_{E-DJ}) належить синтез алгоритмів керування його енергетичним обладнанням у режимі переходу з надводного у підводне положення. У першу чергу це передбачає керування шноркелем і, відповідно, керування зупинкою головного теплового двигуна судна та його підготовкою до занурення.

До особливостей розробки системи автоматичного керування енергетичною установкою МБНПС при спливанні судна (підзадача T_{E-E}) належить встановлення особливостей та синтез алгоритмів керування його енергетичним обладнанням у режимі переходу з підводного положення у надводне, тобто розробки алгоритмів керування процесами підготовки до запуску та запуск головного теплового двигуна судна після його спливання.

Далі, аналіз задачі T_I , яка розглядає керування інформаційною системою судна, показує, що її розв'язок необхідно розглядати у складі чотирьох головних підзадач:

підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при надводному русі судна T_{I-S} ;

підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при зануренні судна T_{I-DS} та T_{I-DJ} ;

підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при підводному русі судна «під шноркелем» T_{I-US} та на робочій глибині T_{I-UJ} ;

підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при спливанні судна T_{I-E} .

Розглянемо особливості розв'язку цих підзадач більш детально.

Підзадача T_{I-S} керування інформаційними потоками, які циркулюють при надводному русі судна, має чотири основні складові:

керування інформаційними потоками T_{I-S-N} навігаційного забезпечення надводного руху судна (отримання, обробка і формування вихідної навігаційної інформації, необхідної для забезпечення безпечного надводного руху судна);

керування інформаційними потоками T_{I-S-E} виконавчих механізмів судна, які забезпечують його надводний рух (керування рушієм та рульовим пристроєм, а також керування допоміжними механізмами, які забезпечують функціонування цих виконавчих механізмів);

керування інформаційними потоками T_{I-S-A} допоміжних механізмів судна, які задіяні у режимі його надводного руху (керування електроприводами насосів, вентиляторів, клапанів допоміжних механізмів судна тощо);

керування інформаційними потоками T_{I-S-C} системи радіо- та супутникового зв'язку з береговим центром керування.

Підзадача $T_{I-D}=\{T_{I-DS}; T_{I-DJ}\}$ керування інформаційними потоками, які циркулюють при зануренні судна, має наступні основні складові:

керування процесами збору інформації T_{I-D-MS} та T_{I-D-MJ} від сенсорів виконавчих механізмів судна, яка необхідна для реалізації режимів підготовки до занурення та, власне, реалізації процесу занурення, відповідно, на глибину роботи «під шноркелем» та на робочу глибину;

керування процесами збору інформації T_{I-D-CS} та T_{I-D-CJ} від сенсорів поточного просторового стану судна (кути Ейлера, глибина занурення тощо), яка необхідна для реалізації режимів занурення, відповідно, на глибину роботи «під шноркелем» та на робочу глибину.

Підзадача $T_{I-U}=\{T_{I-US}; T_{I-UJ}\}$ керування інформаційними потоками, які циркулюють при підводному русі судна, відповідно, «під шноркелем» та на робочій глибині, має чотири основні складові:

керування інформаційними потоками T_{I-U-NS} та T_{I-U-NJ} навігаційного забезпечення підводного руху судна (отримання, обробка і формування вихідної навігаційної інформації, необхідної для його безпечного, відповідно,

підповерхневого руху «під шноркелем» та підводного руху на робочій глибині);

керування інформаційними потоками T_{I-U-ES} та T_{I-U-EJ} виконавчих механізмів судна, які забезпечують функціонування цих виконавчих механізмів (керування джерелами енергії, рушієм та рульовим пристроєм) під час, відповідно, його підповерхневого руху «під шноркелем» та підводного руху на робочій глибині);

керування інформаційними потоками T_{I-U-AS} та T_{I-U-AJ} допоміжних механізмів судна, які задіяні у режимі його підводного руху («під шноркелем» та на робочій глибині) – керування електроприводами насосів, клапанів баластних цистерн та допоміжних механізмів судна тощо;

керування інформаційними потоками T_{I-U-CS} системи радіо- та супутникового зв'язку з береговим центром керування при русі МБНПС «під шноркелем» та керування інформаційними потоками T_{I-U-CJ} при підводному русі на робочій глибині.

Нарешті, підзадача T_{I-E} керування інформаційними потоками, які циркулюють при спливанні судна, має наступні основні складові:

керування процесами збору інформації T_{I-E-M} від сенсорів виконавчих механізмів судна, яка необхідні для реалізації режимів підготовки до спливання та, власне, реалізації процесу спливання;

керування процесами збору інформації T_{I-E-C} від сенсорів поточного просторового стану судна (кути Ейлера, глибина занурення) судна при його спливанні.

Таким чином, задачу T_I можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_I = \{T_{I-S}; T_{I-DS}; T_{I-DJ}; T_{I-US}; T_{I-UJ}; T_{I-E}\}. \quad (4.5)$$

де

$$T_{I-S} = \{T_{I-S-N}; T_{I-S-E}; T_{I-S-A}; T_{I-S-C}\}; \quad (4.6)$$

$$T_{I-DS} = \{T_{I-D-MS}; T_{I-D-CS}\}; \quad (4.7)$$

$$T_{I-DJ} = \{T_{I-D-MJ}; T_{I-D-CJ}\}; \quad (4.8)$$

$$T_{I-US} = \{T_{I-U-NS}; T_{I-U-ES}; T_{I-U-AS}; T_{I-U-CS}\}; \quad (4.9)$$

$$T_{I-UJ} = \{T_{I-U-NJ}; T_{I-U-EJ}; T_{I-U-AJ}; T_{I-U-CJ}\}; \quad (4.10)$$

$$T_{I-D} = \{T_{I-D-M}; T_{I-D-C}\}; \quad (4.11)$$

$$T_{I-U} = \{T_{I-U-N}; T_{I-U-E}; T_{I-U-A}; T_{I-U-C}\}; \quad (4.12)$$

$$T_{I-E} = \{T_{I-E-M}; T_{I-E-C}\}. \quad (4.13)$$

Аналіз задачі T_F , яка розглядає керування морською місією судна у цілому, дає змогу визначити два основні підзадачі керування МБНПС транспортного типу [111]:

- керування процесом розробки стратегії T_{F-S} виконання заданої місії БНПК;

- керування тактикою T_{F-T} виконання судном заданої місії.

Перша підзадача T_{F-S} включає наступні складові:

- керування процесом декомпозиції T_{F-S-D} заданої місії на окремі операції та формулюванням кінцевої мети кожної операції;

- керування процесом T_{F-S-L} оцінки зовнішніх (гідрометеорологічних, навігаційних та ін.) та внутрішніх (поточного технічного стану бортових систем та виконавчих механізмів) обмежень.

Друга підзадача T_{F-T} містить наступні складові:

- керування процесом T_{F-T-V} пошуку прийнятних варіантів досягнення кінцевої мети кожної операції;

- керування процесом T_{F-T-O} вибору оптимальних виконавчих (тактичних) варіантів досягнення кінцевої мети кожної операції.

Тоді задачу T_F можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_A = \{T_{F-S}; T_{F-T}\}, \quad (4.14)$$

де

$$T_{F-S} = \{T_{F-S-D}; T_{F-S-L}\}; \quad (4.15)$$

$$T_{F-T} = \{T_{F-T-V}; T_{F-T-O}\}. \quad (4.16)$$

Залежності (4.2)-(4.16) утворюють базовий перелік задач синтезу системи керування МБНПС, який сформовано з урахуванням специфіки його функціонування як об'єкту керування.

Розглянемо тепер узагальнену структуру системи автоматичного керування однією з ключових систем МБНПС – системою подачі повітря до теплового двигуна судна при його русі «під шноркелем» та при русі на робочій глибині.

Зазначимо, що у сучасній науковій літературі відомості про побудову шноркелів автономних ненаселених підводних апаратів та про синтез систем автоматичного керування ними практично відсутні.

Однак очевидно, що створення таких систем є перспективною задачею для вітчизняної галузі морської робототехніки.

Тому у дисертаційній роботі пропонується базова структура шноркеля як об'єкта автоматичного керування, для якої необхідно синтезувати узагальнені алгоритми автоматичного керування для основних робочих режимах МБНПС.

Пропонується наступна базова структура шноркеля як об'єкта керування, яка наведена на рис. 4.6.

Базова структура шноркеля МБНПС як об'єкта керування містить наступні механізми:

підйомна щогла шноркеля 1 у складі труби 2 для забору атмосферного повітря (пунктирна стрілка) з запірним клапаном 3 захисту труби 2 від хвиль, труби 4 для відведення вихлопних газів (пунктирна стрілка) з запірним клапаном 5 захисту труби 4 від хвиль, а також приводів 6 підйому-опускання щогли 1;

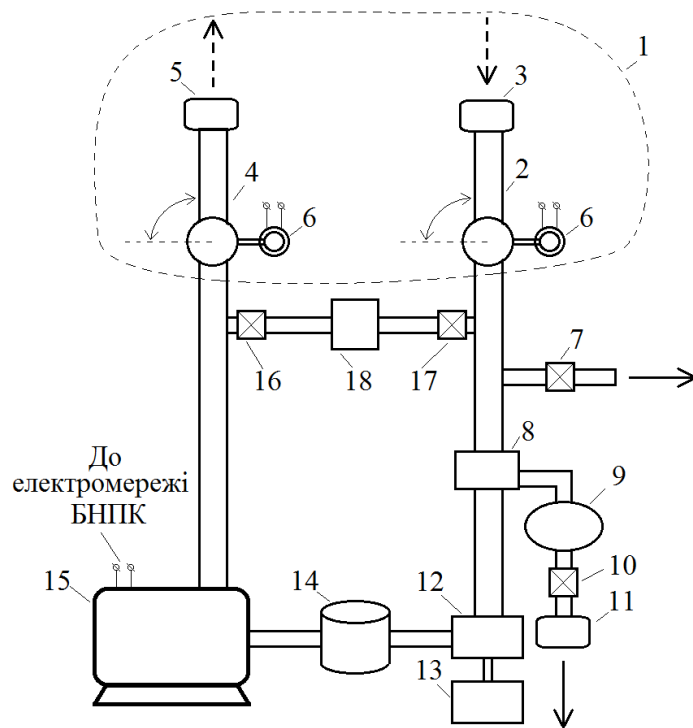


Рисунок 4.6 – Базова структура шноркеля МБНПС як об’єкта керування

насосу з приводом 7 для дренажу морської води (неперервна стрілка) труби 2;

системи фільтрів води 8 труби 2 з ємністю 9 для води з системи фільтрів 8, насосом 10 для дренажу води з ємності 9 та запірним клапаном 11 для скидання води (неперервна стрілка) з системи фільтрів 8;

компресора 12 з приводним електродвигуном 13 для нагнітання повітря у ресивер 14 до теплового двигуна 15 судна (наприклад дизель-генератора), вихлопні гази з якого надходять до труби 4;

клапани 16 і 17 системи 18 гідростатичного розвантаження труб 2 і 4; робота системи 18 необхідна при зануренні МБНПС на робочу глибину, коли зовнішній гідродинамічний тиск без компенсації зсередини може зруйнувати труби 2 і 4.

Таким чином, з позицій автоматизації керування таким технічним об’єктом його виконавчими механізмами є клапани 3, 5, 11, 16 та 17, а також приводи 6, 7, 10 та 13.

Очевидно, що задача керування шноркелем є невід’ємною складовою генеральної множини T_{USUB} задач синтезу систем керування МБНПС згідно (4.2) і входить до переліку підзадач T_{E-DS} , T_{E-US} , T_{I-DS} та T_{I-US} згідно (4.4) і (4.5).

У якості прикладу алгоритмізації задачі керування енергетичною системою судна T_E згідно (4.2) розглянемо підзадачу T_{M-DS} керування зануренням судна на глибину роботи «під шноркелем».

Метою керування вважаємо перехід МБНПС на режим руху «під шноркелем», тобто реалізацію задач T_{E-DS} та T_{I-DS} , які мають виконуватись одночасно.

Вважаємо, що у початковому стані МБНПС рухався у надводному положенні, а його рушійний комплекс отримував живлення від бортової акумуляторної батареї.

Розробку узагальненої структури системи автоматичного керування виконаємо у вигляді послідовності підпрограм (П) керування окремими виконавчими механізмами шноркеля:

П1 – підпрограма керування приводами 6, які виконують підйом щогли 1 шноркеля;

П2 – підпрограма відкривання клапанів 3, 5 і 11;

П3 – підпрограма включення насосів 7 і 10;

П4 – підпрограма включення приводного електродвигуна 13 компресора 12;

П5 – підпрограма запуску теплового двигуна МБНПС;

П6 – підпрограма контролю параметрів виконавчих механізмів шноркеля та якості електроенергії дизель-генератора;

П7 – підпрограма підключення дизель-генератора до бортової електромережі МБНПС з метою забезпечення процесу заряджання його акумуляторної батареї.

П8 – підпрограма переведення МБНПС до режиму руху «під шноркелем».

Висновки до розділу 4.

1. Отримано множину базових алгоритмів для системи автоматичного керування малорозмірним безекіпажним судном як носієм засобів морської робототехніки. Наведено приклад узагальненого алгоритму функціонування системи автоматичного керування такого судна для випадку його знаходження у заданій точці моря і забезпечення роботи автономного підводного апарату.

2. На основі системного підходу до завдань, що виконують безекіпажні надводні судна, запропоновано класифікацію їх корисного вантажу (засобів морської робототехніки) та показана доцільність його розміщення у спеціальних електрифікованих платформах – автоматичних контейнерах спеціальної конструкції.

3. Запропоновано концепцію модульної автономії для створюваного дослідницького комплексу «Малорозмірне безекіпажне надводне судно – Корисний вантаж», яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу і дає змогу уніфікувати конструкцію палубного обладнання судна та алгоритмічне забезпечення його системи автоматичного керування.

4. Розроблено основні складові конструкцій автоматичних контейнерів спеціальної конструкції для палубного транспортування, зберігання і застосування підводних і повітряних апаратів-роботів та розроблено узагальнені алгоритми керування ними як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища.

5. Доповнено існуючу класифікацію морських безекіпажних апаратів шляхом внесення до неї малорозмірних безекіпажних надводно-підводних суден, що удосконалює науково-методичне підґрунтя для їх створення.

6. Сформовано генеральну множину задач синтезу систем автоматичного керування малорозмірними безекіпажними надводно-підводними суднами науково-дослідницького та природоохоронного

призначення та множину підзадач автоматичного керування їх просторовим рухом, енергетичною та інформаційною системами, а також керування процесами планування і виконання морською місією судна у цілому. Отримані результати утворюють теоретичне підґрунтя для системної розробки алгоритмічного і програмного забезпечення систем керування такими об'єктами морської робототехніки.

7. Розроблено базову структуру обладнання одної з ключових систем енергетики надводно-підводного судна – системи «шноркель» для подачі повітря до теплового двигуна судна при підводному русі, а також розроблено узагальнену структуру системи автоматичного керування такою системою енергетики. Отримані результати утворюють теоретичну основу для синтезу систем автоматичного керування енергетичним обладнанням надводно-підводного судна.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне прикладне наукове завдання створення науково-методологічного підґрунтя комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден як складової інноваційного розвитку вітчизняного суднобудування.

В процесі проведення дисертаційних досліджень одержані наступні результати.

1. На основі аналізу науково-технічної літератури по безекіпажним надводним суднам встановлена актуальність створення малорозмірних безекіпажних надводних суден для охорони мілководних морських, річкових та озерних акваторій держави, на яких розташовані об'єкти морської критичної інфраструктури та проводиться промислово-господарська діяльність.

2. Дано визначення поняттю комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден, які спроможні забезпечити ефективне та безаварійне їх використання при виконанні науково-дослідницьких, природоохоронних та інших морських операцій в інтересах держави. Виходячи з принципів системного підходу, сформульовано головні напрямки та основні задачі комплексної автоматизації малорозмірних безекіпажних надводних суден.

3. Визначено актуальні задачі дисертаційного дослідження, які охоплюють формування науково-методологічних основ комплексної автоматизації на основі системного підходу, подальший розвиток та вдосконалення систем автоматичного керування МБНС та його корисним вантажем, а також уведення до розгляду нового об'єкта морської робототехніки – малорозмірного безекіпажного надводно-підводного судна та розробку системи автоматичного керування таким судном.

4. **Вперше** на основі застосування системного підходу та методології рівнянь існування сформовано генеральну множину основних задач

зовнішнього і внутрішнього проектування МБНС як об'єкта автоматичного керування та множину задач його комплексної автоматизації, що утворює науково-методологічну основу проектування судна, скорочує тривалість та підвищує якість проектних робіт.

6. Запропоновано узагальнену функціональну схему системи автоматичного керування МБНС як теоретичну основу для синтезу структури та алгоритмічного забезпечення системи керування судном та його корисним вантажем.

7. Сформовано математичну модель динаміки МБНС та налаштовано дослідницький програмно-апаратний комплекс як інструментарій для дослідження ефективності систем керування судном методом комп'ютерного експерименту.

8. Розглянуто задачу автоматичної стабілізації на курсі МБНС в умовах дії вітро-хвильових збурень. Для серії з двох МБНС одного класу проведено серію комп'ютерних експериментів з метою порівняння ефективності ПД- та ПД-регуляторів, нечіткого та нейромережного регуляторів за критерієм мінімуму перекидок стерна МБНС.

9. Встановлено, що у порівнянні з ПД-регулятором кількість перекидок стерна МБНС про роботі ПД-регулятора зменшується на 10-11%, а точність утримання на курсі суттєво покращується (до 21%). Застосування нечіткого регулятора дозволило вдвічі скоротити час перехідного процесу: з 60 секунд до 30 секунд, та значно підвищити точність утримання на заданому курсі.

10. Встановлено також, що ПД-регулятор у порівнянні з нейромережним регулятором має гірші показники якості керування в умовах сильного зовнішнього збурення. Його недоліком є необмежена кількість перекидок стерна при утриманні судна на курсі. Характерною особливістю даного регулятора є майже незмінна кількість перекидок керма за меншого зовнішнього збурення, змінюється лише кут повороту керма. Перевагою ПД-регулятора є його універсальність та простота налаштування.

11. Встановлено, що нечіткий регулятор забезпечує вдвічі меншу кількість переключень стерна та вищу точність керування у порівнянні з ПІД-регулятором. Такий регулятор має зону нечутливості на відхилення від курсу, тобто має закладену судноводієм статичну помилку.

12. Встановлено, що ШНМ-регулятор забезпечує відхилення судна від курсу у середньому на два градуса менше у порівнянні з нечітким регулятором. При цьому, ШНМ-регулятор дає змогу регулювати припустиму величину відхилення судна від заданого курсу, в залежності від зовнішніх умов та режиму руху судна, що дає змогу адаптувати роботу автостернового пристрою МБНС у залежності від завдання місії та гідрокліматичних характеристик акваторії.

13. **Отримала подальший розвиток** нейромережна система стабілізації на курсі МБНС при його русі в умовах вітро-хвильових збурень шляхом її навчання на мінімальну кількість переключень стерна, з використанням бази даних, сформованої шляхом комп'ютерного моделювання динаміки малорозмірного судна, що підвищує ефективність роботи стернового пристрою судна.

14. На основі системного підходу до завдань МБНС запропоновано класифікацію їх корисного вантажу (підводних і повітряних засобів морської робототехніки), показана доцільність його розміщення у спеціальних електрифікованих платформах – автоматичних контейнерах спеціальної конструкції.

15. **Вперше** на основі застосування системного підходу запропоновано концепцію модульної автономії дослідницького комплексу «Малорозмірне безекіпажне надводне судно – Корисний вантаж» як об'єкту автоматичного керування, яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу, та розроблено узагальнені алгоритми керування корисним вантажем як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища.

16. Отримано множину базових алгоритмів для системи автоматичного керування МБНС як носієм засобів морської робототехніки та розроблено узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування судна для забезпечення роботи автономного підводного апарату з борту судна.

17. Розроблено основні складові конструкцій автоматичних контейнерів спеціальної конструкції для палубного транспортування, зберігання і застосування підводних і повітряних апаратів-роботів та розроблено узагальнені алгоритми керування ними як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища.

18. **Отримали подальший розвиток** класифікація засобів морської робототехніки шляхом введення до її складу малорозмірного надводно-підводного безекіпажного судна та множина задач синтезу його системи автоматичного керування, що утворює науково-методологічну основу комплексної автоматизації засобів морської робототехніки такого класу.

19. Сформовано генеральну множину задач синтезу систем автоматичного керування малорозмірними безекіпажними надводно-підводними суднами науково-дослідницького та природоохоронного призначення та множину підзадач автоматичного керування їх просторовим рухом, енергетичною та інформаційною системами, а також керування процесами планування і виконання морською місією судна у цілому. Отримані результати утворюють теоретичне підґрунтя для системної розробки алгоритмічного і програмного забезпечення систем керування такими об'єктами морської робототехніки.

20. **Удосконалено** узагальнену структуру системи автоматичного керування системою «шноркель» надводно-підводного безекіпажного судна транспортного типу, яка забезпечує подачу повітря до теплового двигуна судна при його підводному русі, що утворює теоретичну основу для синтезу систем автоматичного керування енергетичним обладнанням надводно-підводного судна.

21. Результати роботи частково впроваджено у ТОВ «ХОЛДІНГОВА КОМПАНІЯ МІКРОН» (Україна) при розробці концепції створення в Україні новітніх засобів морської робототехніки оборонного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Joel Coito. (2021). Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities—and Challenges—in Ocean Law and Policy. Published by the Stockton Center for International Law. Volume 97, 2021. 49 Pages. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>
2. The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. Benedict's Maritime Bulletin December 2017. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>
3. E. H. Othman. (2015). A Review on Current Design of Unmanned Surface Vehicles (USVs). / Journal of Advanced Review on Scientific Research. ISSN (online): 2289-7887 | Vol. 16, No.1. Pages 12-17, 2015. https://www.akademiabaru.com/doc/ARSRV16_N1_P12_17.pdf
4. Регістр судноплавства України. Загальні положення класифікаційної та іншої діяльності. Правила класифікації та побудови суден. Частина I «Класифікація». Том 1. Київ, 2024. 163 с.
5. Theresa Milio. (2023). Classification of Unmanned Maritime Systems by FVEY Countries. Energy Academic Group. United States Naval Academy. 16 Pages. <https://nps.edu/documents/105500366/143516978/Intern+Report+Classification+of+UxS+%289+Oct+2023%29.pdf/09231efc-c612-8cd6-1e55-f364033c1e0d?t=1711746638480>
6. Luis Castano-Londono, Stefany del Pilar Marrugo Llorente, Edwin Paipa-Sanabria, María Belén Orozco-Lopez, David Ignacio Fuentes Montaña, Daniel Gonzalez Montoya. (2024). Evolution of Algorithms and Applications for Unmanned Surface Vehicles in the Context of Small Craft: A Systematic Review. Applied Sciences, 2024, 14, 9693. <https://doi.org/10.3390/app14219693>
7. Multi-Missions Unmanned Surface Vehicles (USVs). <https://www.ecagroup.com/en/multi-missions-unmanned-surface-vehicles->

ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Цим документом засвідчуємо, що результати науково-дослідної роботи «Розробка концепції та організаційно-технічних вимог до проектування і будівництва засобів морської робототехніки оборонного призначення» (шифр «ЗМР-1»), виконаної у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова за договором від 09.12.2024 р., №2358, впроваджені в Товаристві з обмеженою відповідальністю «ХОЛДІНГОВА КОМПАНІЯ МІКРОН» при розробці концепції створення в Україні новітніх засобів морської робототехніки оборонного призначення.

Ефективність впровадження науково-дослідної роботи:

а) науково-технічні переваги роботи полягають у системному підході до проблеми проектування і будівництва засобів морської робототехніки спеціального призначення та розробці концепції створення в Україні засобів морської робототехніки оборонного призначення в інтересах України, а також у розробці моделі функціонування науково-проектно-виробничої структури зі створення засобів морської робототехніки оборонного призначення в інтересах України;

б) соціально-економічні переваги роботи полягають у створенні наукового підґрунтя для зміцнення морської обороноздатності України, зменшенні залежності держави від імпорту озброєнь і обладнання, стимулюванні розвитку вітчизняного високотехнологічного машинобудування, приладобудування, інформатики та програмного забезпечення, а також у створенні конкурентоспроможної продукції морської робототехніки для експорту до країн, що потребують ефективних рішень для захисту своїх морських кордонів;

в) економічний ефект не розраховувався.

Перспективи розширення впровадження полягають у створенні серійних зразків морської робототехніки оборонного призначення, у розвитку напрямків цивільного застосування створюваних зразків морської робототехніки та у започаткуванні освітніх і наукових програм з підготовки інженерів і науковців нової генерації в закладах вищої освіти, створенні міжвідомчих лабораторій та центрів компетенцій, участі у міжнародних наукових програмах та спільних проєктах за напрямом «Морська робототехніка».

Директор
ТОВ «ХОЛДІНГОВА КОМПАНІЯ
МІКРОН»



ДОВІДКА

про результати впровадження проєктно-конструкторської роботи

Цим документом засвідчуємо, що результати проєктно-конструкторської роботи «Автономний безекіпажний підводний апарат – носій корисного вантажу», шифр «NaVal», виконаної у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова за договором від 10.11.2023р., №2326, впроваджені в ТОВ «Джемонд Ботярд» при розробці нового зразка морської робототехніки вітчизняного виробництва.

Ефективність впровадження розробки:

а) науково-технічні переваги розробленого автономного безекіпажного підводного апарата у порівнянні з існуючими аналогами полягають у можливості підводного і, значить, незалежного від гідрокліматичних умов на маршруті, транспортування корисного вантажу – безекіпажних літальних апаратів та квадрокоптерів – до акваторій чи берегових територій, на яких необхідно виконувати оперативне природоохоронне обстеження; наявність вантажного трюму дає змогу розмістити до 12 транспортних контейнерів, у яких можуть розміщатись авіаційні дрони, оснащені апаратурою для розв'язку широкого спектру природоохоронних задач; наявність гідроакустичних, відео- та GPS-приладів, встановлених на телескопічній щоглі, забезпечує надійне транспортування корисного вантажу без підйому підводного носія на поверхню.

б) соціально-економічні переваги полягають в можливості оперативної доставки авіаційних дронів природоохоронного та наукового призначення у територіальних водах країни в інтересах підрозділів Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Державної служби з надзвичайних ситуацій України та інш.;

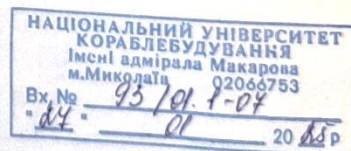
в) економічний ефект не розраховувався.

Перспективи розширення впровадження полягають у розробці бізнес-моделі процесу серійного виробництва автономного безекіпажного підводного апарата – носія корисного вантажу в інтересах вітчизняних організацій, які ведуть господарську діяльність на морі.

Директор
ТОВ «Джемонд Ботярд»



Ковалевський А.О.





ПРОТОКОЛ
участі співробітників НУК ім. адм. Макарова
у виконанні НДР по договору від 09.12.2024 р. №2358

№	П.І.Б.	Посада	Відсоток	Підпис
1	Блінцов В.С.	Науковий керівник НДР	10,0	
2	Буруніна Ж.Ю.	Відповід. виконавець	10,0	
3	Надточій А.В.	Відповід. виконавець	10,0	
4	Бурунін А.П.	Виконавець	10,0	
5	Надточій В.А.	Виконавець	10,0	
6	Нужний С.М.	Виконавець	10,0	
7	Клочков О.П.	Виконавець	10,0	
8	Сірівчук А.С.	Виконавець	10,0	
9	Трибулькевич В.В.	Виконавець	10,0	
10	Трибулькевич С.Л.	Виконавець	10,0	

Науковий керівник НДР №2358,
д-р техн. наук, професор

В.С. Блінцов

Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1) в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- статті у періодичних наукових фахових виданнях України категорії «Б», за яким підготовлено дисертацію здобувача:

1. Надточій В.А., Бурунін А.П. Системний підхід до розробки системи автоматичного керування безекіпажним патрульним катером для охорони мілководної захищеної акваторії. – Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. – С. 57-66. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.057-066

2. Бурунін, А.П., Грудініна, Г.С. (2024). Застосування методів математичного моделювання для оптимізації параметрів налаштування авторульового. / Shipbuilding & marine infrastructure. НУК, № 2 (19) / 2024. С. 46-58. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.2\(19\).05](https://doi.org/10.15589/smi2024.2(19).05)

3. Надточій В.А., Бурунін А.П. Задачі створення та критерії управління безекіпажного надводного катера для природоохоронних місій на мілководних морських акваторіях. / “Quality Control Tools and Techniques”, 2024. №1(52). – С. 53-65. DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-53-65.

4. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безекіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. / ЗНП, 2024, № 4 (497). С. 131-140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)

5. Надточій, В. А., & Бурунін, А. П. (2025). Автоматизація керування корисним вантажем безекіпажного надводного катера для дослідження морського середовища. *Методи та прилади контролю якості*, (2(53)). <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/650>

6. Бурунін А.П. Б Особливості автоматизації безекіпажного надводно-підводного катера транспортного типу / Науковий вісник Херсонської

державної морської академії № 2 (29), 2024.. – С. 35-48. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.035-048

7. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Стабілізація курсу малорозмірного безекіпажного судна з використанням штучної нейронної мережі // Науково-виробничий журнал "Електромеханічні і енергозберігаючі системи". – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2024. – № 4/2024 (67) – С. 38-44.

2) які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Надточій В.А., Бурунін А.П. Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв автономних ненаселених підводних апаратів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». Херсон : Херсонська морська державна академія, 2022. – С. 83-87.

2. Надточій В.А., Бурунін А.П. Формулювання головних задач створення безекіпажних надводних суден на основі системного підходу. – Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2022. – С. 353-355.

3. Надточій В.А., Бурунін А.П. Завдання створення безпілотного надводного судна для дослідження водного середовища. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2023. – С. 41-42.

4. Надточій В.А., Бурунін А.П. Алгоритмічне забезпечення системи автоматичного керування безекіпажним надводним катером як носієм засобів морської робототехніки. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) [Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції (29–31 травня 2024 р., м. Одеса)]. – Одеса: Херсонська державна морська академія, 2024. – С. 237-239

5. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Оптимізація параметрів налаштування авторульового пристрою безекіпажного катера з застосуванням

методів математичного моделювання. / Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2024. – С. 968-971

6. Андрій Бурунін, Ганна Грудініна. (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” (November 05 – 08, 2024) Hamburg, Germany. International Science Group. 2024. P. 272-276. ISBN – 979-8-89504-798-9 DOI– 10.46299/ISG.2024.2.10

7. Бурунін А.П. Структура системи автоматичного керування безекіпажним патрульним катером. – Modern problems of humanity and scientific ways of solving them. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Bergen, Norway. August 27 – 30, 2024. Pages 168-172.

8. Burunin, A., 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: зб. матеріалів I Міжн. науково-практ. конф. – Одеса: ОНМУ,.- С. 22-25.

usvs?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIpL6q28fqiQMV3qloCR0qSAjeEAAyASAAEgL79vD_BwE

8. Zhixiang Liua, Youmin Zhanga*, Xiang Yua, Chi Yuan. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. Article in Annual Reviews in Control · May 2016. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018

9. Semih Kale. (2023). Developments in Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review. / 5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences. July 10-12, 2023 : Konya, Turkey. file:///C:/Users/SLpro/Downloads/101-Submission+392+pp+596-600.pdf

10. Надточій В.А., Бурунін А.П. Огляд безекіпажних надводних суден як перспективних носіїв автономних ненаселених підводних апаратів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». Херсон : Херсонська морська державна академія, 2022. – С. 83-87

11. 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. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 2387. <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>

12. Fernando Sotelo-Torres, Laura V Alvarez, Robert C Roberts. (2023). An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. / Sensors (Basel). 2023 Apr 30;23(9):4420. doi: 10.3390/s23094420

13. Daniele Bertin, Paolo Cesana, Marco Lucci. (2009). U-Ranger - An Unmanned Surface Vehicle for surface and underwater missions. Conference Paper · April 2009 file:///C:/Users/SLpro/Downloads/AUVSI-CALZONI.pdf

14. Zhilin Dong, Jialun Liu, Chen Li, Shijie Li. (2021). Classification, Design, and Challenges of Unmanned Ships in Marine Transportation. Published in: 2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). DOI: 10.1109/ICTIS54573.2021.9798471

15. Hierarchical control system.
https://en.wikipedia.org/wiki/Hierarchical_control_system
16. Nadtochii, V., Nadtochiy, A., & Bugrim, L. (2019). Development of automatic control system of motion of an unmanned surface ships with a sailing installation. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2(49)), 45–49.
<https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184643>
17. M. N. Azzeria, F. A. Adnanb, M. Z. Md. Zain. (2015). Review of Course Keeping Control System for Unmanned Surface Vehicle. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 74:5 (2015), 11–20. DOI:
<https://doi.org/10.11113/jt.v74.4635>
18. Pengchao Zhang. Dynamic Surface Adaptive Robust Control of Unmanned Marine Vehicles with Disturbance Observer. *Hindawi Journal of Robotics* Volume 2018, Article ID 3835767, 6 pages.
<https://doi.org/10.1155/2018/3835767>
19. Haitong Xu, C. Guedes Soares. (2023). Review of Path-following Control Systems for Maritime Autonomous Surface Ships. *Journal of Marine Science and Application* (2023) 22: 153-171. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00338-6>
20. Xiang'en Bai, Bo Li. (2022). A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Application*, 2022. Volume 21, pages 47–58. DOI:10.1007/s11804-022-00276-9
21. Peijie Yang, Jie Xue, Hao Hu. (2024). A Bibliometric Analysis and Overall Review of the New Technology and Development of Unmanned Surface Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(1), 146;
<https://doi.org/10.3390/jmse12010146>
22. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools. Safety Dynamics, 2018. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-96259-7_1
23. Blintsov V.S., Klochkov O.P. (2019). Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43-51. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00878

24. Dirk K. F. Meijer. (2013). Information: What Do You Mean ?
<https://www.researchgate.net/publication/275017053>
25. Nadtochii, V., & Nadtozhyi, A. (2019). Розробка методу забезпечення безпеки мореплавства безекіпажного надводного судна. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(2(50)), 19–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.187286>
26. Massimo Caccia, Marco Bibuli, Riccardo Bono, Gabriele Bruzzone. Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle. November 2008. *Autonomous Robots* 25(4):349-365. DOI:10.1007/s10514-008-9100-0
27. Fundamentals of automatic control of a group of autonomous underwater vehicles : Monograph / ed. V. Blintsov. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. 192 p. <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/506>
28. Chengxing Lv, Zichen Wang, Ying Zhang, Jian Chen, Haisheng Yu. Cooperative formation control of multiple unmanned surface vessels based on state error port control Hamiltonian framework. *Ocean Engineering*, Volume 313, Part 1, 1 December 2024, 119410. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119410>
29. Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навч. посібник. – Львів: Новий світ-2000, 2003. – 424 с. <https://librarygo.lpnu.ua/?elbook=systemnyj-analiz-obyektiv-ta-proczesiv-kompyuteryzacziyi>
30. Системний аналіз складних систем управління: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх, Л.О. Власенко та ін. — К.: НУХТ, 2013. — 274 с. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a264d75f-5e98-41b9-994e-991b4bcc93eb/content>
31. Проєктування засобів морської робототехніки на основі системного підходу : монографія : у 3 ч. / за ред. д-ра техн. наук, проф. В. С. Блінцова. — Миколаїв : Іліон, 2023. Ч. 1 : Самохідні прив'язні підводні системи / В. С. Блінцов, О. П. Клочков, В. А. Надточій, А. В. Надточий. — 2023. — 164 с

32. Fossen T.I. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control – Norway: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 596 p. doi: 10.1002/9781119994138
33. Volodymyr Blintsov, Olexandr Klochkov. Generalized Method of Designing Unmanned Remotely Operated Complexes Based on the System Approach – «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. – Number 2. – 43-51 pp.
34. Шпаченко О. Електронні навігаційні досягнення через практичний підхід. – Вісник Держгідрографії. – 2011. №2 (34), <https://hydro.gov.ua/dl/vdgg/vd034.002.pdf>
35. Блінцов В.С., Соколов В.В. Сучасні задачі автоматизації керування безекіпажним надводним судном. Автоматика-2016 : матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління. 2016. – С. 201-202.
36. Надточій В.А., Бурунін А.П. Формулювання головних задач створення безекіпажних надводних суден на основі системного підходу. – Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2022. – С. 353-355.
37. Надточій В.А., Бурунін А.П. Завдання створення безпілотного надводного судна для дослідження водного середовища. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв, НУК, 2023. – С. 41-42.
38. Надточій В.А., Бурунін А.П. Задачі створення та критерії управління безекіпажного надводного катера для природоохоронних місій на мілководних морських акваторіях. / “Quality Control Tools and Techniques”, 2024. №1(52). – С. 53-65. DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-53-65
39. Надточій В.А., Бурунін А.П. Системний підхід до розробки системи автоматичного керування безекіпажним патрульним катером для охорони мілководної захищеної акваторії. – Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. – С. 57-66. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.057-066

40. Бурунін А.П. Структура системи автоматичного керування безкіпажним патрульним катером. – Modern problems of humanity and scientific ways of solving them. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Bergen, Norway. August 27 – 30, 2024. Pages 168-172.

41. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Кривцун, В.О. Некрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко; за ред. С.С. Рижкова. – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 340 с.

42. Кривий О. Ф. Методи математичного моделювання в задачах судноводіння: навчальний посібник / О. Ф. Кривий – Одеса: ОНМА, 2015 – 86 с.

43. Кривий О.Ф., Міюсов М.В., Кривий О.М. Математичне моделювання суднових стерен пр. різних режимах маневрування. Судноводіння | Shipping & Navigation ISSN 2306-5761 | 2618-0073. С. 93-114. DOI: 10.31653/2306-5761.34.2023.93-114

44. Блінцов О.В., Грудініна Г.С., Клименко П.Г. Методичні вказівки до розв'язання задач з радіонавігації та управління судном; під заг. ред.. В.С. Блінцова. – Миколаїв : НУК, 2017. – 76 с.

45. 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>

46. 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>

47. 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>
48. 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>
49. Meng Joo Er, Chuang Ma, Tianhe Liu, Huibin Gong. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, Volume 280, 15 July 2023, 114562.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>
50. Simplified Guide to Greenbay's Unmanned Surface Vehicle (USV) Control System. <https://oceangreenbay.com/simplified-guide-to-greenbays-unmanned-surface-vehicle-usv-control-system/>
51. Adam Wong Mun Wai; Chong Jia Long; Kew Han Shen; Ong Jian An; Hermawan Nugroho; Muhammad Ilhamdi Rusydi. Fuzzy-based Control System of Unmanned Surface Vehicle (USV) for Floating Garbage Collection. **Published in:** 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET). **DOI:** 10.1109/IICAIET55139.2022.9936835
52. Бурунін, А.П., Грудініна, Г.С. (2024). Застосування методів математичного моделювання для оптимізації параметрів налаштування авторульового. / *Shipbuilding & marine infrastructure*. НУК, № 2 (19) / 2024. С. 46-58. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.2\(19\).05](https://doi.org/10.15589/smi2024.2(19).05)
53. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безекіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. / *ЗНП*, 2024, № 4 (497). С. 131-140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)
54. Грудініна Г.С., Бурунін А.П. Стабілізація курсу малорозмірного безекіпажного судна з використанням штучної нейронної мережі. // Науково-виробничий журнал "Електромеханічні і енергозберігаючі системи". –

Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2024. – № 4/2024 (67) – С. 38-44.

55. 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, С. 22-25.

56. Бурунін, А.П., Грудініна Г. С. Оптимізація параметрів налаштування автокермового пристрою безекіпажного катера з застосуванням методів математичного моделювання. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 968-971. ISBN 978-966-321-473-3

57. 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

58. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Монография. — К.: Радиоаматор, 2008. — 972 с.

59. Сінюта К. О., Голіков В. В. Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: перспективи розвитку. *Vodnij transport*. 2024. № 1(39). С. 104–111. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.10> (дата звернення: 10.12.2024).

60. Калініченко І., Богуславський Є. Використання штучного інтелекту безпілотних суден для визначення перешкод при плаванні. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. Т. 3, № 3. С. 92–103. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.09> (дата звернення: 11.12.2024).

61. Hannoshyna I. Розробка моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна. Системи управління, навігації та зв'язку.

Збірник наукових праць. 2023. Т. 3, № 73. С. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.025>.

62. Інформаційна технологія розробки бази знань інтелектуальної системи автоматичного управління рухом судна / О. А. Дакі та ін. Системи озброєння і військова техніка. 2021. № 3(67). С. 52–60. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.07> (дата звернення: 10.12.2024).

63. Qiang L., Bi-Guang H. Artificial Neural Network Controller for Automatic Ship Berthing Using Separate Route. Journal of Web Engineering. 2020. URL: <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.19788> (date of access: 11.12.2024).

64. Nguyen P.-H., Jung Y.-C. Automatic Berthing Control of Ship Using Adaptive Neural Networks. Journal of Navigation and Port Research. 2007. Vol. 31, no. 7. P. 563–568. URL: <https://doi.org/10.5394/kinpr.2007.31.7.563> (date of access: 01.10.2024).

65. A neural network based heading and position control system of a ship / S. Unar et al. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.00757> (date of access: 13.11.2024).

66. Ahmed Y. A., Hannan M. A., Siang K. H. Artificial Neural Network controller for automatic ship berthing: challenges and opportunities. Marine Systems & Ocean Technology. 2020. Vol. 15, no. 4. P. 217–242. URL: <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00089-x> (date of access: 10.10.2024).

67. Ahmed Y. A., Hasegawa K. Artificial neural network based automatic ship berthing combining PD controlled side thrusters — A combined controller for final approaching to berth. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), Singapore, 10–12 December 2014. 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/icarcv.2014.7064504> (date of access: 01.10.2024).

68. Vasile Dobref, Octavian Tarabuta, Cătălin Clinci. Unmanned Surface And Undersea Vehicles: Capabilities And Potential. International Conference “KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION”, Vol. XXI, No 3, 2015. Pages 673–

678. https://www.researchgate.net/publication/324929691_Unmanned_Surface_And_Undersea_Vehicles_Capabilities_And_Potential

69. Перший у світі авіаносець для безпілотників спущений на воду. https://www.korabel.ru/news/comments/pervyy_v_mire_avianosec_dlya_bespilotnikov_spuschen_na_vodu_2.html

70. У Південній Кореї запропонували концепцію безпілотних кораблів "Примарний командувач". <https://flotprom.ru/2023/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%8F73/>

71. Надточій В.А., Бурунін А.П. Алгоритмічне забезпечення системи автоматичного керування безекіпажним надводним катером як носієм засобів морської робототехніки. – Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2024) [Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції (29–31 травня 2024 р., м. Одеса)]. – Одеса: Херсонська державна морська академія, 2024. – С. 237-239.

72. Captain Andrew Norris. Legal Issues Relating to Unmanned Maritime Systems. Monograph. <https://www.iqpc.com/media/1002182/50661.pdf>

73. Swagat Chutia, Tezpur University, Nayan M. Kakoty. A Review of Underwater Robotics, Navigation, Sensing Techniques and Applications. Conference: the Advances in Robotics, June 2017. DOI:10.1145/3132446.3134872

74. Review of research and control technology of underwater bionic robots. Review of research and control technology of underwater bionic robots. Intelligent Marine Technology and Systems (2023) 1:7. <https://doi.org/10.1007/s44295-023-00010-3>

75. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan. (2016). Unmanned surface vehicles: Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. Annual Reviews in Control. Volume 41, 2016, Pages 71-93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>

76. Seagoing Tools of Oceanography. U.S. National Science Foundation. <https://www.nsf.gov/geo/oce/whatis/tools.jsp>

77. Exploration Tools. National Oceanic and Atmospheric Administration.
<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/technology.html>

78. Michael Baldauf, Momoko Kitada, Raza Ali Mehdi, Dalaklis Dimitrios. (2018). E-Navigation, Digitalization and Unmanned Ships: Challenges for Future Maritime Education and Training. – Proceedings of INTED2018 Conference 5th-7th March 2018, Valencia, Spain. Conference Paper, March 2018. Papers 9525-9530. DOI: 10.21125/inted.2018.2374

79. Надточій , В. А., & Бурунін, А. П. (2025). Автоматизація керування корисним вантажем безекіпажного надводного катера для дослідження морського середовища. *Методи та прилади контролю якості*, (2(53)). 2024.
<https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/650>

80. Antonio Manuel Lázaro, Randal Rudge Ramos, Gerard Olivar Tost. (2001). Automatic measurement in the oceanographic vessel Hesperides. – Conference: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE. Volume: 1. DOI:10.1109/IMTC.2001.928841

81. A18D / AUV / Autonomous Underwater Vehicle.
https://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIiZyM4MWcigMVTVWRBR0IYT2HEAAYASAAEgJqWPD_BwE

82. A.M. Yazdani, K. Sammut, O. Yakimenko, A. Lammas. A survey of underwater docking guidance systems. *Robotics and Autonomous Systems*. Volume 124, February 2020, 103382. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103382>

83. R. Stokey; M. Purcell; N. Forrester; T. Austin; R. Goldsborough; B. Allen. A docking system for REMUS, an autonomous underwater vehicle. *Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings*. Date Added to IEEE Xplore: 06 August 2002. DOI: 10.1109/OCEANS.1997.624151

84. Narcís Palomeras, Pere Ridao. Autonomous Underwater Vehicle Docking Under Realistic Assumptions Using Deep Reinforcement Learning. *Drones* 2024, 8(11), 673; <https://doi.org/10.3390/drones8110673>

85. Chao-Ming Yu, Yu-Hsien Lin. The docking control system of an autonomous underwater vehicle combining intelligent object recognition and deep reinforcement learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence. Volume 139, Part A, January 2025, 109565. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109565>
86. Autonomous underwater vehicle (AUV) deployment device. Patent China CN102826210B. <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/59/1f/2dc2d44468213f/CN102826210B.pdf>
87. Кейс DJI Avata. https://for-extreme.com.ua/ua/accesories/bags_cases/startrc-1118711-plastikovij-kejs-dji-avata?gclid=EAIaIQobChMI0K2SsPYigMVPxSiAx2FtAP_EAQYCCABEgIM3vD_BwE&keyword=&utm_source=google&utm_medium=cpc
88. Водонепроникий стелаж для DJI Mavic 2 Pro /Mavic 2 Pro. https://aliexpress.ru/item/1005005949758705.html?sku_id=12000034989013274&spm=a2g2w.productlist.search_results.17.5cc93f68i9Y6yl
89. Водонепроникий протиударний рюкзак для портативної сумки для зберігання дрона DJI Neo. https://aliexpress.ru/item/1005007727831100.html?spm=a2g2w.productlist.rcmdprod.4.5cc93f68i9Y6yl&sku_id=12000042006655170
90. Dronehub is the autonomous game-changer for inspection and monitoring. <https://dronehub.ai/>
91. DJI Docks. For Roads Less Traveled. <https://enterprise.dji.com/dock>
92. Drone in a box with lightweight and maintenance-free motion plastics. <https://www.igus.com.ua/info/drone-in-a-box>
93. Best Drone Docks in 2024. <https://www.flytbase.com/blog/dji-compatible-docking-stations>
94. Drone Docking System. Updated: November 22, 2024. <https://xray.greyb.com/drones/docking-system-for-drones>
95. Carlo Giorgio Grlj, Marko Pranjic. A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms. January 2022. Drones 6(1):17. DOI:10.3390/drones6010017

96. Fabiana Di Ciaccio, Salvatore Troisi. (2021). Monitoring marine environments with Autonomous Underwater Vehicles: A bibliometric analysis. – Results in Engineering. Volume 9, March 2021, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100205>
97. How Subsea Remotely Operated Vehicles (ROVs) Work For Ocean Research. – SubCImaging. <https://www.subcimaging.com/case-studies/how-subsea-remotely-operated-vehicles-rovs-work-for-ocean-research>
98. Blintsov O., Sokolov V., Korytskyi V. Synthesis of precise automatic control system of a second order object in uncertainty conditions // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14, Issue 6. P. 1218–1228. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_0319_7671.pdf.
99. Jacopo Aguzzi, Laurenz Thomsen, Sascha Flögel and others. New Technologies for Monitoring and Upscaling Marine Ecosystem Restoration in Deep-Sea Environments. – Engineering. Volume 34, March 2024, Pages 195-211. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.012>.
100. Miguel Álvarez-González, Paula Suarez-Bregua, Graham J. Pierce and Camilo Saavedra. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Marine Mammal Research: A Review of Current Applications and Challenges . – *Drones* 2023, 7(11), 667. <https://doi.org/10.3390/drones7110667>
101. Balloon-borne surveys of the atmosphere. (2015). – King Abdullah University of Science and Technology. <https://www.kaust.edu.sa/en/news/balloon-borne-surveys-of-the-atmosphere>
102. Research vessel. https://en.wikipedia.org/wiki/Research_vessel
103. Hyunjoon Cho, Sang-Ki Jeong, Dae-Hyeong Ji, Ngoc-Huy Tran, Mai The Vu, Hyeung-Sik Choi. (2020). Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(9), 2633; DOI: 10.3390/s20092633
104. Sea Baby. https://en.wikipedia.org/wiki/Sea_Baby
105. MAGURA V5. https://en.wikipedia.org/wiki/MAGURA_V5

https://en.wikipedia.org/wiki/Innespace_Seabreacher

107. Semi-submersible Jet Shark takes multiple passengers on a thrill ride.

<https://www.startupselfie.net/2023/02/08/jet-shark-semi-submersible-multiple-passengers-thrill-ride/>

108. DRIX SERIES UNCREWED SURFACE VEHICLES.

<https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2023/03/brochuredrix-series-webcompressed.pdf>

109. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress (2023). <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>

110. У світі є 134 типи морських дронів, то чим особливі наші судна-камікадзе. https://defence-ua.com/weapon_and_tech/u_sviti_je_134_tipi_morskih_droniv_to_chim_osobliv_i_nashi_kateri_kamikadze-12842.html

111. Бурунін А.П. Б Особливості автоматизації безекіпажного надводно-підводного катера транспортного типу / Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 2 (29), 2024.. – С. 35-48. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.035-048

112. Доктрина Військово-Морських Сил Збройних Сил України. ВКП 7(3)-00(13).01. (2021). Затверджена Головнокомандувачем Збройних Сил України 19.01.2021 р. https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/doktryna_vijskovo-morski-syly-zbrojnyh-syl-ukrayiny.pdf

113. Тимчасова класифікація морських безекіпажних апаратів (систем, комплексів) у Військово-Морських Силах Збройних Сил України, які приймаються чи є на озброєнні Військово-Морських Сил Збройних Сил України. (2023). Затверджено Наказом командира військової частини А0456 10.05.2023 р., №73.

114. Курдюк С.В., Гаврилюк Т.К., Соколик Я.М., Джежулей О.В. (2023). Особливості класифікації морських безекіпажних підводних апаратів у

Військово-Морських Силах Збройних Сил України. Випробування та сертифікація, № 2(2). С. 30-36. DOI: 10.37701/ts.02.2023.04

115. Military Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) Market Research Report Provides thorough Industry Overview, which offers an In-Depth. <https://www.linkedin.com/pulse/military-electronic-chart-display-information-system-ecdis-jhpvc/>

116. Toru Katayama, Koji Suzuki. (2003). A NEW SHIP MOTION CONTROL SYSTEM FOR HIGH-SPEED CRAFT. *FAST2003: Proceedings of 7th International Fast Sea Transportation*, Vol.3. 7th-10th October, 2003, Ischia Italy. 9 Papers. https://www.researchgate.net/publication/318418286_A_NEW_SHIP_MOTION_CONTROL_SYSTEM_FOR_HIGH-SPEED_CRAFT

117. Kantubhukta Dinesh, Joddumahanthi Vijaychandra, Seshasai Brundavanam, Kakinada Vedaprakash. (2021). A Review on Control of the Underwater Vehicles. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, Volume 05, Issue 05. 6 pages. https://www.researchgate.net/publication/351371540_A_Review_on_Control_of_the_Underwater_Vehicles

118. Fan Gao, Astrid H. Brodtkorb, Mehdi Zadeh, Sigrid Marie Mo. (2024). Power management and optimization of marine hybrid propulsion systems: A combinator surface methodology. *Ocean Engineering*, Volume 309, Part 2, 2024, 118354. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118354>

119. Albert M. Bradley, M.D. Feezor, Hanumant Singh, F. Yates Sorrell. (2001). Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, November 2001. 26(4). Papers 526 – 538. DOI:10.1109/48.972089