МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЛЯНСЬКИЙ СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК629.5.083

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Спеціальність 05.22.20–експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Засвідчую, що всі частини тексту дисертації, під час написання яких використовувалися технології штучного інтелекту, перевірені та відредаговані мною особисто



_____ С. М. Волянський

Самостійно підготовлена наукова праця

Одеса– 2026

АНОТАЦІЯ

Волянський С. М. Підвищення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності. Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком автономного судноплавства, ускладненням структури морських автономних систем, зростанням рівня невизначеності морського середовища та необхідністю забезпечення стійкого функціонування автономних платформ під час виконання тривалих місій. Сучасні підходи до управління автономними морськими системами переважно орієнтовані на локальне вирішення окремих задач навігації, стабілізації руху або моніторингу технічного стану та не забезпечують інтегрованого врахування багатофакторної невизначеності, сценарної зміни режимів функціонування і місійної результативності автономних транспортних систем.

Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретико-методологічних засад, моделей, методів та алгоритмів підвищення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів (АМТЗ) на основі місійно-орієнтованого підходу, адаптивного управління, цифрових двійників, інтегрального оцінювання ефективності та сценарно-структурного моделювання в умовах невизначеності.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності та дії змінних факторів середовища.

Предметом дослідження є теоретико-методологічні засади, методи,

моделі та механізми підвищення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів.

У процесі дослідження використано методи системного аналізу, теорії управління, математичного моделювання, теорії ймовірностей, нечіткої логіки, багатокритеріального аналізу, теорії випадкових процесів, сценарного аналізу, теорії ризиків, методи інтегрального оцінювання ефективності, цифрового моделювання та імітаційного експерименту. Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю аналітичних і експериментальних результатів, математичним обґрунтуванням запропонованих моделей та результатами чисельного моделювання.

У дисертаційній роботі вперше запропоновано методологію управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка базується на місійно-орієнтованому принципі управління ефективністю з урахуванням багатофакторної невизначеності, сценарної зміни режимів функціонування та інтегрованої взаємодії технічних, інформаційних, енергетичних і керуючих підсистем.

Розроблено інтегровану багаторівневу модель управління ефективністю АМТЗ, яка поєднує адаптивне управління, інтегральне оцінювання ефективності, цифрові двійники, сценарне моделювання та механізми підтримки прийняття рішень у межах єдиного контуру управління. Запропоновано інтегральну структуру оцінювання ефективності автономних місій з урахуванням технічного стану системи, рівня ризику, енергетичних ресурсів, стабільності навігації та стійкості функціонування автономної платформи.

У роботі розроблено математичні моделі адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами в умовах стохастичних збурень та змінних режимів функціонування. Реалізовано інтегровану архітектуру адаптивного управління, що поєднує прогнозне керування, нечітку логіку та механізми самоналаштування параметрів системи залежно від зміни умов експлуатації.

Введено поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику автономних морських транспортних систем, що враховує похибки

адаптивних алгоритмів, неповноту інформації, змінність параметрів моделей та нестабільність процесів прийняття рішень.

Розроблено концепцію інтеграції цифрового двійника у процес управління ефективністю автономних морських транспортних засобів. Цифровий двійник розглядається як активний елемент системи управління, що забезпечує безперервну синхронізацію фізичного та віртуального станів платформи, прогнозування деградації технічних вузлів, сценарне прогнозування режимів функціонування та підтримку прийняття рішень у реальному масштабі часу.

Запропоновано підхід до інтеграції неоднорідних інформаційних потоків навігаційних, енергетичних, технічних та середовищних даних у межах єдиного інформаційного простору автономної системи, що дозволяє знизити рівень інформаційної невизначеності та підвищити достовірність оцінювання технічного стану АМТЗ.

Розроблено інтелектуальні системи управління електромеханічними комплексами автономних морських платформ із використанням нечітких контролерів та адаптивних алгоритмів керування, що забезпечують підвищення робастності системи, стабільності режимів функціонування та енергоефективності автономної платформи.

Запропоновано структурно-сценарний підхід до моделювання режимів функціонування автономних морських транспортних засобів у стохастичному середовищі. Розроблено динамічну модель сценарної трансформації структури ризиків, що дозволяє прогнозувати критичні режими функціонування, оцінювати стійкість автономних місій та адаптивно коригувати параметри управління.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей, алгоритмів та інформаційних механізмів у системах управління автономними морськими транспортними засобами, цифрових двійниках, системах підтримки прийняття рішень, комплексах енергоменеджменту та системах адаптивної навігації. Результати дослідження можуть бути використані під час створення перспективних морських автономних платформ, роботизованих морських комплексів та інтелектуальних систем управління морським транспортом нового покоління.

Отримані результати розвивають теорію управління транспортними системами, теорію адаптивного управління морськими автономними платформами та методологію забезпечення ефективності функціонування складних морських кіберфізичних систем в умовах невизначеності.

Ключові слова: автономні морські транспортні засоби; морські автономні платформи; автономне судноплавство; технічна експлуатація; ефективність експлуатації; управління ефективністю експлуатації; технічний стан; моніторинг технічного стану; діагностування технічного стану; прогнозування технічного стану; деградація технічного стану; експлуатаційна готовність; функціональна надійність; управління ресурсом; цифровий двійник; цифрова модель; адаптивне управління; інтегровані системи управління; система підтримки прийняття рішень; інформаційно-аналітичне забезпечення; інтегральне оцінювання ефективності; математичне моделювання; сценарне моделювання; багатокритеріальне оцінювання; ризик-орієнтоване управління; управління ризиками; алгоритмічна невизначеність; експлуатаційні режими; функціональна ефективність; енергетична ефективність; безпека експлуатації; навігаційна безпека; морські транспортні системи; ергатичні системи управління; людський фактор; інформаційні технології; інтелектуальні транспортні технології; підтримка прийняття експлуатаційних рішень.

ABSTRACT

Volyanskyy, S. M. Improving the Operational Efficiency of Autonomous Maritime Transport Vehicles under Conditions of Uncertainty. – Qualifying scientific thesis in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.20 – Operation and repair of transport vehicles. – National University «Odesa Maritime Academy» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2026.

This dissertation is devoted to developing a methodology for managing the operational efficiency of autonomous marine vehicles under uncertainty. The relevance of the research is driven by the rapid development of autonomous shipping, the increasing complexity of maritime autonomous systems, the growing

level of uncertainty in the maritime environment, and the need to ensure the stable operation of autonomous platforms during long-term missions. Current approaches to managing autonomous maritime systems are primarily focused on locally solving individual tasks related to navigation, motion stabilization, or monitoring technical condition, and do not provide for an integrated consideration of multifactorial uncertainty, scenario-based changes in operating modes, and the mission effectiveness of autonomous transport systems.

The aim of this dissertation is to develop theoretical and methodological foundations, models, methods, and algorithms for managing the operational efficiency of autonomous maritime vehicles, grounded in a mission-oriented approach, adaptive control, digital twins, integrated performance evaluation, and scenario-structural modeling under conditions of uncertainty.

The object of this study is the processes involved in the operation and use of autonomous marine vehicles under conditions of uncertainty and the influence of variable environmental factors.

The subject of this study is the theoretical and methodological foundations, methods, models, and mechanisms for managing the operational efficiency of autonomous marine vehicles.

The research employs methods of systems analysis, control theory, mathematical modeling, probability theory, fuzzy logic, multi-criteria analysis, theory of random processes, scenario analysis, risk theory, methods of integral performance evaluation, digital modeling, and simulation experiments. The reliability of the obtained results is confirmed by the consistency of analytical and experimental results, the mathematical justification of the proposed models, and the results of numerical modeling.

This dissertation proposes, for the first time, a methodology for managing the operational efficiency of autonomous marine transport vehicles, based on a mission-oriented efficiency management principle that accounts for multifactorial uncertainty, scenario-based changes in operating modes, and the integrated interaction among technical, information, energy, and control subsystems.

An integrated multilevel model for managing the performance of autonomous

marine transport vehicles has been developed, combining adaptive control, integrated performance evaluation, digital twins, scenario modeling, and decision support mechanisms within a single control loop. An integrated structure for evaluating the performance of autonomous missions is proposed, taking into account the technical condition of the system, the level of risk, energy resources, navigation stability, and the operational stability of the autonomous platform.

The paper develops mathematical models for the adaptive control of autonomous maritime vehicles under stochastic disturbances and variable operating modes. An integrated architecture for adaptive control has been implemented, combining predictive control, fuzzy logic, and mechanisms for self-tuning system parameters depending on changes in operating conditions.

The concept of algorithmic uncertainty has been introduced as a distinct risk category for autonomous maritime transport systems, taking into account errors in adaptive algorithms, incomplete information, variability in model parameters, and instability in decision-making processes.

A concept has been developed for integrating a digital twin into the process of managing the performance of autonomous maritime vehicles. The digital twin is considered an active element of the control system, ensuring continuous synchronization of the platform’s physical and virtual states, forecasting the degradation of technical components, scenario-based forecasting of operating modes, and real-time decision-making support.

An approach is proposed for integrating heterogeneous information flows of navigational, energy, technical, and environmental data into a single information space within the autonomous system, thereby reducing information uncertainty and improving the reliability of assessments of the technical condition of the autonomous marine vehicle.

Intelligent control systems for electromechanical complexes of autonomous marine platforms have been developed using fuzzy controllers and adaptive control algorithms, which ensure increased system robustness, stability of operating modes, and energy efficiency of the autonomous platform.

A structural-scenario approach to modeling the operating modes of

autonomous marine vehicles in a stochastic environment has been proposed. A dynamic model of scenario-based transformation of the risk structure has been developed, enabling the prediction of critical operating modes, the assessment of the stability of autonomous missions, and the adaptive adjustment of control parameters.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the developed models, algorithms, and information mechanisms in control systems for autonomous marine vehicles, digital twins, decision support systems, energy management complexes, and adaptive navigation systems. The research results can be used in the development of promising autonomous maritime platforms, robotic maritime complexes, and next-generation intelligent maritime transport control systems.

The obtained results advance the theory of transport system control, adaptive control of autonomous maritime platforms, and the methodology for ensuring the operational efficiency of complex maritime cyber-physical systems under conditions of uncertainty.

Keywords: autonomous marine vehicles; autonomous marine platforms; autonomous navigation; technical operation; operational efficiency; operational efficiency management; technical condition; technical condition monitoring; technical condition diagnosis; technical condition forecasting; deterioration of technical condition; operational readiness; functional reliability; life cycle management; digital twin; digital model; adaptive control; integrated control systems; decision support system; information and analytical support; comprehensive performance evaluation; mathematical modeling; scenario modeling; multi-criteria evaluation; risk-based management; risk management; algorithmic uncertainty; operating modes; functional efficiency; energy efficiency; operational safety; navigational safety; maritime transportation systems; ergatic control systems; human factor; information technologies; intelligent transportation technologies; support for operational decision-making.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

монографії:

1. Букарос, А. Ю., Волянська, Я. Б., Волянський, С. М., та ін. (2022). Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології (В. А. Голіков & О. А. Онищенко, наук. ред.). Миколаїв: Іліон. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20279652

Автором узагальнено сучасні концепції, методи та технології технічної експлуатації морського і річкового флоту.

статті у фахових періодичних виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science:

2. Volyanskyy, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianska, Y., Kurdiuk, S., Shcherbina, O., & Dobrovolska, L. (2026). Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling risk topology in autonomous maritime systems. Transportation Safety and Environment. https://doi.org/10.1093/tse/tdag040 (Scopus Q1)

Автором запропоновано динамічний сценарний метод (Dynamic scenario-based DEMATEL) для моделювання топології ризиків у морських автономних системах.

3. Volyanskaya, Y., & Volyanskiy, S. (2017). Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9–85), 26–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91966 (Scopus Q3)

Автором створено спеціалізований моделювальний комплекс для дослідження систем керування рухомими морськими об'єктами.

4. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nykul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (8–92), 25–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126144 (Scopus Q3)

Автором проведено аналіз шляхів підвищення енергетичних показників асинхронних електродвигунів автономних плавальних апаратів.

5. Onishchenko, O., Shumilova, K., Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., & Volianskyi, Y. (2022). Ensuring cyber resilience of ship information systems. TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 16 (1), 43–50. https://doi.org/10.12716/1001.16.01.04 (Scopus Q3)

Автором запропоновано підходи до забезпечення кіберстійкості суднових інформаційних систем в умовах зовнішніх кіберзагроз.

6. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyanskyy, S., Bondar, A., & Cheredarchuk, N. (2023). Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 13 (4), 3948–3957. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957 (Scopus Q2)

Автором проведено аналіз застосування нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом суден та оцінено їх ефективність.

7. Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskaya, Y., Yaremenko, N., & Volyanskyy, S. (2024). Increasing maneuverability and positioning of self-propelled drilling platforms using driving modules. In A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, & N. Zuievska (Eds.), Geomining (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 224, pp. 283–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_20 (Scopus Q4)

Автором розроблено підходи до підвищення маневреності самохідних бурових платформ шляхом використання рушійних модулів.

8. Melnyk, O., Onishchenko, O., Shyshkin, O., Volkov, O., Volyanskyy, S., Maulevych, V., & Kreitser, K. (2024). Enhancing shipboard technical facility performance through the utilization of low-sulfur marine fuel grades. Journal of Chemistry and Technologies, 32 (1), 233–245. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.297916 (Scopus Q3)

Автором досліджено вплив використання низькосірчистих палив на ефективність функціонування суднових технічних засобів.

9. Melnyk, O., Onishchenko, O., Ternovsky, V., Volyanskyy, S., & Koryakin, K. (2024). Safe and reliable operation of maritime transport based on integrated systematic safety model. In V. Babak & A. Zaporozhets (Eds.), Systems, Decision and Control in

Energy VI (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 561, pp. 403–421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_22 (Scopus Q4)

Автором запропоновано інтегровану системну модель забезпечення безпечної та надійної експлуатації морського транспорту.

10. Melnyk, O., Onishchenko, O., Borovyk, S., Volyanskyy, S., Bychkovsky, Y., Zaporozhets, A., & Shcheniavskyi, H. (2025). Survey of ship energy autonomy technologies and development perspectives. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, I. Shkilniuk, & A. Yakovlieva (Eds.), Modern Technologies in Energy and Transport II (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 574, pp. 37–48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76650-3_3 (Scopus Q4)

Автором проведено огляд сучасних технологій енергетичної автономності суден та визначено перспективи їх розвитку.

11. Kurdiuk, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskiy, S., Shevchenko, V., & Alieksieichuk, B. (2026). Practical aspects of creating a data transmission system for controlling unmanned surface vehicles in unstable communication channels. System Research and Information Technologies, (1), 76–91. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2026.1.05 (Scopus Q4)

Автором розроблено підходи до створення систем передачі даних для керування безекіпажними надводними апаратами в умовах нестабільних каналів зв'язку.

статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, та статті у наукових періодичних виданнях інших держав за напрямом, з якого підготовлено дисертацію:

12. Xia, X., Li, L., Volyanskyy, S., Zhang, Z., & Liu, W. (2025). Trajectory Tracking and Collision Avoidance Control for USV Swarm Based on Obstacle-Avoidance Yaw Reference Angle. Information and Control. https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2025.0762

Автором запропоновано метод траєкторного керування та уникнення зіткнень групи безекіпажних надводних суден.

13. Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., Vorokhobin, I., Mazur, O., & Onishchenko, O. (2022). Marine ship's course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of the Naval Academy, 25 (1), 23–35. https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-003

Автором розроблено алгоритм стабілізації курсу морського судна на основі простого нечіткого регулятора.

14. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Онищенко, О. А., Унгаров, Д. В., & Шевченко, В. О. (2022). Проблеми підвищення енергетичного фактору суднових систем електропостачання. Водний транспорт: Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, 1 (35), 15–24. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.02

Автором досліджено проблеми підвищення енергетичної ефективності суднових систем електропостачання та запропоновано шляхи їх удосконалення.

15. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. П., Ковальчук, М. С., & Волянський, Ю. С. (2023). Оцінка резервів підвищення енергоефективності об'єктів водного транспорту шляхом оптимізації суднових систем. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34 (73) (2, ч. 2), 115–120. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/20

Автором проведено оцінку резервів підвищення енергоефективності об'єктів водного транспорту шляхом оптимізації суднових систем.

16. Волянський, С. М., Галаган, С. М., Мазур, О. М., Налева, Г. В., Корбан, В. Х., Яременко, В. А., & Онищенко, О. А. (2024). Нечіткі системи управління електромеханічними системами малих безпілотних морських суден. Вісник Одеського національного морського університету, 75, 35–42. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

Автором розроблено нечіткі системи керування електромеханічними комплексами малих безпілотних морських суден.

17. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Лебедєва, Л. В., & Радченко, І. Г. (2025). Теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських технічних засобів при змінних умовах експлуатації. Таврійський

науковий вісник. Серія: Технічні науки, 4 (1), 414–424. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.1.39

Автором сформовано теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських технічних засобів в умовах змінної експлуатації.

18. Volyanskyy, S. M., Melnyk, O. M., Onyshchenko, O. A., & Kotenko, O. O. (2025). Structural-functional modeling of autonomous maritime technical systems under operational disturbances. Наука і техніка сьогодні, 11 (52), 1801–1814. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1801-1814

Автором розроблено структурно-функціональну модель автономних морських технічних систем в умовах експлуатаційних збурень.

19. Волянський, С. М., Бичковський, Ю. В., Мельник, О. М., & Волошин, А. О. (2025). Системний аналіз причин навігаційних інцидентів під час швартування суден та шляхи вдосконалення міжнародної нормативно-правової бази. Системи управління, навігації та зв'язку, 4 (82), 5–11. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.005

Автором проведено системний аналіз причин навігаційних інцидентів під час швартування суден та запропоновано напрями вдосконалення нормативної бази.

20. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Волянський, Ю. С., Ященко, В. С., & Мицик, А. І. (2026). Оцінка ефективності функціонування сонячних електростанцій з урахуванням сезонних та добових коливань сонячної радіації та навантаження. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 37 (76) (1), 115–120. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/25

Автором проведено оцінку ефективності функціонування сонячних електростанцій з урахуванням сезонних та добових коливань навантаження.

21. Волянський, С. М., Шумило, О. О., Мельник, О. М., & Волянська, Я. Б. (2025). Алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ. Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія, 6 (194), 426–435. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-426-435

Автором розроблено алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ.

22. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., & Щербина, О. В. (2025). Методи врахування невизначеності в прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 5 (2), 222–234. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.2.23

Автором запропоновано методи врахування невизначеності у прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ.

23. Волянський, С. М., Шумило, О. М., Мельник, О. М., & Котенко, О. В. (2025). Моделювання деградаційних процесів в технічних вузлах морських автономних платформ. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 36 (75) (6, ч. 1), 245–251. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/36

Автором проведено моделювання деградаційних процесів у технічних вузлах морських автономних платформ.

24. Волянський, С., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Спрощена 3-DOF динамічна модель керування автономною морською платформою в умовах хвильових перешкод. Central European Journal of Science and Research, 2 (2), 81–91. https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(2)-6

Автором розроблено спрощену тривимірну динамічну модель керування автономною морською платформою в умовах хвильових збурень.

25. Volyanskyy, S., Melnyk, O., & Dobrovolska, L. (2026). Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling time-evolving risk topology in autonomous maritime platforms. Oceanography & Fisheries Open Access Journal, 19 (2), 1–4. https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2026.19.556006

Автором запропоновано сценарно-орієнтований DEMATEL-підхід для моделювання ризиків автономних морських платформ.

26. Melnyk, O., Shcheniavskyi, H., Volyanskyy, S., Koryakin, K., & Kucherenko, V. (2025). Risk-based planning of port network sustainability under conditions of operational uncertainty. Premier Journal of Science, 14, Article 100171. https://doi.org/10.70389/PJS.100171

Автором розроблено ризик-орієнтований підхід до планування стійкості портових мереж в умовах експлуатаційної невизначеності.

27. Волянський, С., Мазур, О., & Щенявський, Г. (2026). Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ. Central European Journal of Science and Research, 1 (2). https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(1)-8

Автором виконано аналітичну оцінку технічного стану морських автономних платформ.

28. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Мазур, О. М., & Онищенко, О. А. (2026). Інтеграція цифрових двійників у процес управління експлуатацією автономних морських платформ. Наука і техніка сьогодні, 2 (56), 1659–1677. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2(56)-1659-1677

Автором запропоновано підходи до інтеграції цифрових двійників у процес управління експлуатацією морських автономних платформ.

29. Volyanskiy, S., Melnyk, O., Dobrovolska, L., & Kozachuk, A. (2026). Adaptive fault-tolerant control of an unmanned surface vehicle under actuator degradation and external disturbances. Advances in Oceanography & Marine Biology, 5 (1), 1–6. https://doi.org/10.33552/AOMB.2026.05.000602

Автором розроблено метод адаптивного відмовостійкого керування безекіпажним надводним судном в умовах деградації виконавчих механізмів.

30. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Мельник, О. М., & Добровольська, Л. О. (2026). Інтеграція інформаційних потоків для підвищення ефективності експлуатаційного управління автономними морськими платформами. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 1 (1), 49–57. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.1.1.5

Автором запропоновано модель інтеграції інформаційних потоків для підвищення ефективності управління морськими автономними платформами.

31. Волянський, С., Волянська, Я., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Структурно-динамічна модель автономної морської платформи з кількісним аналізом міжсистемних впливів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 363 (2), 597–604. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-78

Автором розроблено структурно-динамічну модель морської автономної платформи з кількісним аналізом міжсистемних взаємодій.

32. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Добровольська, Л. О., & Козачук, А. В. (2026). Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем. Вісник Херсонського національного технічного університету, 1 (96), 217–225. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.30

Автором сформовано функціонально-операторну методологію динамічного моделювання автономних морських технічних систем.

33. Волянський, С., Щенявський, Г., Мазур, О., & Очеретна, В. (2026). Причинний аналіз факторів ризику в автономних морських платформах з використанням методу DEMATEL. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, 2 (53), 179–186. https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359955

Автором проведено причинний аналіз факторів ризику морських автономних платформ із застосуванням методу DEMATEL.

34. Волянський, С., Мельник, О., Волошин, А., & Добровольська, Л. (2026). Роль інформаційного забезпечення в експлуатації автономних морських платформ. Вісник Одеського національного морського університету, (79), 172–186. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2026-1-172-186

Автором обґрунтовано доцільність виділення окремого інформаційного рівня в структурі управління експлуатацією морських автономних платформ.

наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів докторської дисертації на наукових конференціях, конгресах, симпозіумах

35. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Сучасні системи автоматизованого керування електрорушіями автономних плавальних апаратів. У Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 24–25 березня 2022 р., с. 29–30). Одеса: НУ «ОМА».

Автором досліджено сучасні системи автоматизованого керування електрорушіями автономних плавальних апаратів.

36. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Концепція побудови сучасних інтелектуальних систем управління автономними об’єктами, що функціонують в умовах невизначеності навколишнього середовища. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE–2022) (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 12 травня 2022 р., с. 29–30). Одеса: Військова академія (м. Одеса)

Автором запропоновано концепцію побудови інтелектуальних систем управління автономними об’єктами в умовах невизначеності.

37. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових безпілотних морських апаратів-дронів. У Національна безпека України в умовах воєнного стану: проблеми та шляхи їх вирішення (матеріали VIII Всеукраїнської курсантсько-студентської науково-практичної конференції, Одеса, 24 березня 2023 р., с. 15–17). Одеса: Інститут ВМС НУ «ОМА»

Автором проведено аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових безпілотних морських апаратів-дронів.

38. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 5-6 квітня 2023 р., с. 46–49). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором досліджено особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів.

39. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Ященко, В. С., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2024). Можливості підвищення ефективності експлуатації систем управління енергетичними та загальносудновими установками. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE–2024) (матеріали Міжнародної наукової конференції, Одеса, 15 травня 2024 р., с. 27–29). Одеса: Військова академія (м. Одеса)

Автором визначено можливості підвищення ефективності експлуатації систем управління енергетичними та загальносудновими установками.

40. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2024). Вибір параметрів двигунів спеціального призначення для електрорушійних систем універсальних автономних плавальних апаратів. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ІСО–2024) (матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р., с. 318–320). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором обґрунтовано вибір параметрів двигунів спеціального призначення для електрорушійних систем автономних плавальних апаратів.

41. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В., Ковальчук, М. (2024). Загальні проблеми побудови електрорушіїв та інших електромеханічних систем малих автономних плавальних апаратів. У Автоматика та електротехніка (АЕ–2024) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Миколаїв, 20–21 листопада 2024 р., с. 96–98). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором досліджено проблеми побудови електрорушіїв та електромеханічних систем малих автономних плавальних апаратів.

42. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В. (2025). Оцінка впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів об’єктів морської робототехніки. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (СПАЕ–2025) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 29–30 квітня 2025 р., с. 24–26). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором проведено оцінку впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів морської робототехніки.

43. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором розробили методичне забезпечення навчального процесу, яке містить алгоритми виконання, приклади розрахунків та рекомендації щодо практичного застосування теоретичних знань.

44. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованого електроприводу». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором розроблено методичне забезпечення навчального процесу, яке містить алгоритми виконання, приклади розрахунків та рекомендації щодо практичного застосування теоретичних знань.

45. Волянський, С. М., Корякін, К. С., Пастернак, О. Я., Щенявський, Г. С. (2025). Експлуатація автономних морських технічних засобів в умовах змінних режимів. У Science and Technology: New Horizons of Development (матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Прага, 13–15 серпня 2025 р., с. 219–222). Prague, Czech Republic. https://doi.org/10.70286/isu-13.08.2025

Автором досліджено особливості експлуатації автономних морських технічних засобів в умовах змінних режимів роботи.

46. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2025). Оцінка ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ІСО–2025) (матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 25–26 вересня 2025 р., с. 556–558). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором проведено оцінку ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна.

47. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Волошин, А. О. (2025). Вплив динаміки кліматичних підфакторів на інтегральну ефективність експлуатації автономних морських технічних засобів. У Modern Science, Economy and Digital Innovation (Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, Bucharest, September 10–12, 2025, pp. 126–129). Bucharest, Romania. https://doi.org/10.70286/isu-10.09.2025

Автором досліджено вплив динаміки кліматичних підфакторів на інтегральну ефективність експлуатації автономних морських технічних засобів.

48. Волянський, С. М., Булгаков, М. П., Щенявський, Г. С., Котенко, О. В. (2025). Морські автономні технічні засоби як компонент кіберфізичних систем

безпеки морського середовища. У Innovative Approaches in Modern Science and Technology (Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Lisbon, November 12–14, 2025, pp. 636–640). Lisbon, Portugal. https://doi.org/10.70286/ISU-12.11.2025

Автором обґрунтовано роль автономних морських технічних засобів як компонентів кіберфізичних систем безпеки морського середовища.

49. Volyanskyy, S., Bulgakov, M., Shchenyavskyi, H., & Kotenko, O. (2025). Structural and functional model of autonomous maritime systems management: Modeling and analytical interpretation. У Progressive Approaches in Science and Engineering (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Copenhagen, November 26–28, 2025, pp. 692–696). Copenhagen, Denmark. https://doi.org/10.70286/isu-26.11.2025

Автором розроблено структурно-функціональну модель управління автономними морськими системами та виконано її аналітичну інтерпретацію.

50. Волянський, Ю. С., Ященко, В. С., Мицик, А. І., Волянська, Я. Б., Волянський, С. М. (2025). Модернізація архітектури сонячної електростанції шляхом застосування акумуляторних систем зберігання енергії. У Автоматика та електротехніка (АЕ–2025) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Миколаїв, 4–5 грудня 2025 р., с. 3–4). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором запропоновано модернізацію архітектури сонячної електростанції із застосуванням акумуляторних систем зберігання енергії.

51. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Шумило, О. М., & Мельник, О. М. (2025). Моделювання сценаріїв деградації технічних вузлів морських автономних платформ. У Innovative Research in Science and Economy (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, December 3–5, 2025, pp. 785–789). Brussels, Belgium. https://doi.org/10.70286/isu-03.12.2025

Автором розроблено моделі сценаріїв деградації технічних вузлів морських автономних платформ.

52. Volyanskiy, S., Mazur, O., & Shcheniavskiy, G. (2026). Analytical assessment of the technical condition of maritime autonomous platforms. International Scientific and Practical Conference «Geneva Strategic Insights 2026: Global Summit on Multidisciplinary Science, Diplomacy and Future Technologies». Geneva, Switzerland: International University in Geneva, February 4.

Автором проведено аналітичну оцінку технічного стану морських автономних платформ.

53. Волянський, С. М., Пуляєв, І. О., & Добровольска, Л. О. (2026). Інформаційні потоки та моніторинг технічного стану автономних морських платформ. У Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference (с. 443–446). International Scientific Unity. Афіни, Греція, 11–13 лютого 2026. https://doi.org/10.70286/isu-11.02.2026

Автором запропоновано підходи до організації інформаційних потоків та моніторингу технічного стану морських автономних платформ.

54. Volyanskiy, S., Dobrovolska, L., & Kozachuk, A. (2026). Simplified 3-DOF dynamic model for controlling an autonomous maritime platform in wavy conditions. International Scientific and Practical Conference «Tokyo Quantum Leap 2026: International Forum on Integrative Science, High-Tech and Global Sustainability», University of Tokyo, Japan, 18 February 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.18686308

Автором розроблено спрощену 3-DOF динамічну модель керування морською автономною платформою в умовах хвильових перешкод.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ…….…… 25
ВСТУП…….. 27
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ…… 39
1.1 Стан наукових досліджень та проблематика управління ефективністю автономних морських транспортних засобів……. 39
1.2 Теоретико-методологічні засади оцінювання ефективності АМТЗ в умовах невизначеності …… 53
1.3 Методологія інтегрального оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ... 60
1.4 Оцінка експлуатаційної ефективності морських автономних платформ в умовах змінних режимів функціонування…….. 66
1.5 Методи врахування невизначеності в прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ……. 81
1.6 Архітектура автономної платформи як когнітивного агента у складі морських роботизованих комплексів …… 95
1.7 Висновки до першого розділу та постановка наукової проблеми……. 105
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ…….. 111
2.1 Концепція ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів……... 111
2.2 Оцінювання показників ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів……..... 121
2.3 Методи та моделі прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів……..……... 141
2.4 Висновки до другого розділу…… 161

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ МОРСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ……. 164
3.1 Формалізація задачі адаптивного управління морськими автономними платформами в умовах невизначеності…….. 164
3.2 Аналіз сучасних методів та архітектура багаторівневої адаптивної системи управління морськими автономними платформами…….. 172
3.3 Аналіз сучасних методів та архітектура багаторівневої адаптивної системи управління морськими автономними платформами…….. 175
3.4 Теоретичний аналіз стійкості адаптивної системи управління……. 189
3.5 Моделювання деградаційних процесів технічних вузлів морських автономних платформ…….. 192
3.6 Структурно-функціональне моделювання автономних морських технічних систем у умовах експлуатаційних відхілень……... 202
3.7 Висновки до третього розділу……... 211
РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ МОРСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ…….. 214
4.1 Теоретичні основи інформаційного забезпечення морських автономних платформ……. 214
4.2. Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ... 226
4.3 Інтеграція цифрових двійників у процес управління експлуатацією морських автономних платформ……. 233
4.4 Принцип антикрихкого управління АМТЗ із застосуванням цифрового двійника, введення «індексу антикрихкої адаптивності» ……... 250
4.5 Висновки до четвертого розділу……... 269
РОЗДІЛ 5. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ…. 273
5.1 Інтелектуальне управління електромеханічними системами МАП…….. 273

5.2 Інформаційна підтримка процесу експлуатації автономних морських технічних засобів…….. 294
5.3 Системи керування для безекіпажних морських платформ у змінних режимах експлуатації…….. 302
5.4 Критерій ефективності АМТЗ з ШІ на основі переходу від класичної «ресурсної ефективності» до «когнітивного гомеостазу» …….. 315
5.5 Висновки до п’ятого розділу..……. 326
РОЗДІЛ 6. СТРУКТУРНО – СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ……. 329
6.1 Моделювання динаміки морських автономних платформ в умовах хвильових збурень…… 329
6.2 Інтеграція інформаційних потоків у системі експлуатаційного управління морськими автономними платформами……. 335
6.3 Сценарно-орієнтоване моделювання ризиків автономних морських платформ на основі dynamic DEMATEL framework……. 344
6.4 Причинно-наслідковий аналіз ризиків та оцінювання сценарної стійкості морських автономних платформ…… 360
6.5 Висновки до шостого розділу…….. 371
ВИСНОВКИ…….. 373
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ…….. 378
ДОДАТКИ……. 440
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації…… 440
Додаток Б. Спрощений симуляційний сценарій для попереднього дослідження процесів кооперативного управління та оптимізації комунікаційних протоколів у децентралізованих багатоагентних мережах АМТЗ ……... 451
Додаток В. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження 458

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AHP	метод аналізу ієрархій
AI	штучний інтелект
CPS	кіберфізична система
DEMATEL –	метод аналізу та візуалізації причинно-наслідкових зв’язків
DSS	система підтримки прийняття рішень
DT	цифровий двійник
EEDI	індекс енергоефективності 25роекту судна
EEOI	експлуатаційний індикатор енергоефективності
EMS	система енергетичного менеджменту
FLC	нечіткий логічний контролер
GNSS	глобальна навігаційна супутникова система
HMI	людино-машинний інтерфейс
IEC	Міжнародна електротехнічна комісія
IMO	Міжнародна морська організація
INS	інерціальна навігаційна система
IoT	Інтернет речей
KPI	ключовий показник ефективності
MARPOL	Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню із суден
MCDM	багатокритеріальне прийняття рішень
MPC	прогнозне керування на основі моделі
PDF	функція щільності ймовірності
PFC	коректор коефіцієнта потужності
PID	пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
RL	навчання з підкріпленням
RMS	середньоквадратичне значення

SOC	рівень заряду енергетичної системи
THD	коефіцієнт гармонічних спотворень
АМТЗ	автономний морський транспортний засіб
АСК	автоматизована система керування
АСУ	автоматизована система управління
МАП	морська автономна платформа
МБМС	мале безпілотне морське судно
МРК	морський роботизований комплекс
3-DOF	тривимірна модель динаміки руху з трьома ступенями свободи

ТАБЛИЦЯ ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ВИКОРИСТАНИХ В ДИСЕРТАЦІЇ

Позначення	Зміст
AMTZ	автономний морський транспортний засіб
$IEE(t)$	інтегральний показник технічної експлуатації
$U(t)$	множина факторів невизначеності
$D_i(t)$	рівень деградації і-го вузла
CI_i	індекс критичності вузла
$P_i(t)$	поточний рівень працездатності вузла
$R^*(t)$	інтегральний показник ризику
$\hat{x}(t)$	оцінений вектор стану платформи
$z(t)$	вектор вимірювань сенсорної системи
$u(t)$	керуючий вплив
DT	цифровий двійник (Digital Twin)
DSS	система підтримки прийняття рішень
MPC	модельно-прогнозне керування
FLC	нечіткий контролер
RL	агент підкріплювального навчання

ВСТУП

Сучасний етап розвитку морського транспорту характеризується переходом до використання автономних морських транспортних засобів та інтеграції інтелектуальних технологій управління, що обумовлено потребою у підвищенні безпеки, ефективності використання ресурсів і зниженні впливу людського чинника.

Експлуатація автономних морських транспортних засобів (АМТЗ) здійснюється в умовах стохастичної невизначеності, нелінійних збурень і обмежених енергетичних ресурсів, що зумовлює необхідність застосування предиктивних і адаптивних підходів до управління. Такі підходи забезпечують інтеграцію технічних, інформаційних та енергетичних підсистем у єдиний контур управління.

Ефективність функціонування АМТЗ визначається здатністю системи до адаптації, прогнозування ризиків і забезпечення стійкості місії. Водночас існуючі наукові підходи мають переважно фрагментарний характер, що обумовлює необхідність розробки інтегрованих моделей управління ефективністю експлуатації.За цих умов ефективність функціонування АМТЗ визначається не лише якістю окремих алгоритмів керування, але й здатністю системи до адаптації, прогнозування ризиків та забезпечення стійкості місії при заданих обмеженнях.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері автономного судноплавства, більшість підходів має фрагментарний характер і орієнтована на розв’язання окремих задач (навігація, стабілізація руху, діагностика, енергоменеджмент). Водночас інтегровані підходи до управління ефективністю експлуатації АМТЗ залишаються недостатньо розвиненими.

Зокрема, недостатньо формалізованими залишаються методичні засади управління, що враховують кумулятивний вплив багатофакторної невизначеності та динамічну трансформацію сценарних режимів

функціонування об’єктів. Відсутність цілісних моделей, здатних одночасно синтезувати технічні обмеження, ресурсний потенціал та стохастику зовнішнього середовища, зумовлює необхідність розроблення нових підходів до адаптивного місійно-орієнтованого керування АМТЗ.

Особливої актуальності набуває вивчення взаємозв’язку між технічним станом, інформаційним забезпеченням, енергетичними ресурсами та підсумковою результативністю автономної місії в межах ризик-орієнтованого підходу.

Складність проблеми суттєво зростає внаслідок появи нових класів морських автономних платформ, що передбачають широке використання цифрових двійників, адаптивних систем управління та інтелектуальних інформаційних технологій. Традиційні детерміновані методи оцінювання виявляються малоефективними для опису динамічних процесів у стохастичному морському середовищі, оскільки вони не дозволяють комплексно враховувати деградацію технічного стану, зміну структури ризиків та трансформацію умов виконання місій у реальному часі. Це зумовлює необхідність розробки гнучких методологічних засад, здатних інтегрувати ці різнорідні фактори в єдину модель управління ефективністю.

Разом із цим сучасний розвиток автономних морських транспортних систем супроводжується виникненням низки наукових протиріч між:

– необхідністю забезпечення високої ефективності автономних місій та обмеженими можливостями існуючих детермінованих моделей управління в умовах невизначеності;

– зростаючим рівнем автономності морських платформ та недостатнім рівнем адаптивності існуючих систем управління до змінних режимів функціонування;

– необхідністю інтегрованого оцінювання технічного стану, енергетичної ефективності, ризиків та місійної результативності АМТЗ і фрагментарністю сучасних підходів до оцінювання ефективності експлуатації;

– потребою у прогнозному ризик-орієнтованому управлінні автономними платформами та переважним використанням реактивних схем моніторингу й локального контролю параметрів;

– необхідністю обробки великих обсягів неоднорідної інформації в реальному масштабі часу та недостатньою інтеграцією цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень і адаптивних алгоритмів управління у межах єдиного контуру експлуатаційного управління.

Наявність зазначених протиріч свідчить про те, що наявні підходи до управління автономними морськими транспортними засобами не забезпечують формування цілісної системи управління ефективністю функціонування АМТЗ в умовах багатофакторної невизначеності та сценарної зміни режимів експлуатації.

У зв’язку з цим виникає необхідність розроблення цілісної методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка поєднувала б інтегральне оцінювання ефективності, адаптивне управління, цифрові двійники, механізми підтримки прийняття рішень, енергоефективні алгоритми та сценарно-структурне моделювання в межах єдиного місійно-орієнтованого контуру управління. Застосування такого інструментарію розглядається виключно як засіб підвищення ефективності експлуатації автономного морського транспортного засобу.

Таким чином, актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена необхідністю розроблення нових теоретико-методологічних засад підвищення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності, що забезпечують підвищення стійкості функціонування автономних платформ, ефективності виконання місій, надійності систем управління та адаптивності до динамічних змін умов експлуатації.

У даній дисертаційній роботі автономний морський транспортний засіб розглядається не як елемент транспортної системи в широкому системному розумінні, а як об'єкт технічної експлуатації, ефективність функціонування якого

визначається технічним станом, експлуатаційними режимами, ресурсними обмеженнями, рівнем ризику та якістю управління в процесі виконання автономних місій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами тематами. Дослідження інтегроване в систему стратегічного розвитку морської галузі України та безпосередньо спрямоване на реалізацію положень Національної транспортної стратегії до 2030 року та Морської доктрини до 2035 року. Робота відповідає пріоритетним напрямам наукових досліджень МОН України (наказ № 109 від 03.02.2022 р.) щодо вдосконалення транспортних стратегій з урахуванням новітніх технологічних аспектів.

Основні результати дисертації апробовані та впроваджені в межах науково-дослідних робіт:

– «Комплексне забезпечення безпеки експлуатації морських транспортних суден» (№ держреєстрації 0123U100791) – розробка методів підвищення навігаційної безпеки;

– «Інформаційні системи управління та підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури морських перевезень в умовах воєнного стану» (№ держреєстрації 0124U001164) – де здобувач є виконавцем у частині створення інтелектуальних архітектур DSS;

– «Актуальні проблеми управління системними властивостями морських транспортних засобів в різних умовах експлуатації» (№ держреєстрації 0122U200859) – дослідження адаптивних властивостей автономних систем у стохастичному середовищі;

– фінансованої на конкурсній основі науково-дослідної і дослідно-конструкторської роботи, тематика якої схвалена Науковою Радою МОН України (Секція 7 – «Енергетика та енергоефективність»), а саме роботи «Енергетична установка, пропульсивний комплекс і система управління автономного плавального апарата подвійного призначення» (ДР № 0120U102577). Науковий керівник:

професор, д-р техн. наук В. В. Будашко (НУ «ОМА»). Де здобувач взяв участь як виконавець окремих етапів досліджень, із підготовкою відповідних розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретико-методологічних засад, моделей, методів та алгоритмів управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності на основі місійно-орієнтованого підходу, інтеграції адаптивного управління, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, інтегрального оцінювання ефективності та сценарно-структурного моделювання для забезпечення стійкого функціонування автономних платформ у динамічному стохастичному морському середовищі.

Запропонована методологія спрямована на вирішення задач технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів шляхом підвищення ефективності їх використання за призначенням, прогнозування технічного стану, адаптивного управління експлуатаційними режимами та забезпечення експлуатаційної надійності в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасного стану розвитку автономних морських транспортних засобів, існуючих підходів до управління ефективністю їх експлуатації та визначити основні наукові проблеми, обмеження і протиріччя у сфері адаптивного управління автономних морських систем;

– розробити теоретико-методологічні засади управління ефективністю автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності з урахуванням взаємодії технічних, інформаційних, енергетичних та експлуатаційних факторів;

– сформувати концепцію місійно-орієнтованого оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ та розробити інтегральні критерії оцінювання результативності автономних місій;

– розробити математичні моделі оцінювання ефективності функціонування автономних морських транспортних засобів з урахуванням стохастичних збурень, змін технічного стану та ресурсних обмежень автономної платформи;

– розробити методи та алгоритми адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами в умовах багатофакторної невизначеності та змінних режимів функціонування;

– розробити інтегровану архітектуру адаптивного контролю автономних морських транспортних засобів на основі поєднання прогнозного керування, нечіткої логіки та механізмів адаптивного коригування параметрів управління;

– ввести та формалізувати поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику автономних морських транспортних систем і дослідити її вплив на ефективність функціонування АМТЗ;

– розробити методологічні засади інтеграції цифрових двійників у систему управління ефективністю автономних морських транспортних засобів та реалізувати моделі прогнозування технічного стану автономної платформи;

– розробити підхід до інтеграції неоднорідних інформаційних потоків у межах єдиного інформаційного середовища експлуатаційного управління АМТЗ;

– розробити інтелектуальні системи управління електромеханічними комплексами морських автономних платформ та дослідити їх вплив на енергоефективність і стійкість функціонування системи;

– розробити структурно-сценарні моделі режимів функціонування морських автономних платформ у стохастичному середовищі та реалізувати механізми прогнозування критичних сценаріїв функціонування;

– розробити ризик-орієнтований підхід до оцінювання стійкості автономних місій і формування адаптивних стратегій управління ефективністю АМТЗ у змінних умовах експлуатації;

– виконати математичне та імітаційне моделювання запропонованих моделей, методів і алгоритмів управління ефективністю автономних морських транспортних засобів та оцінити їх результативність у різних сценаріях функціонування.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності та дії змінних факторів середовища.

Предметом дослідження є теоретико-методологічні засади, методи, моделі та механізми управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано методи системного аналізу – для формування теоретико-методологічних засад управління ефективністю автономних морських транспортних засобів; методи теорії управління та адаптивного керування – для розроблення моделей і алгоритмів управління режимами функціонування АМТЗ; методи математичного та імітаційного моделювання – для дослідження динаміки автономних платформ у стохастичному морському середовищі; методи теорії ймовірностей і випадкових процесів – для опису невизначеності та зовнішніх збурень; методи нечіткої логіки – для побудови інтелектуальних систем adaptive control; методи багатокритеріального аналізу та аналізу ієрархій – для інтегрального оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ; методи сценарного аналізу та структурного моделювання – для прогнозування критичних режимів функціонування і трансформації структури ризиків; методи цифрового моделювання та обробки інформації – для реалізації цифрових двійників, інтеграції інформаційних потоків і підтримки прийняття рішень.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження. Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Вперше:

– запропоновано методологію підвищення ефективності технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка, на відміну від існуючих підходів, базується на місійно-орієнтованому принципі управління

ефективністю з урахуванням багатофакторної невизначеності, сценарної зміни режимів функціонування та інтегрованої взаємодії технічних, інформаційних, енергетичних і керуючих підсистем, що дозволяє забезпечити комплексне оцінювання результативності автономних місій, підвищити стійкість функціонування системи та реалізувати адаптивне ризик-орієнтоване управління автономними морськими транспортними засобами у динамічному морському середовищі;

– розроблено інтегровану багаторівневу модель управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка поєднує адаптивне управління, сценарне моделювання, інтегральне оцінювання технічного стану, цифрові двійники та механізми підтримки прийняття рішень у межах єдиного контуру управління, що, на відміну від існуючих ізольованих моделей, дозволяє реалізувати динамічне коригування режимів експлуатації в реальному масштабі часу залежно від зміни умов функціонування, рівня ризику та ресурсних обмежень автономної місії;

– введено поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику в автономних морських транспортних системах, яка, на відміну від традиційного врахування лише зовнішніх і технічних факторів невизначеності, охоплює похибки адаптивних алгоритмів, неповноту інформації, змінність параметрів моделей і нестабільність процедур прийняття рішень, що дозволяє підвищити достовірність прогнозування експлуатаційної ефективності, надійності технічної експлуатації та стійкості автономних морських транспортних засобів у процесі виконання тривалих автономних місій.

Удосконалено:

– метод інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів шляхом введення вагових коефіцієнтів багатофакторного впливу, сценарної сегментації режимів функціонування та динамічного врахування змін технічного стану, що, на відміну від існуючих

статичних моделей оцінювання, дозволяє підвищити точність оцінки ефективності автономних морських транспортних засобів в умовах змінного морського середовища та тривалих автономних місій;

– метод адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами за рахунок інтеграції сценарного аналізу, ризик-орієнтованого коригування параметрів та адаптивного перерозподілу ресурсів, що, на відміну від традиційних фіксованих стратегій керування, дозволяє забезпечити стійкість функціонування системи при зміні режимів експлуатації, зовнішніх збуреннях та неповноті інформації.

Набули подальшого розвитку:

– методологічні засади класифікації факторів впливу на ефективність технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів шляхом формування багаторівневої ієрархічної структури технічних, енергетичних, кліматичних, навігаційних, інформаційних та експлуатаційних факторів, що дозволяє формалізувати взаємозв’язки між параметрами експлуатації та підвищити обґрунтованість прийняття рішень;

– методологічний підхід до підвищення ефективності технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів, реалізацію якого забезпечує використання цифрового двійника, що дозволяє підвищити оперативність моніторингу технічного стану та адаптивність управління в умовах інформаційної невизначеності;

– методи сценарного моделювання експлуатаційних режимів автономних морських транспортних засобів шляхом урахування стохастичних змін зовнішнього середовища, параметрів енергоспоживання та режимної нестабільності, що дозволяє здійснювати прогнозування експлуатаційної ефективності та оцінювання стійкості автономних морських транспортних засобів у реальному масштабі часу.

Отримані результати розвивають методологічні засади технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені у дисертаційній роботі теоретико-методологічні засади, математичні моделі, алгоритми та інформаційні механізми управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів можуть бути використані при створенні інтелектуальних систем управління автономними платформами, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, комплексів адаптивного керування та систем прогнозування технічного стану морських транспортних систем.

Запропоновані у роботі моделі адаптивного управління, інтегрального оцінювання ефективності, сценарного аналізу та прогнозування режимів функціонування автономних морських транспортних засобів впроваджено у діяльність казенного підприємства «Морська пошуково-рятувальна служба», товариства «Lema Cargo Service» (Україна), компанії «МарінТехСервіс» (Україна), товариства «ЄВРО ГРАСКОР», ПП «БОТС» та інших організацій морської галузі (додаток Б).

Результати дисертаційного дослідження використано під час розроблення програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень, призначених для адаптивного вибору режимів функціонування морських автономних платформ, прогнозування технічного стану, оцінювання ризиків та підтримки управлінських рішень в умовах невизначеності.

Окремі результати дослідження впроваджено у навчальний процес Одеського національного морського університету під час викладання дисциплін, пов’язаних із системами управління морським транспортом, інтелектуальними технологіями, адаптивними системами керування, математичним моделюванням та інформаційним забезпеченням на транспорті.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання підприємствами та організаціями, що здійснюють технічну експлуатацію автономних морських транспортних засобів, для моніторингу технічного стану, прогнозування деградаційних процесів, підтримання

експлуатаційної готовності, оптимізації режимів функціонування та підвищення ефективності використання автономних платформ у реальних умовах експлуатації.

Результати дисертаційного дослідження розширюють науково-методичні засади управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних систем та створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних транспортних технологій, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень і автономного судноплавства нового покоління.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, теоретико-методологічні положення, математичні моделі, методи, алгоритми та висновки, представлені у дисертаційній роботі та виносяться на захист, отримані автором самостійно.

У дисертаційній роботі автором розроблено методологію управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності, сформовано інтегровані моделі адаптивного управління, інтегрального оцінювання ефективності, сценарного моделювання та інформаційного забезпечення автономних морських систем, а також запропоновано підходи до інтеграції цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень і ризик-орієнтованого управління автономними платформами.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає у постановці наукових задач, розробленні математичних моделей та алгоритмів, а також у формуванні методологічних засад дослідження. Автором самостійно проведено математичне та імітаційне моделювання, виконано аналіз і узагальнення отриманих результатів, на основі яких сформульовано ключові висновки та практичні рекомендації.

Особистий внесок здобувача у спільних публікаціях відображено у переліку наукових праць за темою дисертації та конкретизовано для кожної роботи окремо.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати

дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 21 міжнародній та всеукраїнській науково-практичній конференції, симпозіумах, семінарах і круглих столах.

Публікації результатів дослідження. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 54 друковані праці, з них монографія, 33 статті у фахових та закордонних рецензованих виданнях, з яких 10 входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science (усі в періодичних виданнях).

Обсяг іструктура дисертації. Робота складається зі вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг дисертації складає 464 сторінки, обсяг основного матеріалу – 377 сторінок. Матеріал дисертації містить 72 рисунки та 34 таблиці. Загальний список використаної літератури складає 460 найменувань. Додатки подано на 24 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

1.1 Стан наукових досліджень та проблематика управління ефективністю автономних морських транспортних засобів

Глобальна трансформація морської інженерії висуває нові вимоги до ефективності автономних морських транспортних засобів (АМТЗ), які мають функціонувати в умовах нестабільних режимів експлуатації та невизначених зовнішніх факторів. Переорієнтація морської галузі на автономні технології зумовлюється потребою у зниженні експлуатаційних витрат, підвищенні рівня безпеки мореплавства і що головне, зменшенні залежності від людського фактора з метою забезпечення безперервності транспортно-логістичних процесів.

Переважна більшість існуючих підходів до управління морськими технічними системами ґрунтується на припущенні про стабільні або передбачувані умови експлуатації. Однак, як відомо, АМТЗ діють у динамічному середовищі з можливими змінами гідрометеорологічних умов, навігаційних обмежень, функціонального стану їх технічних модулів, а також інформаційної невизначеності щодо зовнішніх загроз.

Актуальність проблеми обумовлюється також відсутністю уніфікованої методології, що дозволяє об’єктивно оцінювати ефективність експлуатації АМТЗ з урахуванням складної багатофакторної структури ризиків, адаптивних режимів функціонування та потреб у системній оптимізації керуючих впливів. Тому використання лише класичних детерміністичних моделей або ізольованих емпіричних залежностей є недостатнім в умовах розвитку автономного судноплавства.

Наявність сукупності технічних, організаційних та інтелектуальних бар'єрів зумовлює необхідність фундаментального переосмислення наукових основ управління АМТЗ. Формування новітніх підходів має базуватися на системному аналізі, методах нечіткої логіки, адаптивному моделюванні та предиктивному управлінні, що дає змогу нівелювати вплив багатофакторної невизначеності.

Складність функціонування автономних морських транспортних засобів у динамічному середовищі обумовлюється одночасним впливом різнорідних факторів невизначеності, які мають різну фізичну природу, часову мінливість та ступінь прогнозованості. Традиційні підходи здебільшого враховують лише зовнішні стохастичні впливи, залишаючи поза увагою алгоритмічну та інформаційну невизначеність, що виникає внаслідок адаптивного характеру сучасних систем управління.

У зв'язку з цим доцільним є формалізоване представлення простору невизначеності у вигляді багатокомпонентної структури:

$$U = \{u_e, u_t, u_a, u_i\}, \quad u_k \in U, k \in \{e,t,a,i\}, \tag{1.1}$$

де u_e – екологічна невизначеність; u_t – технічна невизначеність; u_a – алгоритмічна невизначеність; u_i – інформаційна невизначеність.

Алгоритмічна невизначеність впливає не лише на якість формування керуючих рішень, а й опосередковано визначає рівень експлуатаційної готовності автономного морського транспортного засобу, імовірність відмов у процесі виконання місії та ефективність використання його технічного ресурсу.

Запропоноване представлення (1.1) використовується для структуризації джерел невизначеності та не претендує на роль завершеної стохастичної моделі. Формалізація окремих компонентів простору невизначеності здійснюється у наступних розділах дисертації.

Така формалізація дозволяє розглядати невизначеність не як ізольований зовнішній фактор, а як інтегровану багаторівневу категорію ризику, що чинить

безпосередній детермінований вплив на ключові аспекти експлуатації системи. Зокрема, такий підхід забезпечує аналіз взаємозв'язку між рівнем невизначеності та стійкістю функціонування платформи, точністю роботи адаптивних алгоритмів і обґрунтованістю процесів прийняття управлінських рішень. У кінцевому підсумку це дозволяє кількісно оцінити та оптимізувати загальну результативність автономної місії, враховуючи кумулятивний вплив ризиків на кожному етапі виконання цільового завдання.

Таким чином, проблема управління ефективністю АМТЗ виходить за межі класичних задач автоматизованого навігаційного керування та потребує формування нової методологічної парадигми, у межах якої ефективність розглядається як інтегральна динамічна характеристика, залежна від взаємодії технічних, інформаційних, алгоритмічних та зовнішніх факторів у реальному часі.

Сучасна парадигма розвитку морських автономних систем ґрунтується на концепції глибокої конвергенції інтелектуального керування, енергетичної автономності та превентивного менеджменту ризиків. Аналіз наукового доробку підтверджує трансформацію від локальних засобів автоматизації до комплексних архітектур управління, здатних функціонувати в умовах екстремальних навантажень. Проте критичною проблемою залишається врахування алгоритмічної невизначеності як специфічної категорії ризику, що виникає внаслідок динамічних змін параметрів моделей та похибок адаптивних алгоритмів.

У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення методології підвищення ефективності технічної експлуатації АМТЗ, заснованої на місійно-орієнтованому принципі. Ефективність сучасної автономної платформи повинна визначатися не лише техніко-економічними показниками, а передусім здатністю забезпечувати стійке виконання цільової місії в межах інтегрованої багаторівневої моделі. Такий підхід дозволяє реалізувати динамічне коригування режимів експлуатації в реальному часі, враховуючи інформаційну неповноту, обмеженість ресурсів та стохастичну природу морського середовища.

Ефективність виконання автономної місії в даному дослідженні розглядається як складова інтегральної ефективності технічної експлуатації автономного морського транспортного засобу, оскільки саме результати виконання місії характеризують якість використання транспортного засобу за призначенням.

У межах місійно-орієнтованого підходу результативність функціонування автономної морської платформи доцільно розглядати як інтегральну функцію технічної надійності, енергетичної стійкості, навігаційної стабільності та повноти виконання цільового завдання. Такий підхід дозволяє перейти від ізольованого оцінювання окремих технічних параметрів до комплексного аналізу здатності системи підтримувати виконання автономної місії в умовах невизначеності.

$$M_s = \int_0^T \left(w_1 R(t) + w_2 E(t) + w_3 N(t) + w_4 C(t) \right) dt , \qquad (1.2)$$

де M_s – інтегральний показник успішності виконання місії; R – надійність; E – енергоефективність; N – стабільність процесу навігації; C – коефіцієнт виконання місії.

Усі показники $R(t)$, $E(t)$, $N(t)$ та $C(t)$ попередньо нормуються до діапазону [0;1], що забезпечує їх сумісність при побудові інтегрального критерію оцінювання ефективності. Інтегрування на часовому інтервалі $[0,T]$ дозволяє врахувати зміну експлуатаційних характеристик АМТЗ протягом виконання місії та сформувати узагальнену оцінку її результативності.

Запропонована формалізація дозволяє інтерпретувати ефективність АМТЗ як багатофакторну динамічну категорію, що залежить не лише від технічного стану окремих підсистем, а й від здатності платформи адаптивно реагувати на зміни зовнішнього середовища, компенсувати невизначеність та підтримувати стійкість виконання місії у реальному масштабі часу.

Сучасний розвиток автономних морських транспортних засобів

супроводжується стрімким переходом від окремих автоматизованих функцій до формування комплексних морських автономних систем, здатних виконувати автономні місії у динамічному стохастичному середовищі [6, 8]. У науковій літературі активно розвиваються дослідження, присвячені адаптивному керуванню, інтелектуальній навігації, цифровим двійникам, архітектурам систем підтримки прийняття рішень (DSS) та інтегрованим системам автономного управління [14, 19, 21, 50].

Одним із найбільш розвинених напрямів сучасних досліджень є система адаптивного управління морськими автономними платформами. Так, розглядаються системи контролю для автономних морських суден та формуються загальні архітектури автономних систем управління. Автори концентрують увагу на стабільності руху, підтримці курсу та навігаційному керуванні, однак ефективність систем оцінюється переважно через параметри керування без урахування місійних критеріїв.

У дослідженні [2] обґрунтовано ефективність адаптивного регулювання глибини занурення автономних платформ, проте поза увагою залишилися питання інтегрованого управління місією як цілісної категорії. Взаємозв’язок автономності, надійності та ризиків оператора детально розглянуто у праці [3], де акцент зміщено на менеджмент безпеки, що, однак, не дозволяє повною мірою врахувати багатофакторну невизначеність середовища в межах місійно-орієнтованого підходу. На відміну від згаданих робіт, дослідження [4] фокусується на технологіях екологічного моніторингу та збору даних сенсорними системами, але при цьому питання адаптивного управління місіями (adaptive mission management) залишаються нерозв’язаними.

Аналогічно, у роботі [5] запропоновано архітектуру апарата для акустичних та батиметричних досліджень, де при високому рівні інтеграції сенсорів ефективність системи обмежена оцінюванням окремих операційних завдань без урахування комплексного принципу результативності. Дослідження [6],

присвячене автономному транспорту на внутрішніх водних шляхах, враховує інформаційну інфраструктуру та системи зв’язку, проте в ньому відсутній фреймворк адаптивного управління ефективністю (adaptive efficiency management framework). Це унеможливлює динамічне коригування режимів експлуатації в реальному часі, що ще раз підкреслює необхідність комплексного наукового опрацювання систем адаптивного управління в умовах невизначеності.

У праці [7] на прикладі IoT-систем управління відходами підтверджено потенціал інтелектуальних екосистем, проте автономність у ній обмежена роллю інструменту моніторингу без можливості комплексної оцінки результативності місій. Систематичний огляд [8], хоча й узагальнює ключові технології навігації та зв’язку, не пропонує концепції інтегрованого місійно-орієнтованого управління. У дослідженні [9] реалізовано фреймворк онлайн-моделювання ризиків у складних льодових умовах, проте ці механізми не пов’язані з адаптивним управлінням ефективністю. Системний аналіз інновацій у роботі [10] визначає вектори розвитку галузі, але залишає методологію адаптивного менеджменту несформованою. Нарешті, у дослідженні [11] ефективність автономних платформ оцінюється лише за точністю локалізації, без урахування впливу алгоритмічної невизначеності на загальний успіх місії.

У дослідженні [12] акцент зміщено на операційне розгортання автономних систем для інспекції офшорних об'єктів, проте в ньому не представлена архітектура адаптивного управління місіями. Методологія аналізу системних ризиків на основі підходів STPA та ODD, запропонована у роботі [13], попри свою новизну, обмежується виключно запобіганням аваріям і не охоплює питань загальної ефективності функціонування. Використання технології цифрових двійників у праці [14] демонструє значний потенціал для моделювання місій, проте цей інструментарій залишається переважно симуляційною платформою, а не частиною активного керувального контуру.

Хоча у роботах [15, 16] представлено більш системні архітектури адаптивної навігації та траєкторного керування, цілісна методологія оцінювання

операційної ефективності в межах виконання конкретних місій (mission-oriented efficiency) у них все ще потребує розробки.

У дослідженні [17] запропоновано методологію детекції та розпізнавання об'єктів на основі радіолокаційних даних для автономних надводних апаратів. Основна увага авторів зосереджена на вдосконаленні систем сприйняття (perception systems) та ідентифікації об'єктів у складних умовах морського середовища, проте поза межами наукового пошуку залишилися питання оцінювання операційної ефективності функціонування таких систем. Паралельно з цим, [18] здійснюють комплексний аналіз технологій енергетичної автономності суден та визначають вектори їхнього перспективного розвитку. Авторами розглядається енергоефективність як детермінована складова автономності апарата, водночас у роботі відсутній цілісний підхід до її інтеграції з операційним управлінням, орієнтованим на виконання конкретних місій (mission-oriented operational management).

У дослідженні [19] запропоновано стратегії адаптивного керування для забезпечення маневреності та стійкості на курсі автономних суден. Робота демонструє високий рівень розвитку алгоритмів адаптивної навігації, проте ефективність автономної місії не розглядається як інтегральна категорія, що обмежує можливості комплексного оцінювання результативності експлуатації АМТЗ у динамічному середовищі.

У роботі [20] реалізовано підхід до оцінювання кіберризиків автономних суден на основі баєсівських мереж. Попри акцент на кібербезпеці, поза увагою авторів залишилися алгоритмічна невизначеність та ризики дестабілізації адаптивних моделей, що обмежує точність прогнозування надійності систем. Дослідження [21], присвячене оптимізації енергоефективності через глибоке навчання з підкріпленням, демонструє високий рівень інтелектуалізації, проте відсутність методології управління стійкістю місій (mission resilience) заважає динамічному коригуванню режимів у реальному часі. Аналіз технологій

дистанційного керування у праці [22] зосереджений на безпеці навігації, проте в ній не сформовано фреймворк адаптивного управління ефективністю. Аналогічно, у дослідженні [23], що фокусується на алгоритмах планування траєкторій (path planning), питання інтегрованого управління складними місіями (mission-oriented management) не отримали належного висвітлення.

У праці [24] обґрунтовано метод групової навігації автономних суден на основі алгоритму PPO, що забезпечує високу адаптивність поведінки ШІ, проте критерії ефективності в ньому обмежені лише показниками запобігання зіткненням. Аналогічний підхід із використанням згорткових моделей глибокого навчання застосовано у дослідженні [25], де методи ШІ інтегровано з аналізом ризиків, однак оцінювання операційної стійкості (operational resilience) системи не проводилося. Використання нелінійної моделі URANS у роботі [26] дозволило досягти високої точності слідування за траєкторією в умовах хвилювання, проте критерії місійної ефективності (mission effectiveness) залишилися поза межами наукового пошуку. Хоча у дослідженні [27] сформовано інтелектуальну систему прийняття рішень для груп суден, у ній відсутній інтегрований фреймворк управління алгоритмічною невизначеністю.

У працях [28, 30] на прикладі моніторингу морських середовищ продемонстровано високий прикладний потенціал глибокого навчання для автономних роботів, проте механізми адаптивного управління в умовах багатофакторної невизначеності в них не представлені. Дослідження [29, 33], присвячені технологіям самовідновлення (self-healing) морських конструкцій, підтверджують загальну тенденцію до автономізації галузі, але через свій матеріалознавчий характер вони не охоплюють аспекти інтегрованого операційного менеджменту. Аналогічно, у статті [32] розглядається оптимізація багатовхідних систем енергозабезпечення апаратів, проте місійно-орієнтовані принципи управління в межах єдиного контуру прийняття рішень авторами не інтегруються.

Подальший аналіз наукового базису підтверджує стійку тенденцію до

глибокої спеціалізації та сегментації сучасних морських автономних технологій, що свідчить про перехід від концептуальних розробок до вирішення прикладних високотехнологічних задач. Сучасні дослідження охоплюють мультидисциплінарний спектр напрямів: від синтезу алгоритмів MPC-керування групами об'єктів [36] та проєктування реактивних архітектур уникнення зіткнень [39, 65, 69] до формування комплексних регуляторно-правових засад експлуатації MASS [37, 41, 47, 51, 68]. Особливий науковий інтерес викликають питання інтелектуалізації сенсорних систем [38, 53, 72], впровадження методів ройового інтелекту [45] та застосування інструментарію машинного навчання для оцінювання функціональної надійності й підтримки прийняття рішень у складних навігаційних ситуаціях [42, 56, 59, 60].

Разом із тим, незважаючи на значний прогрес у компютерізації морської галузі, проведений аналіз виявляє суттєву фрагментарність наявних рішень. Більшість авторів фокусується на оптимізації ізольованих параметрів – таких як точність утримання курсу або енергоефективність окремого маневру – залишаючи поза увагою місійно-орієнтований принцип оцінювання загальної результативності АМТЗ (табл. 1.1).

Проведений порівняльний аналіз свідчить, що сучасні наукові підходи характеризуються високим рівнем спеціалізації та переважно орієнтовані на вирішення локальних задач автономного функціонування морських платформ. При цьому більшість існуючих рішень не забезпечує комплексної інтеграції механізмів адаптивного керування, місійно-орієнтованого оцінювання ефективності та управління алгоритмічною невизначеністю. Також поза межами єдиних систем залишаються архітектури підтримки прийняття рішень (DSS) та технології цифрових двійників (digital twin technologies), що обмежує можливість створення цілісного контуру управління автономною місією.

Саме зазначені обмеження визначають необхідність розроблення нової інтегрованої методології управління ефективністю АМТЗ в умовах стохастичної невизначеності та динамічних режимів функціонування. Такий підхід дозволить

подолати фрагментарність існуючих рішень, забезпечуючи перехід від локальної стабілізації технічних параметрів до стратегічного менеджменту результативності місії як складного ієрархічного процесу.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз сучасних підходів до управління автономними морськими системами

Напрям досліджень	Основний науковий фокус	Переваги існуючих підходів	Основні обмеження
Адаптивні навігаційні системи	Стабілізація руху та навігаційне керування	Висока точність утримання курсу та маневрування	Відсутність інтегрального оцінювання місійної ефективності
Системи підтримки прийняття рішень (DSS) та інтелектуальне прийняття рішень	Підтримка прийняття рішень	Підвищення оперативності аналізу даних	Відсутність adaptive real-time integration
Архітектури цифрових двійників	Симуляція та прогнозування стану систем	Можливість моделювання режимів функціонування	Обмежене використання у замкненому adaptive control loop
Підходи на основі підкріплювального навчання	Інтелектуальне adaptive control	Самонавчання та адаптація до середовища	Неврахування algorithmic uncertainty
Ризик-орієнтовані морські системи	Аналіз ризиків та безпеки	Підвищення рівня safety management	Орієнтація переважно на локальні ризики
Існуючі платформи MASS	Автономізація морських платформ	Високий рівень автоматизації	Відсутність integrated mission-oriented efficiency management

Критичною науковою прогалиною залишається ігнорування алгоритмічної невизначеності як специфічної категорії ризику. У той час як традиційні підходи концентруються на зовнішніх стохастичних збуреннях, ризики, зумовлені похибками адаптивних алгоритмів, динамічною нестабільністю моделей та інформаційною неповнотою, залишаються недослідженими.

Незважаючи на значний технологічний прогрес у розв'язанні локальних

завдань (зокрема, забезпечення безпеки навігації чи оптимізації траєкторій), існуючі моделі не розглядають алгоритмічну невизначеність як самостійну категорію ризику, що створює об'єктивний бар'єр для формування інтегрованих багаторівневих моделей управління, які б дозволяли здійснювати динамічне коригування режимів експлуатації в реальному часі на основі єдиного контуру прийняття рішень, що й визначає напрям подальшого наукового пошуку в межах цієї дисертаційної роботи.

Крім того, більшість розробок має вузькофункціональний характер і не пропонують інтегрованої багаторівневої архітектури, яка б поєднувала інформаційні потоки та цифрові двійники в єдиному контурі управління. Як наслідок, у науковій літературі залишається несформованим місійно-орієнтований принцип оцінювання ефективності, що унеможливлює комплексне управління автономними місіями як цілісними процесами, де успішність визначається не лише технічною справністю чи точністю курсу, а здатністю системи адаптивно перерозподіляти ресурси для досягнення цілей місії в умовах високої стохастичності морського середовища.

Окремі вектори досліджень зосереджені на кількісному оцінюванні ризиків [48, 49, 58], кібербезпеці та цілісності даних [64], а також на специфічних аспектах автономного керування [57] та експлуатації в арктичних умовах [61]. Попри розгалуженість цих розробок – включаючи методи ідентифікації відмов [74], онлайн-планування траєкторій [75] та управління енергозабезпеченням [62, 63] – більшість із них фокусується на розв’язанні ізольованих технічних або юридичних задач. Така функціональна фрагментарність не дозволяє повною мірою врахувати алгоритмічну невизначеність як окрему категорію ризику та перешкоджає створенню інтегрованої багаторівневої моделі для динамічного коригування режимів експлуатації в реальному часі. Відсутність місійно-орієнтованого принципу в існуючих підходах обмежує можливість комплексного оцінювання

результативності автономних місій у складних та мінливих умовах морського середовища.

Узагальнюючи результати аналізу джерел, слід зазначити, що в існуючих підходах відсутня єдина методологія, яка б інтегрувала ці вузькоспеціалізовані рішення в межах місійно-орієнтованого принципу оцінювання ефективності. Поза увагою дослідників залишається алгоритмічна невизначеність як специфічна категорія ризику, а запропоновані моделі не забезпечують динамічного коригування режимів експлуатації на основі багаторівневого інтегрального оцінювання технічного стану та зовнішніх чинників у єдиному контурі прийняття рішень.

Узагальнення проведеного аналізу свідчить, що сучасні наукові праці характеризуються високим рівнем детермінації окремих компонентів автономних морських екосистем, зокрема у сферах адаптивного керування, ШІ-навігації, систем підтримки прийняття рішень (DSS), предиктивної аналітики та методів оцінювання надійності. Разом із тим, встановлено, що більшість існуючих підходів залишається функціонально ізольованою та має вузьку навігаційно-технологічну спрямованість.

У межах сучасного наукового дискурсу практично відсутня цілісна методологія адаптивного місійно-орієнтованого управління ефективністю, яка б забезпечувала синергію наступних критичних чинників:

– місійної результативності (mission effectiveness), що передбачає комплексне оцінювання результатів автономних місій у динамічному середовищі;

– багатофакторної стохастичної невизначеності, яка враховує вплив технічних, інформаційних та керуючих підсистем;

– алгоритмічної невизначеності, що виділяється як специфічна категорія ризику, пов’язана з похибками адаптивних алгоритмів та неповнотою даних;

– забезпечуючи операційну стабільність та параметричну адаптивність системи, що уможливлює прецизійне динамічне коригування експлуатаційних режимів у реальному масштабі часу;

– інтеграції цифрових двійників та неоднорідних потоків даних у єдиний контур прийняття рішень для підвищення оперативності моніторингу.

Зазначений дефіцит комплексних рішень є фундаментальною науковою проблемою розвитку сучасних автономних морських систем. Це визначає об'єктивну необхідність та актуальність розроблення методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка базується на принципах місійної орієнтації, багаторівневого моделювання та адаптивного нівелювання впливу алгоритмічної невизначеності.

Для формалізованого представлення процесу управління ефективністю автономних морських транспортних засобів доцільно розглядати систему як інтегровану багаторівневу структуру, що поєднує контури невизначеності, місійного управління, адаптивного керування, інформаційної підтримки та забезпечення стійкості функціонування.

У загальному вигляді концептуальна модель системи управління ефективністю АМТЗ може бути представлена у вигляді:

$$R(t) = F_{AMTZ}\left(U(t), M(t), C(t), D(t)\right), \qquad (1.3)$$

де U – простір невизначеності; M – місійно-орієнтована модель функціонування; C – архітектура адаптивного керування; D – системи підтримки прийняття рішень (DSS) та інтеграція інформації; R – операційна стійкість.

Вираз (1.3) має концептуально-архітектурний характер та відображає узагальнену функціональну залежність між основними компонентами системи управління ефективністю АМТЗ (конкретизація окремих функціональних залежностей та математичних моделей здійснюється у наступних розділах дисертації).

Запропонована структура дозволяє формалізувати взаємозв’язки між процесами адаптивного управління, інформаційного забезпечення та підтримання місійної ефективності в умовах стохастичної невизначеності.

У межах даного дослідження термін «автономні морські транспортні засоби» (АМТЗ) використовується як узагальнююче поняття, що охоплює широкий спектр автономних морських систем, платформ та технічних комплексів, здатних виконувати цільові функції без безпосереднього постійного втручання оператора.

При цьому поняття:

– «морська автономна платформа» використовується переважно для акцентування уваги на функціонально-операційній архітектурі системи;

– «автономна морська система» – у контексті інтеграції керуючих, інформаційних та комунікаційних підсистем;

– «автономний морський транспортний засіб» – базова категорія дослідження, що охоплює надводні, підводні та гібридні автономні об’єкти морського призначення, здатні виконувати транспортні, моніторингові, дослідницькі, навігаційні та спеціалізовані автономні місії.

Таке узагальнення відповідає сучасній міжнародній практиці використання понять Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Autonomous Maritime Systems (AMS) та Autonomous Marine Platforms (AMP), які в межах міждисциплінарних досліджень часто розглядаються як взаємопов’язані компоненти єдиного класу автономних морських технологій (табл. 1.2).

Тому у межах дисертаційного дослідження зазначені поняття використовуються як взаємодоповнювальні категорії залежно від контексту розгляду:

– технічного;

– функціонального;

– інформаційного;

– місійно-орієнтованого;

– системно-архітектурного.

Додатково слід зазначити, що у межах дисертаційного дослідження

зазначені поняття розглядаються як взаємопов’язані елементи єдиного класу автономних морських технологій.

Таблиця 1.2 – Термінологічна структура понять у сфері автономних морських технологій

Термін	Контекст використання	Основний акцент
Автономні морські транспортні засоби (АМТЗ)	Загальна категорія дослідження	Комплексне автономне функціонування
Автономні морські системи	Системний та інформаційний аналіз	Інтеграція підсистем та DSS
Морські автономні платформи	Операційно-функціональний контекст	Виконання місій та сценаріїв
Автономні морські надводні судна (MASS)	Міжнародна нормативна практика	Автономне судноплавство
Автономні морські платформи (АМР)	Науково-дослідні системи	Експериментальні автономні комплекси
Автономні підводні апарати (AUV)	Підводні автономні системи	Навігація та автономні підводні місії

При цьому вибір та використання конкретного терміна визначаються переважно функціональним контекстом, рівнем системного аналізу, специфікою місійного середовища та безпосереднім характером досліджуваної наукової задачі. Такий комплексний підхід дозволяє забезпечити термінологічну точність під час опису складних ієрархічних систем, адаптуючи понятійний апарат до конкретних умов функціонування та управління автономними морськими об’єктами.

1.2 Теоретико-методологічні засади оцінювання ефективності АМТЗ в умовах невизначеності

Метою даного параграфу є обґрунтування та розроблення теоретико-методологічних засад управління ефективністю експлуатації АМТЗ в умовах стохастичної невизначеності та змінних режимів функціонування. Основний фокус дослідження спрямований на впровадження місійно-орієнтованого

принципу оцінювання результативності, що, на відміну від традиційних підходів, дозволяє враховувати алгоритмічну невизначеність та забезпечувати динамічну стійкість системи. Розроблені рішення базуються на інтегрованій багаторівневій моделі, яка поєднує адаптивне управління та предиктивну аналітику в єдиному контурі прийняття рішень, забезпечуючи підвищення функціональної надійності та цільової корисності АМТЗ у динамічному морському середовищі.

Автономні морські технічні засоби (АМТЗ) – це інтелектуальні системи, здатні виконувати спеціалізовані операції без постійного втручання людини. До таких систем належать автономні надводні судна (USV, MASS), підводні апарати (AUV), а також роботизовані платформи, призначені для наукових досліджень, екологічного контролю та охорони морських кордонів. Ефективність експлуатації таких засобів визначається здатністю враховувати комплекс взаємопов’язаних впливів, які формують динамічне середовище їх функціонування [76, 77].

Ключовими факторами впливу на ефективність АМТЗ є гідрометеорологічні, навігаційні, технічні, ергатичні та цифрові умови, а також висока мінливість морського середовища. Це зумовлює потребу в інтегрованих моделях, що поєднують ризик-менеджмент, прогнозування та адаптивне керування з урахуванням часової динаміки, деградації бар’єрів безпеки та сценарного моделювання.

Класифікація факторів впливу на ефективність експлуатації АМТЗ

Забезпечення стабільної та результативної експлуатації автономних морських транспортних засобів у динамічних умовах морського середовища є одним із ключових завдань сучасної морської інженерії та експлуатаційної практики. Робота таких систем відбувається під впливом багатокомпонентного комплексу факторів різної фізичної природи, з високою мінливістю у часі та неоднаковим рівнем передбачуваності. Недооцінка або неточне врахування цих

впливів призводить до зниження функціональної надійності, зростання експлуатаційних витрат та підвищення ризику відмов, що безпосередньо впливає на безпеку судноплавства [78, 79].

Класифікація факторів впливу є початковим етапом адже її результати формують базу для побудови багаторівневих структурно-функціональних моделей управління та формування системи критеріїв та показників ефективності. А розробка математичних моделей оцінювання та прогнозування роботи АМТЗ з урахуванням стохастичних режимів і ризиків наддасть змогу реалізувати сценарний аналіз адаптивної поведінки АМТЗ в умовах невизначеності.

Методологічно коректна систематизація факторів дозволяє виділити найбільш значущі детермінанти впливу, встановити взаємозв'язки між ними та створити передумови для побудови формалізованих моделей, які здатні враховувати як прямі, так і опосередковані ефекти, що особливо актуально для автономних технічних систем, де відсутність постійного людського контролю вимагає максимальної передбачуваності і стійкості роботи до змінних умов середовища [80].

Методологічні засади класифікації

Ефективність експлуатації автономних морських транспортних засобів у змінних режимах обумовлюється комплексом взаємозв'язаних факторів різної природи, вплив яких має системний характер. Для забезпечення обґрунтованого управління та точної оцінки ефективності функціонування АМТЗ необхідно розробити формалізовану класифікацію цих факторів. Такий підхід дасть змогу виокремити ключові детермінанти, що впливають на цільові показники, визначити їх пріоритетність і значущість, а також врахувати динамічні зміни та невизначеність як зовнішнього, так і внутрішнього середовища.

У результаті аналізу технічної та наукової літератури, експертних опитувань і практичного досвіду з експлуатації автономних морських транспортних засобів, фактори було згруповано у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 –Систематизація факторів за групами

№	Група факторів	Характеристика	Приклади впливу на ефективність	Критерії оцінки
1	Технічні	Параметри та стан суднових систем і вузлів	Зношення елементів, відмова, деградація, похибки	MTBF, інтенсивність відмов, відсоток простою
2	Навігаційні	Умови руху та особливості маршруту переходу	Щільність суднопотоку, вузькі протоки, канали, небезпечні зони	Кількість маневрів, ризик зіткнення
3	Енергетичні	Режими споживання та генерації енергії	Перевантаження енергосистеми, нестабільність живлення	Питомі витрати палива, резерв потужності
4	Кліматичні	Вплив середовища на конструкцію та системи	Штормові умови, температура, вологість, обмерзання	Швидкість вітру, висота хвилі, температура
5	Інформаційні	Стан каналів зв’язку та обміну даними	Затримки в передачі даних, відмова зв’язку	Пропускна здатність, латентність, втрати пакетів
6	Людські	Вплив екіпажу або операторів на роботу АМТЗ	Помилки оператора, затримка реакції, втома	Психофізіологічні показники, частота помилок

Методологічною основою класифікації обрано системний підхід, за яким усі фактори розглядаються як взаємопов’язані елементи єдиної системи «АМТЗ – середовище функціонування».

Класифікація базується на принципах: комплексності (врахування технічних, навігаційних, енергетичних, кліматичних, інформаційних та людських впливів), ієрархічності (структуризація від загальних груп до конкретних параметрів), вимірюваності (можливість кількісної чи якісної оцінки) та динамічності (урахування змінності у часі й залежно від режиму експлуатації) [81, 82].

На рис. 1.1 подано узагальнену ієрархічну структуру факторів впливу, які визначають рівень ефективності роботи АМТЗ.

Така структуризація дозволяє проводити матричний аналіз взаємозв’язків

між факторами та здійснювати кількісну оцінку їхнього впливу в межах математичної моделі.

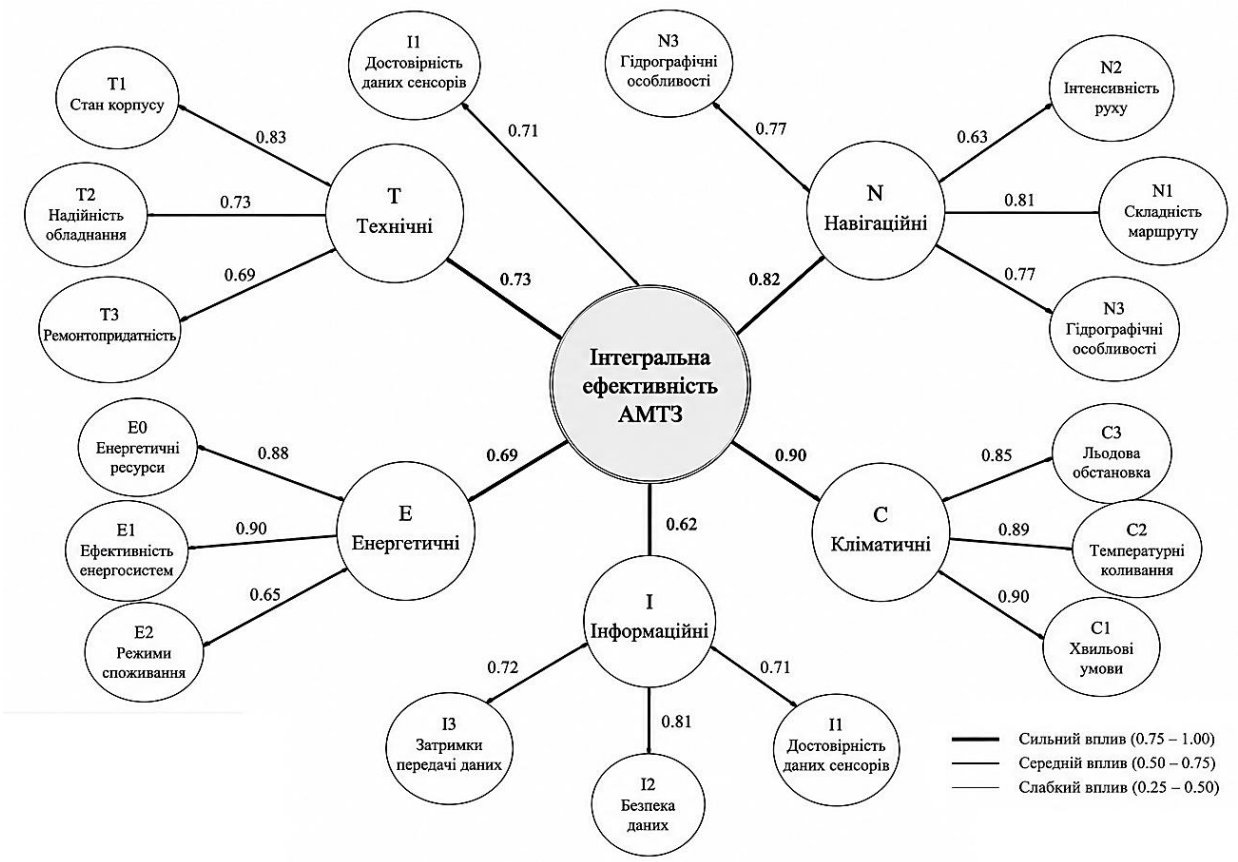


Рисунок 1.1 – Ієрархія факторів впливу на ефективність експлуатації АМТЗ

Центральним елементом є інтегральний показник технічної експлуатації, який формується під впливом шести ключових груп факторів: технічних, енергетичних, кліматичних, навігаційних, інформаційних ілюдських. Далі кожна з груп розгалужується на підфактори, які деталізують специфічні аспекти впливу, наприклад, у технічній групі виділено стан корпусу та конструкцій, а також надійність обладнання [83].

Інтегральний показник відображає сукупний вплив технічного стану, енергетичної ефективності, інформаційної забезпеченості, рівня ризику та результативності виконання місії на ефективність технічної експлуатації автономного морського транспортного засобу.

Проведений аналіз факторів впливу дозволив кількісно оцінити їхню відносну значущість для ефективності експлуатації АМТЗ. Система вагових коефіцієнтів сформована на основі експертного аналізу та узагальнення результатів сучасних наукових досліджень. При визначенні відносної важливості факторів використовувалися принципи методу аналізу ієрархій (AHP), зокрема ієрархічна структуризація критеріїв та їх порівняльне оцінювання. Отримані вагові коефіцієнти відображають узагальнену експертну оцінку впливу окремих груп факторів на ефективність експлуатації автономних морських транспортних засобів (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Вагові коефіцієнти факторів впливу на ефективність експлуатації АМТЗ

№	Група факторів	Підфактори	Вага групи w_g	Вага підфактору w_p
1	Технічні	Стан корпусу та конструкцій	0,28	0,12
		Надійність функціонування обладнання	–	0,16
2	Енергетичні	Ефективність роботи енергосистем	0,18	0,10
		Запаси та витрати палива	–	0,08
3	Кліматичні	Штормові умови	0,16	0,09
		Температурні коливання		0,07
4	Навігаційні	Складність маршруту переходу	0,14	0,08
		Гідрографічні особливості району	–	0,06
5	Інформаційні	Достовірність інформаційних даних	0,12	0,07
		Затримки у передачі даних	–	0.05
6	Людські	Рівень підготовки екіпажу (при наявності)	0,12	0,07
		Фізіологічний стан операторів систем	–	0,05

Так, найбільшу вагу мають технічні фактори (0,28), що обумовлено критичною роллю справності корпусу таобладнання для безпечного виконання

завдань, також значущими залишаються енергетичні фактори (0,18) та кліматичні умови (0,16), які безпосередньо впливають на надійність і безперервність роботи.

Процедура формування вагових коефіцієнтів базується на принципах методу аналізу ієрархій (AHP), який дозволяє структурувати систему критеріїв та враховувати їх відносну важливість у багатокритеріальних задачах. Отримані ваги мають експертний характер і використовуються для побудови інтегральної моделі оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ. Формально система вагових коефіцієнтів повинна задовольняти умову нормалізації: $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$. При цьому визначення вектора пріоритетів здійснюється шляхом розв'язання спектральної задачі: $A\omega = \lambda_{\max}\omega$, де A – матриця парних порівнянь; ω – вектор вагових коефіцієнтів; $\lambda_{\max}$ – максимальне власне значення матриці.

Отримані вагові коефіцієнти є основою для подальшого математичного моделювання ефективності експлуатації АМТЗ у змінних умовах. Їхнє використання у складі інтегрального показника дозволяє виконувати не лише поточний аналіз стану системи, але й прогнозувати вплив окремих факторів на часовому горизонті планування. Такий підхід забезпечує пріоритетність у розподілі ресурсів, оптимізацію графіків технічного обслуговування та підвищення загальної надійності функціонування автономних засобів.

Для практичного оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ доцільно використовувати систему показників, що характеризують технічну готовність, ефективність використання, безвідмовність і ресурс автономних засобів. Основні показники наведено в табл. 1.5.

Зазначені показники використовуються як допоміжні експлуатаційні характеристики при оцінюванні технічного стану автономної морської платформи та можуть бути інтегровані у запропоновану методологію для розширення системи критеріїв оцінювання ефективності експлуатації.

Таблиця 1.5 – Основні експлуатаційні показники автономних морських транспортних засобів

Показник	Позначення	Призначення
Коефіцієнт технічної готовності	K_{tg}	Оцінювання готовності АМТЗ до виконання місії
Коефіцієнт використання	K_u	Оцінювання ефективності використання транспортного засобу
Середній наробіток до відмови	MTTF	Оцінювання безвідмовності
Середній час відновлення	MTTR	Оцінювання ремонтної складової експлуатації
Залишковий ресурс	R_{res}	Прогнозування залишкового ресурсу

1.3 Методологія інтегрального оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ

Для комплексної оцінки ефективності технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів доцільно використовувати інтегральний показник технічної експлуатації $E_{\text{інт}}$, що враховує вагову значущість кожної групи факторів та стан окремих підфакторів.

$$E_{\text{інт}} = \sum_{i=1}^{n} w_{g_i} \left(\sum_{j=1}^{m_i} w_{ij} \cdot K_{ij} \right), \tag{1.4}$$

де $E_{\text{інт}}$ – інтегральний показник технічної експлуатації; w_{gi} – вага i-тої групи факторів (визначається за методом AHP); w_{pi} – вага j-го підфактору у межах i-тої групи; K_{ij} – нормалізоване значення показника ефективності за підфактором; n – кількість груп факторів; m_i – кількість підфакторів у межах групи i.

Запропонована інтегральна модель дозволяє формалізувати процес оцінювання ефективності як багатокритеріальну задачу оптимізації в умовах невизначеності. При цьому зміна будь-якого локального параметра K_{ij} призводить до динамічної трансформації інтегрального показника, що забезпечує високу чутливість системи до деградації окремих підсистем та режимних відхилень.

Для оцінювання ступеня впливу окремих факторів доцільно використовувати коефіцієнт чутливості:

$$S_{ij} = \frac{\partial E_{\text{int}}}{\partial K_{ij}}, \quad i = 1,\ldots,n,\ j = 1,\ldots,m, \tag{1.5}$$

де S_{ij} – коефіцієнт чутливості; K_{ij} – локальний параметр ефективності.

Запропонована методика розрахунку ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів передбачає поетапне формування інтегральної оцінки на основі системного урахування різнорідних факторів. На першому етапі визначається повний перелік впливів – технічних, енергетичних, кліматичних, навігаційних, інформаційних та людських. Далі за допомогою методу парних порівнянь із подальшою нормалізацією призначаються вагові коефіцієнти, що відображають відносну значущість кожного фактору. Зібрані фактичні дані за обраними показниками приводяться до безрозмірної форми, що забезпечує їх порівняльний аналіз. Інтегральний показник технічної експлуатації $E_{\text{інт}}$ розраховується за узагальненою формулою (1.4), а потім отримані результати інтерпретуються: значення, наближене до 1, свідчить про високий рівень ефективності, а значення, нижче 0,6 – про необхідність впровадження коригувальних заходів (рис. 1.2).

Серед переваг такого підходу – можливість кількісної інтеграції різнорідних факторів у єдину метрику, визначення пріоритетів за найбільш впливовими параметрами, а також потенціал використання моделі як прогнозного інструменту для планування технічного обслуговування та адаптації режимів роботи АМТЗ в умовах змінного середовища [83, 84].

Запропонована модель (рис. 1.3) передбачає багаторівневий підхід до управління ефективністю АМТЗ, що в підсумку дозволяє поєднати стратегічні цілі з тактичними алгоритмами та операційними процедурами.



Рисунок 1.2 – Блок-схема етапів розрахунку інтегрального показника ефективності АМТЗ

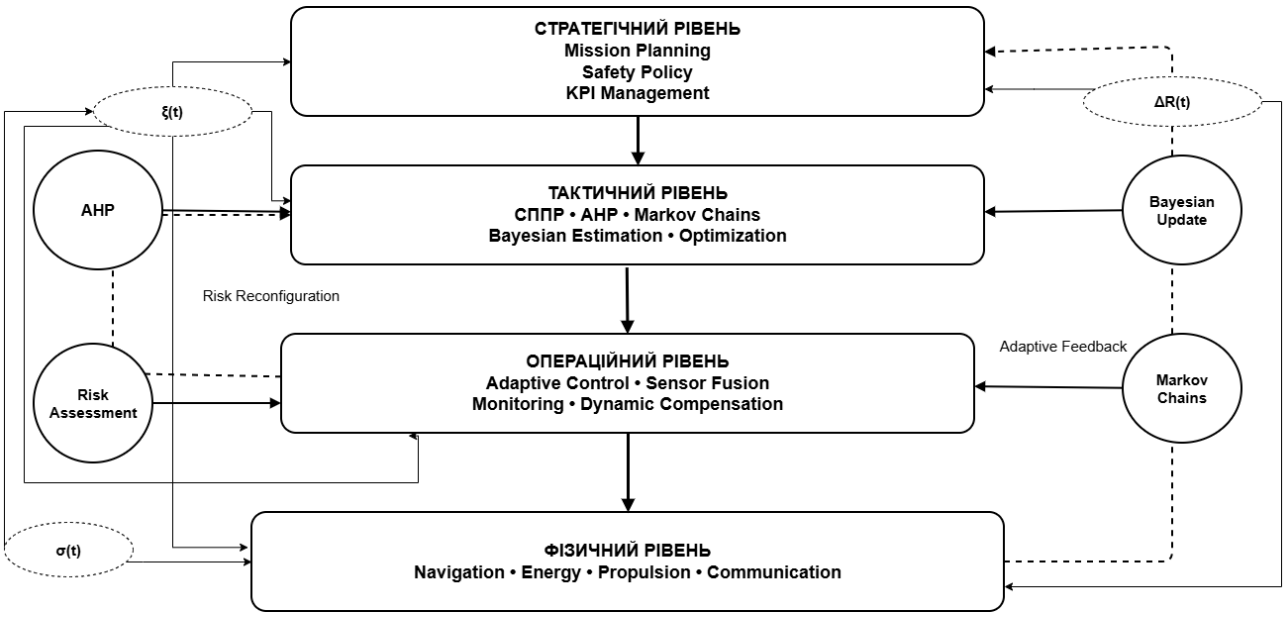


Рисунок 1.3 –Ієрархічна система адаптивного управління ефективністю АМТЗ

На стратегічному рівні формуються цільові орієнтири та обмеження, що визначають рамки експлуатації. Тактичний рівень забезпечує аналітику й оптимізацію на основі математичних моделей і даних від підсистем. Операційний рівень реалізує безпосереднє управління й адаптацію параметрів у реальному часі, що забезпечує гнучкість і стійкість АМТЗ до змінних режимів роботи та невизначеності зовнішнього середовища.

Така трирівнева структура управління ефективністю експлуатації АМТЗ забезпечує комплексний підхід до досягнення високих показників продуктивності, безпеки та адаптивності в умовах змінного середовища наступним чином:

Рівень 1 є стратегічним і визначає довгострокові орієнтири роботи системи. На цьому етапі основною метою є забезпечення цільової продуктивності, безпеки та гнучкості функціонування АМТЗ. Вхідними умовами слугують нормативні обмеження, технічні регламенти та стратегічні плани експлуатації. Вихідні параметри формуються у вигляді цільових показників ефективності, політик технічного обслуговування та планових маршрутів;

Рівень 2 – тактичний, він реалізує завдання аналізу й оптимізації на середньострокову перспективу. Тут ключову роль відіграють системи підтримки прийняття рішень (СППР), що здійснюють аналіз технічного стану, прогнозують енергоспоживання та визначають оптимальні режими роботи. Інформаційні модулі інтегрують дані з сенсорів, навігаційних систем та енергетичних установок. Для оцінки ефективності застосовуються методи нечіткої логіки для багатокритеріальної оптимізації, моделі надійності (MTBF, λ) та марковські ланцюги для сценарного прогнозування;

Рівень 3 – операційний: увага фокусується на безпосередньому управлінні технічними підсистемами (енергетичними установками, корпусом і механізмами, навігаційним обладнанням). Функціональні процедури включають адаптивне керування швидкістю, маневреністю та енергоспоживанням залежно

від зовнішніх умов. Контроль здійснюється в реальному часі через моніторинг ключових параметрів – температури, вібрацій, витрат палива, позиціонування – що дозволяє оперативно реагувати на зміни та мінімізувати ризики.

У сценарії для автономного судна, що виконує місію в арктичних умовах, було змодельовано вплив локальної зміни одного з кліматичних підфакторів на інтегральний показник технічної експлуатації в арктичному регіоні. Початкове значення ефективності, що дорівнює 0,84, відображає збалансований стан усіх груп факторів за вихідних параметрів середовища. Кліматична група має відносно невелику вагу в структурі оцінки (0,16), проте навіть у її межах окремий підфактор «штормові умови» з питомою вагою 0,09 та значенням показника 0,85 вносить суттєвий вклад у загальний результат.

Встановлено що погіршення метеорологічних умов на маршруті переходу, яке знижує показник цього підфактору до 0,60, призводить до корекції інтегрального показника на -0,0036, тобто зменшує його до рівня 0,836. З формальної точки зору, абсолютне зниження виглядає незначним, однак в умовах високої автоматизації і роботи в складному льодово-штурмовому середовищі навіть таке відхилення може бути критичним тригером для системи підтримки прийняття рішень. Воно сигналізує про наближення до межових значень безпечної експлуатації та потребує адаптивного реагування, зокрема оптимізації маршруту або зміни режимів роботи енергетичних та навігаційних систем. Таким чином, результати прикладу підтверджують високу чутливість інтегральної оцінки до динаміки окремих зовнішніх факторів та обґрунтовують необхідність оперативного моніторингу і превентивних дій.

Запропонований у дослідженні системний підхід до оцінювання ефективності автономних морських транспортних засобів в умовах змінного середовища базується на комплексній класифікації факторів впливу а саме технічних, енергетичних, кліматичних, навігаційних, інформаційних та людських. Їх ієрархічна структуризація забезпечує можливість формалізованого аналізу, що є необхідною передумовою для інтеграції в адаптивні системи управління [85, 86].

Використання методу аналітичної ієрархічної обробки (AHP) дозволило визначити відносні ваги груп впливу, що надало змогу встановити пріоритет для управлінських дій. Аналіз показав, що найбільший внесок у загальну ефективність мають технічні та енергетичні фактори, тоді як кліматичні та навігаційні чинники виступають ключовими зовнішніми модераторами ризику.

Представлений інтегральний показник технічної експлуатації, який об’єднує різнорідні показники через систему ваг та нормалізовані значення, створює уніфіковану метрику для порівняння сценаріїв експлуатації і моніторингу динаміки стану систем АМТЗ. Процедура розрахунку такого показника може використовуватися як у режимі онлайн для оперативного прийняття рішень (перерозподіл енергоресурсів, корекція маршруту чи режиму руху, зміна політики обслуговування), так і автономно для стратегічного планування (формування графіків ТО, вибір резервів, оцінка ефективності виконання місії).

Поєднання детерміністичних моделей з елементами нечіткої логіки та стохастичного аналізу здатне підвищити стійкість оцінювання в умовах невизначеності, неповноти чи затримок даних. При цьому підхід забезпечує прозору інтерпретацію внеску кожної групи факторів, дозволяючи своєчасно виявляти «вузькі місця», від зниження ефективності вузлів та зміни балансу до погіршення навігаційної обстановки.

Водночас метод має низку обмежень, зокрема залежність від якості прийнятих даних, коректності нормалізації показників і стабільності вагових коефіцієнтів у часі, тому для тривалих місій необхідне періодичне оновлення ваг та порогів спрацювання, щоб зберігати точність оцінки ефективності.

Сучасний розвиток технічної експлуатації автономних транспортних засобів характеризується переходом від планово-попереджувального технічного обслуговування до концепцій Condition-Based Maintenance (CBM), Predictive Maintenance (PdM) та Reliability-Centered Maintenance (RCM), у яких рішення щодо експлуатації приймаються на основі безперервного моніторингу технічного стану, прогнозування деградаційних процесів та оцінювання

залишкового ресурсу. Запропонована в дисертації методологія відповідає зазначеним тенденціям, оскільки поєднує моніторинг, прогнозування технічного стану, цифровий двійник та адаптивне управління для забезпечення ефективної експлуатації автономних морських транспортних засобів.

1.4 Оцінка експлуатаційної ефективності морських автономних платформ в умовах змінних режимів функціонування

У контексті зростаючого ступеня автономності морських технічних систем, а також розширення їх функціонального спектра в умовах відкритого моря, значно зростають вимоги до ефективного управління експлуатаційними характеристиками. Морські автономні платформи (МАП) дедалі частіше залучаються до критичних місій таких як моніторинг кліматичних змін, гідрографічна розвідка, забезпечення безпеки морських операцій. Їх тривала робота в ізольованому режимі без участі оператора висуває нові вимоги до точного прогнозування ефективності з урахуванням багатофакторного впливу середовища [87].

Поняття «змінні режими експлуатації» охоплює широкий спектр динамічних параметрів, які можуть змінюватися як у просторі, так і в часі: гідрометеорологічні умови (хвилювання, вітер, температура), внутрішні технічні навантаження (енергоспоживання, частота запусків обладнання), а також конфігурація місій та завдань. Саме ці змінні фактори впливають на ефективність, ресурс та стабільність функціонування платформ. Ігнорування цих режимних впливів унеможливлює об’єктивне оцінювання експлуатаційної ефективності, знижуючи достовірність моделей планування та управління [88].

Ефективність функціонування морських автономних платформ у динамічних режимах визначається синергією чотирьох взаємозалежних контурів управління. Перший контур охоплює технічний стан та надійність підсистем, де впровадження ML-діагностики та роботизованих інспекцій забезпечує перехід до обслуговування за фактичним станом, мінімізуючи

ризики незапланованих відмов. Другий контур зосереджений на спостереженні та локалізації, що детермінують межі допустимого маневрування та прецизійність трекінгу AUV / USV у складних середовищах.

Третій сегмент визначає енергетичну автономію та декарбонізацію, від яких безпосередньо залежать часова тривалість місій, обсяг корисного навантаження та оптимізація паливної логістики. Завершальним є контур інтеграційної безпеки, що базується на методологіях STPA/ODD та використанні цифрових двійників; це дозволяє розширити операційні вікна, знизити аварійність при взаємодії з оточенням та забезпечити конструкційну стійкість до гідродинамічних впливів (рис. 1.4).

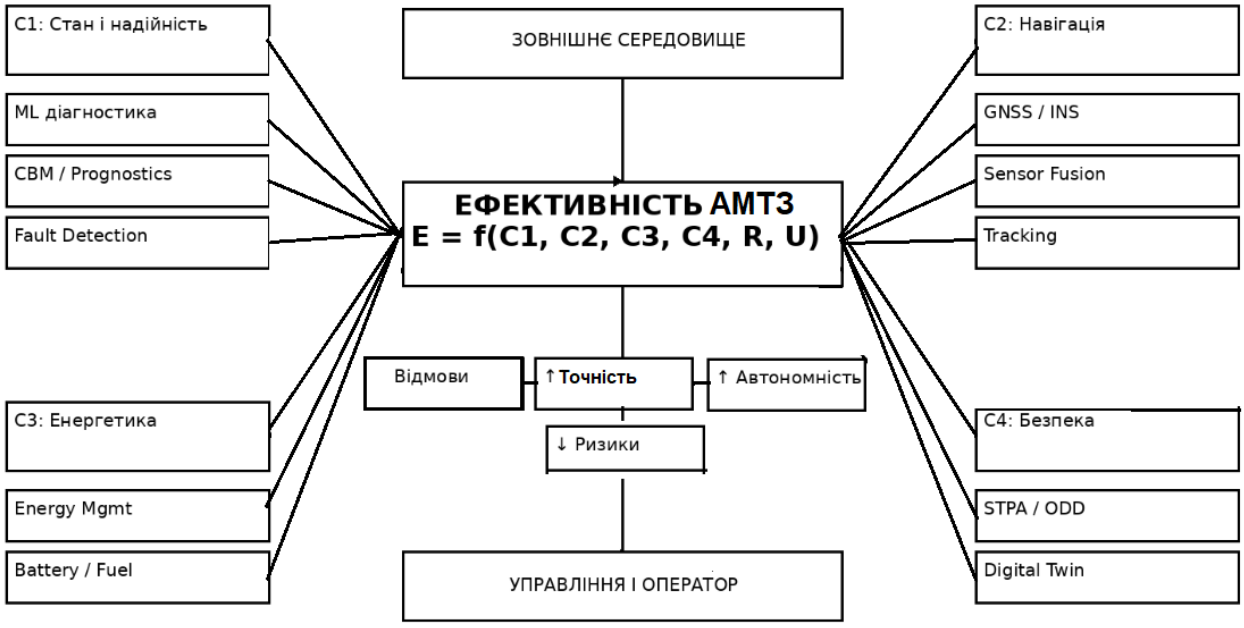


Рисунок 1.4–Структурна схема формування ефективності АМТЗ

Попри технологічний прогрес, автономні морські системи досі мають критичні обмеження: локальність навчальних даних ускладнює перенесення моделей між регіонами, глибинні моделі потребують зрозумілих процедур для практичного використання екіпажем і регуляторами, децентралізовані енергетичні системи вимагають захищених протоколів обміну, а стандарти зон дії (ODD) залишаються фрагментарними [89].

Для досягнення високої результативності автономних місій критично важливою є міжрівнева інтеграція, що базується на використанні динамічних датасетів реальних операцій та впровадженні наскрізних показників ефективності (KPI) для технічного стану, енергоспоживання й безпеки. Застосування цифрових двійників із замкненим контуром керування дозволяє сформувати адаптивну конфігурацію системи, яка забезпечує не лише технологічну стійкість платформ, а й їхню операційно-економічну стабільність у змінному середовищі без втрати цільової ефективності.

Недосконаліть існуючих моделей оцінювання ефективності зумовлена їх переважно статичним характером та орієнтацією на усереднені експлуатаційні умови, що в реальних обставинах динамічного морського середовища призводить до суттєвих похибок у прогнозуванні результативності автономних платформ. Зазначена проблема актуалізує необхідність розроблення принципово нової моделі, здатної враховувати сценарну змінність режимів функціонування та процеси технічної деградації елементів у межах єдиного інтегрального індексу. У зв’язку з цим, за мету дослідження визначено формування комплексної методології сценарного оцінювання експлуатаційної ефективності морських автономних платформ. Запропонована методологія базується на інтеграції технічних, зовнішніх та поведінкових чинників, що дозволяє не лише об’єктивно аналізувати поточний стан системи, а й створювати необхідне наукове підґрунтя для розроблення адаптивних стратегій експлуатації в умовах невизначеності [90, 91].

Будь-яка морська технічна система в контексті процесів автономізації в сучасному судноплавстві розглядається як базова архітектура, на яку поетапно інтегруються автономні функції, що дає змогу здійснити перехід від людино-центричної моделі експлуатації суден або до функціонально-орієнтованої архітектури, в якій кожен елемент системи перебирає на себе завдання, які раніше виконував екіпаж. Такий підхід забезпечує гнучкість модернізації:

замість повної перебудови конструкції судна застосовують функціональну адаптацію наявних транспортних засобів, що відкриває шлях до поетапного впровадження автономних режимів управління та експлуатації.

На рис. 1.5 представлено архітектурну модель еволюції морських технічних систем від людино-центричного управління до автономних рішень, де також узагальнено поетапну трансформацію архітектури морських технічних систем від традиційного людино-центричного управління до автономних, функціонально самостійних рішень.

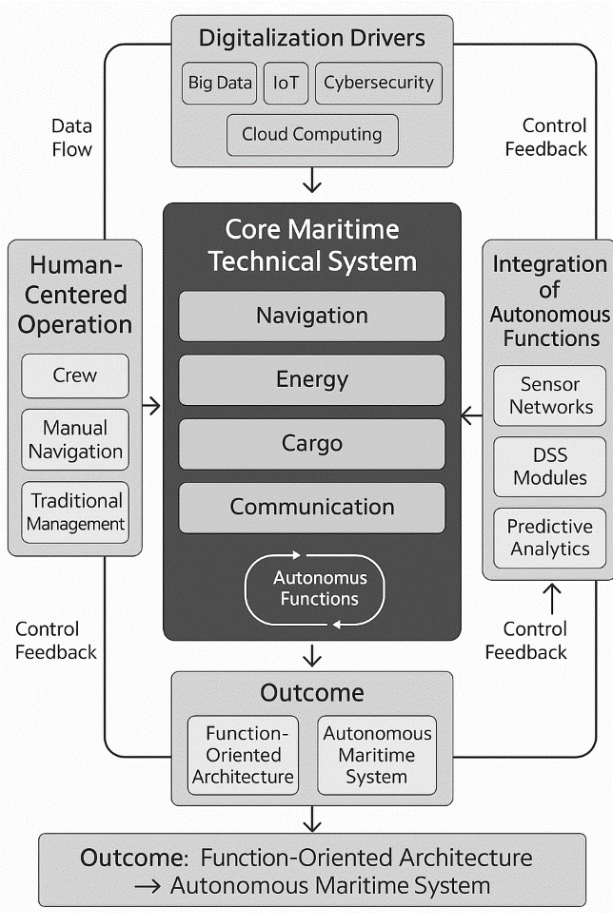


Рисунок 1.5 – Концептуальна архітектура еволюції морських технічних систем

Ліва частина схеми відображає традиційну експлуатацію: екіпаж, ручна навігація та класичне управління, являючи собою базовий рівень, де безпека та ефективність повністю залежать від людини. Центральний блок – Core Maritime

Technical System, що включає ключові підсистеми: навігаційну, енергетичну, вантажну та комунікаційну. У цьому ядрі відбувається інтеграція даних і реалізація функцій управління.

Верхній блок – фактори цифрової трансформації (Big Data, IoT, Cybersecurity (кібербезпека), Cloud Computing (хмарні обчислення), які формують основу для автоматизації й поступового переходу до автономності.

Права частина ілюструє модулі інтеграції автономних функцій: сенсорні мережі, DSS-модулі, предиктивна аналітика, які взаємодіють із ядром і забезпечують зворотні зв'язки (Control Feedback). В нижній частині очікуваний результат тобто перехід від функціонально-орієнтованої архітектури до Autonomous Maritime System, відображаючи поетапний перехід від класичного управління до повністю автономних морських технічних систем, із балансом між людським фактором, цифровими драйверами та автономними модулями.

Сучасна суднова технічна система розглядається як багаторівнева структура, що інтегрує матеріальні, організаційні та інформаційні ресурси у єдину логіку функціонування. Для коректного аналізу ефективності такої системи доцільно застосовувати системний підхід, який дозволяє простежити взаємозв'язок між вхідними ресурсами, ядром технічної системи, виконуваними процесами, отриманими результатами та широкими соціально-економічними ефектами. У цьому контексті наведена схема відображає концептуальну модель функціонування суднових технічних систем.

На схемі рис. 1.6 показано, як базові ресурси, а це і фінанси, нормативно-правова база, інфраструктура, персонал і технічні дані – забезпечують роботу головних технічних підсистем судна: навігаційної, енергетичної, вантажної та зв'язку. Такі підсистеми формують основні процеси: перевезення, автоматизацію, технічне обслуговування, управління ризиками. І як результат підвищується ефективність, зменшуються викиди, зростає обсяг перевезень, що створює позитивні ефекти на рівні сталого розвитку, міжнародної співпраці та соціальної відповідальності.

Запропонована архітектура функціонування автономних морських комплексів базується на ієрархічній моделі трансформації вхідних ресурсів у стратегічні системні ефекти. В основі моделі лежить ядро суднової технічної системи, що об’єднує навігаційну, енергетичну, вантажну та комунікаційну підсистеми у єдиний операційний контур.



Рисунок 1.6 – Операційно-системна модель функціонування морської технічної системи

Процесний рівень, який включає автоматизацію обчислень, управління ризиками та технічне обслуговування, забезпечує конвертацію ресурсного потенціалу в конкретні результати: зростання вантажообігу, підвищення операційної ефективності та мінімізацію екологічного впливу. Кінцевою метою такої структури є досягнення глобальних системних ефектів, що охоплюють соціальну відповідальність, екологічну сталість та інтеграцію автономних платформ у міжнародні логістичні мережі [92].

Схема рис. 1.7 відображає структуровану логіку оцінювання: класифікацію режимів (навантаження, середовище, цикли), існуючі методи дослідження (регресійний аналіз, імітаційне моделювання, нечітка логіка, моніторинг), а також ідентифікацію їхніх недоліків у динамічних умовах експлуатації.



Рисунок 1.7 – Огляд методів аналізу впливу експлуатаційних режимів на ефективність АМТЗ

Наступний блок демонструє побудову моделі зв’язку між змінними режимами (вхідні параметри) та ефективністю (вихідні показники), що дає змогу визначати найчутливіші до режимних коливань фактори.

Запропонована методологія ґрунтується на сценарному підході до моделювання ефективності морських автономних платформ у змінних режимах функціонування, яка передбачає багаторівневу структуру, що охоплює технічні, середовищні та поведінкові впливи, формалізовані через індекси деградації, енергетичної витрати та динамічної стійкості системи.

Базова логіка методики полягає в наступному:

– ідентифікація змінних режимів де розглядаються як зовнішні (хвилювання, температура, глибина занурення), так і внутрішні (режим споживання енергії, частота запусків систем) параметри, які варіативно впливають на ефективність функціонування платформи;

– сегментація експлуатаційного профілю, в цьому випадку загальний часовий горизонт місії поділяється на квазістаціонарні інтервали, кожен з яких характеризується відносною стабільністю умов, що дозволяє об'єктивно врахувати часову варіативність без втрати точності;

– розрахунок локального індексу ефективності, в якому для кожного інтервалу обчислюється локальний показник IEE_i, який відображає інтегральний вплив технічних характеристик, навантаження та зовнішнього середовища;

– агрегація у глобальний індекс, де застосовується вагова модель об'єднання IEE_i з урахуванням критичності інтервалів, що дозволяє отримати узагальнену метрику експлуатаційної ефективності за весь період.

Для оцінювання впливу нестабільності режимів генеруються типові сценарії (базовий, стресовий, адаптивний) із подальшим симуляційним аналізом у Matlab / Simulink. Це забезпечує можливість кількісного порівняння ефективності різних стратегій управління. За результатами симуляцій формується карта «режими-ефективність», яка дозволяє виявити зони стабільної роботи, граничні режими та сценарії з наявністю ризику.

Таким чином, методологія поєднує інженерну точність симуляцій із системним підходом до багатофакторного аналізу, закладаючи основу для впровадження адаптивного управління та DSS (Decision Support Systems) у експлуатацію МАП.

Математична модель оцінювання експлуатаційної ефективності морських автономних платформ

У змінних режимах функціонування традиційні показники (ККД, надійність, споживання енергії) втрачають стабільність, а тому потребують нової структури

агрегації. Оцінювання експлуатаційної ефективності морської автономної платформи потребує багатовимірного підходу, що враховує не лише поточну ефективність, а й стабільність функціонування, режимні навантаження та залишковий ресурс. Запропонована модель формує інтегральний індекс експлуатаційної ефективності (IEE) на основі поетапної математичної оцінки.

Першим кроком є визначення енергетичної ефективності як відношення корисної потужності до загального споживання в момент часу t:

$$\eta_e(t) = \frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)}, \tag{1.6}$$

де $P_{out}(t)$ – корисна потужність для виконання завдання; $P_{in}(t)$ – загальна спожита потужність усіма системами.

Цей параметр виступає ядром усієї моделі, однак він не відображає накопичення витрат ресурсу або впливу змінних умов, але для того щоб врахувати залишковий енергетичний потенціал платформи, вводимо коефіцієнт енергетичної витрати:

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{E(t)}{E_{\max}}, \tag{1.7}$$

де $E(t)$ – накопичене споживання енергії; $E_{\max}$ – початково доступний енергетичний ресурс.

Таким чином, інтегруємо в модель аспект виснаження ресурсу, який суттєво впливає на експлуатаційну ефективність у довгостроковій перспективі.

Оскільки морське середовище змінне, наступним елементом моделі є індекс стійкості до режимної нестабільності, що оцінює варіативність середовищних параметрів:

$$R(t) = 1 - \frac{\sigma_\xi(t)}{\xi_{ref}}, \tag{1.8}$$

де $\sigma_\xi(t)$ – стандартне відхилення ключового режимного параметра (наприклад, температури або хвилювання); ξ_{ref} – референтна амплітуда коливань.

Представлений індекс дозволяє оцінити, наскільки система здатна зберігати функціональну цілісність за умов нестабільного оточення.

Далі всі попередні компоненти поєднуються у зважену інтегральну формулу, яка дозволяє оцінити миттєву експлуатаційну ефективність платформи:

$$IEE(t) = \frac{W_\eta \cdot \eta_e(t) + W_\varepsilon \cdot \varepsilon(t) + W_r \cdot R(t)}{W_\eta + W_\varepsilon + W_r}, \tag{1.9}$$

де W_η, W_ε, W_r – вагові коефіцієнти кожного блоку.

Цей індекс є динамічним і адаптується до поточних змін стану платформи та середовища. З урахуванням стохастичного характеру морського середовища доцільним є введення коригувального коефіцієнта невизначеності, який дозволяє адаптивно змінювати інтегральну оцінку залежно від рівня ризику та нестабільності режиму функціонування: $IEE^* = IEE \cdot (1 - U_r)$ де: U_r – нормалізований коефіцієнт невизначеності; IEE^* – скоригований індекс ефективності.

Для розділення місії на логічні сегменти (режимні інтервали) вводимо інтегральну оцінку ефективності на кожному відрізку часу:

$$IEE_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} IEE(t)dt. \tag{1.10}$$

Таким чином формується набір локальних індексів, релевантних до умов кожного інтервалу. Інтегральна ефективність місії розраховується як зважена сума індексів по всіх інтервалах:

$$IEE_{global} = \sum_{i=1}^{N} \omega_i \cdot IEE_i, \tag{1.11}$$

де ω_i – вага інтервалу (наприклад, за критичністю або тривалістю).

Це дозволяє побудувати цілісну оцінку експлуатаційної ефективності протягом усієї тривалості місії, враховуючи критичність кожного відрізка.

Для порівняння ефективності різних підходів до керування (адаптивного проти фіксованого) вводимо показник виграшу ефективності:

$$\Delta IEE = IEE_{adaptive} - IEE_{fixed}\,. \qquad (1.12)$$

Як підсумок, наведений вираз дає змогу кількісно обґрунтувати доцільність використання адаптивних стратегій в умовах нестабільного середовища.

У рамках оцінки експлуатаційної ефективності морських автономних платформ було застосовано сценарне моделювання як інструмент для тестування поведінки систем у змінних умовах середовища. Цей підхід дозволяє врахувати не лише статичні параметри, а й динаміку зовнішніх впливів, варіативність навантажень та адаптивність керування [93].

Було визначено три ключові сценарії функціонування:

– базовий сценарій, який відображає сприятливі експлуатаційні умови: помірне навантаження, стабільна морська обстановка, оптимізований маршрут із низьким енергоспоживанням;

– стресовий сценарій, в якому змодельовано умови підвищеного ризику: хвильова активність на рівні 4–5 балів, вібраційне навантаження, екстремальні температури та часте перемикання між системами, що ускладнює забезпечення стабільної роботи;

– адаптивний сценарій, який повторює умови стресового сценарію, але з увімкненими алгоритмами адаптивного керування, що автоматично змінюють стратегії живлення й розподілу навантажень, щоб знизити втрати та підвищити стійкість.

Таке моделювання дозволяє зіставити стандартні та адаптивні підходи до управління, виявити резерви ефективності та сформувати обґрунтовані вимоги до проєктування майбутніх автономних рішень у морській галузі.

Запропоновані математичні моделі забезпечують комплексне оцінювання ефективності технічної експлуатації автономного морського транспортного засобу з урахуванням зміни технічного стану, ресурсних обмежень, рівня ризику, прогнозованої деградації, енергетичних характеристик та умов виконання автономної місії.

В табл. 1.5 представлено п’ять груп впливових параметрів, які формують сценарії експлуатації морської автономної платформи. Середовище описується амплітудою хвиль (ξ_1), температура (ξ_2) визначає вплив на ККД, вібрації (ξ_3) – динамічне навантаження. Інтегральна змінна $E(t)$ відображає енергоспоживання, та зміну поведінкових режимів. Представлені змінні є ключовими для оцінки варіативності ефективності в умовах змінного середовища.

Таблиця 1.5 – Основні змінні моделі сценарного аналізу експлуатаційної ефективності

Категорія	Змінна	Позначення	Опис
Середовище	Амплітуда хвиль	ξ_1	0,5–3,5 м
Температура	ξ_2	- 5…+ 45°C	Впливає на КПД батарей
Вібрації	ξ_3	RMS, [m/s²]	Ускладнює роботу вузлів
Навантаження	Споживання енергії	$E(t)$	Дж, інтегрується в моделі
Поведінка	Частота запуску систем	$f_{on/off}$	циклів / год

Симуляційне моделювання реалізовано у форматі дискретно-континуального обчислювального процесу, що дозволяє поєднати точність математичних моделей із гнучкістю сценарного аналізу. Такий підхід забезпечує деталізацію змін динамічних параметрів системи в часі, а також дозволяє інтегрувати зовнішні впливи у часовому розрізі.

Тривалість симуляцій становила 72 години тобто типовий цикл автономної місії морської платформи середнього класу. Вибраний часовий крок 10 хвилин відображає практичну частоту збору телеметричних даних та змін режимів керування.

Запропоновані моделі реалізовано в середовищі MATLAB Simulink, що дало змогу побудувати інтерактивні блок-схеми роботи системи з підключенням вхідних сигналів від змінних середовища (температури, хвилювання, вібрацій) та внутрішніх параметрів (навантаження, енергоспоживання). Результати експериментів зберігалися в цифровому форматі для подальшої обробки у середовищі Python з використанням бібліотек NumPy, Pandas і Matplotlib, і також для чисельного аналізу, побудови графіків та порівняльної візуалізації сценаріїв.

На кожному часовому кроці обчислювався поточний індекс ефективності $IEE(t)$, значення якого інтегрувалися для визначення IEE_i на кожному інтервалі, що дозволило побудувати повну картину змін ефективності роботи платформи за всіма сценаріями та провести кількісне порівняння між ними [94].

У цьому розділі наведено результати симуляцій, отримані шляхом реалізації сценарного моделювання для трьох типових режимів експлуатації автономної морської платформи. Візуалізації розкривають динаміку змін індексу ефективності залежно від часу, зовнішніх факторів і типу стратегії управління.

На графіку (рис. 1.8) представлено зміну інтегрального індексу ефективності $IEE(t)$ упродовж 72-годинного циклу. У базовому сценарії інтегральна ефективність системи зберігається на стабільному рівні близько 0,82, що свідчить про відсутність критичних впливів з боку середовища та ступеню навантажень. А стресовий сценарій демонструє поступове зниження ефективності до рівня 0,6 з різким спадом після 42-ї години експлуатації, що пов’язано з перевищенням гранично допустимих параметрів вібрацій і температурного навантаження.

В адаптивному сценарії ефективність залишається вище 0,75 протягом усього періоду, незважаючи на вплив несприятливих зовнішніх умов, що зумовлено дією регуляторів навантаження та коригуванням режимів роботи.

На рис. 1.9 подано графік залежності ефективності від рівня хвилювання (амплітуди хвиль).

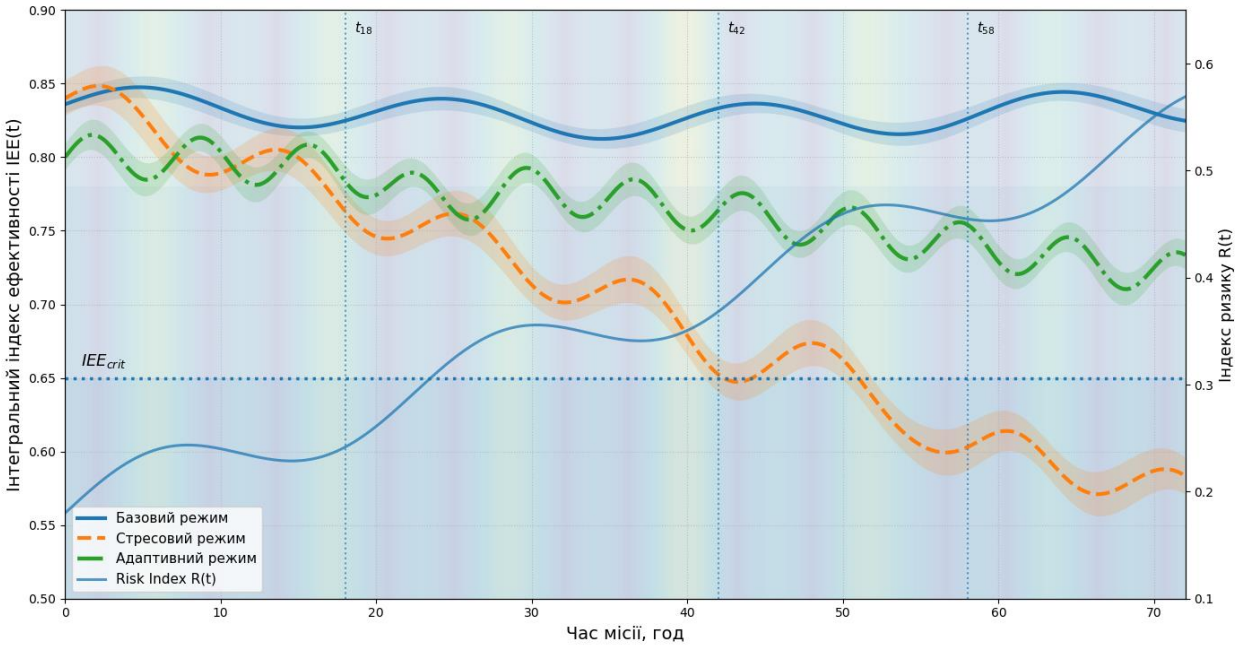


Рисунок 1.8 – Динаміка *IEE*(*t*) протягом місії

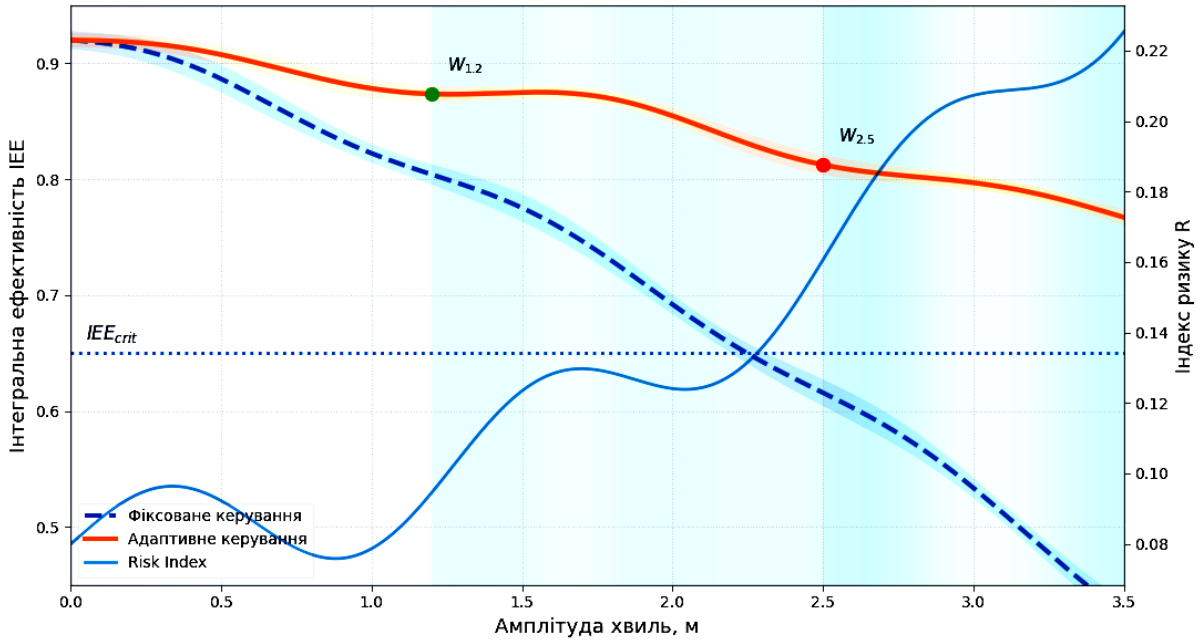


Рисунок 1.9 – Вплив амплітуди хвиль на інтегральну експлуатаційну ефективність (*IEE*)

Аналіз залежності ефективності морської автономної платформи від амплітуди хвиль показав наявність трьох характерних зон функціонування. У синьому діапазоні (0–1,2 м) інтегральна ефективність зберігається на стабільному

рівні, що свідчить про відсутність суттєних зовнішніх збурень і забезпечення оптимальних умов експлуатації.

У межах жовтої зони (1,2–2,5 м) відзначається помірне зниження ефективності; однак застосування адаптивного керування дає змогу компенсувати до 40 % втрат, зменшуючи негативний вплив хвилювання. У червоній зоні (понад 2,5 м) зафіксовано різке зниження ефективності в умовах фіксованих стратегій, тоді як адаптивні підходи забезпечують збереження працездатності платформи вище критичного рівня.

Графік на рис. 1.10 демонструє залежність ефекту (виграшу) від використання адаптивної стратегії управління порівняно з фіксованою у різних температурних умовах.

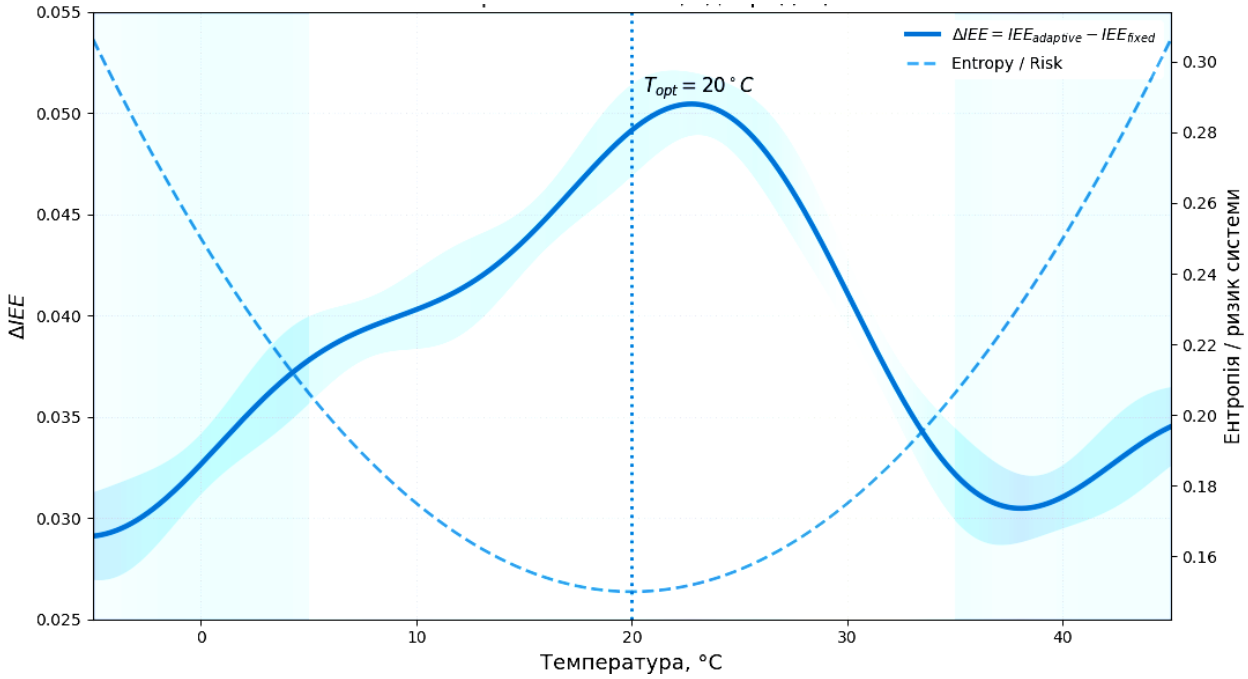


Рисунок 1.10 – Вплив температурного режиму на корисність застосування адаптивного управління

Найбільша різниця між інтегральною експлуатаційною ефективністю при адаптивному ($IEE_{adaptive}$) та фіксованому (IEE_{fixed}) управлінні спостерігається за межами температурного діапазону комфорту при температурах нижче - 5°C або

вище + 35°C. Саме в цих екстремальних умовах адаптивні алгоритми демонструють здатність підтримувати стабільність функціонування технічної системи, тоді як фіксовані режими втрачають ефективність.

У діапазоні помірної температури (близько + 20°C) різниця між двома підходами є мінімальною, що свідчить про допустимість застосування спрощених стратегій в умовах стабільного термоклімату.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що температурна нестабільність виступає одним із ключових тригерів деградації ефективності, яку можливо нейтралізувати шляхом адаптації режимів управління.

1.5 Методи врахування невизначеності в прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ

Зростання автономності морських транспортних засобів призводить до підвищеної залежності експлуатаційної ефективності від факторів, що мають випадковий або неповністю визначений характер. В умовах відкритого морського середовища, де температура, вібрації, навантаження, технічний стан вузлів та поведінкові моделі зміни режимів не можуть бути точно передбачені, питання врахування невизначеності у процесах прогнозування набуває критичного значення. Класичні методи оцінювання ефективності, зокрема ті, що базуються на детермінованих параметрах, демонструють високу чутливість до відхилень у вхідних змінних, що обмежує їхню надійність при довготривалому плануванні автономної місії. У результаті виникає потреба в розробці та впровадженні математичних моделей, здатних формалізувати невизначеність, зокрема за допомогою стохастичних, баєсівських та сценарних підходів тому мета полягає в обґрунтуванні наукового підходу до прогнозування експлуатаційної ефективності морських автономних платформ у умовах багатофакторної невизначеності.

Основна увага зосереджена на моделюванні впливів стохастичних флуктуацій морського середовища, процесів деградації у технічних системах, а

також похибок алгоритмічної обробки даних. Для реалізації поставленої мети розроблено інтегровану методологію, що поєднує інструменти стохастичного аналізу, баєсівського оновлення апостеріорних оцінок та концепцію передачі стійкості між рівнями керування (resilience transfer).

Проблематика невизначеності у прогнозуванні ефективності

Більшість класичних моделей оцінювання ефективності функціонування МАП побудовані на детермінованих припущеннях, що передбачають сталість ключових параметрів (зокрема швидкості руху, витрати енергії, температури довкілля). Однак у реальних умовах морського середовища такі параметри зазнають неперервних змін, що унеможливлює адекватне використання фіксованих моделей. Таким чином, виникає потреба у застосуванні нових підходів до прогнозування ефективності, які враховують стохастичну природу середовища експлуатації, поступову деградацію технічних елементів, накопичення похибок сенсорних вимірювань та ймовірнісні збої у функціонуванні програмно-алгоритмічних компонентів [95].

З метою систематизації основних детермінант, що визначають ефективність функціонування морських автономних платформ, доцільним є побудова узагальненої структурної схеми впливів (рис. 1.11) для виокремлення ключової групи чинників, як зовнішнього, так і внутрішнього характеру, які формують експлуатаційний профіль платформи в умовах динамічного морського середовища.

До зовнішніх впливів належать фізико-географічні та гідрометеорологічні параметри середовища, тоді як внутрішні включають технічний стан бортових систем, точність даних які отримуються за допомогою сенсорів, характеристики алгоритмів керування та обмеження ресурсів.

Загальна характеристика невизначеності

У морських автономних системах невизначеність проявляється як різниця між очікуваною та реальною поведінкою системи, яка вона виникає через те, що

вхідні дані, умови середовища або технічні параметри не можуть бути виміряні або передбачені точно. Умовно джерела невизначеності можна поділити на три групи (табл. 1.6).



Рисунок 1.11 – Структура факторів впливу на експлуатаційну ефективність МАП

Таблиця 1.6 – Класифікація джерел невизначеності

№	Джерело невизначеності	Приклади проявів	Тип впливу
1	Природне середовище	коливання температури, течії, вітер, хвилі	стохастичний
2	Технічна система	деградація матеріалів, зношення датчиків, відмови компонентів	структурний
3	Алгоритмічні моделі	похибки прогнозів, адаптивне навчання, невірні параметри	модельний

Морське середовище характеризується високим рівнем ентропії та нелінійною динамікою, де ключові параметри можуть змінюватися хаотично як у просторі, так і в часі. До основних природних джерел невизначеності належать гідродинамічні чинники (наприклад, варіації течій, щільності та гідростатичного тиску), метеорологічні збурення (вітер, хвильові процеси, температурні та барометричні флуктуації), а також біологічні впливи, зокрема,

обростання корпусу судна або зміна його акустичних характеристик, і такі фактори створюють стохастичні збурення, що впливають на стабільність траєкторії, керованість і енергоефективність автономної платформи [96].

Експлуатаційні обмеження технічних компонентів МАП зумовлюють поступове зниження точності та надійності систем, що стосується, зокрема, температурної нестабільності в роботі електроніки, деградації у вимірі точності сенсорів тапоступовому зношенні механічних вузлів. Такий прихований знос формує кумулятивну невизначеність, яка проявляється у вигляді латентних відхилень поведінки системи від номінальних характеристик.

Додаткову складність становлять обмеження математичних моделей і програмних алгоритмів, які застосовуються для навігації, траєкторного планування та обробки даних. Спрощені або жорстко структуровані моделі руху, хибні оцінки ризиків, а також неточна обробка інформації від сенсорів можуть генерувати систематичні похибки, які накопичуються протягом періоду автономного функціонування.

Враховуючи вищезазначене, усі джерела невизначеності в роботі морських автономних систем доцільно класифікувати на три ключові групи, де комплексна взаємодія таких факторів формує багаторівневу стохастичну структуру відхилень, яка вимагає системного підходу до оцінювання надійності та ефективності морських автономних платформ (рис. 1.12):

– природні (гідрометео- та біофактори);

– внутрішньотехнічні (знос, деградація компонентів);

– алгоритмічні (модельні обмеження та обчислювальні похибки).

Методи прогнозування експлуатаційної ефективності з урахуванням невизначеності

Загальна концепція прогнозування полягає в тому що прогноз експлуатаційної ефективності морських автономних платформ передбачає оцінку того, як змінюватиметься стан системи у часі під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів.

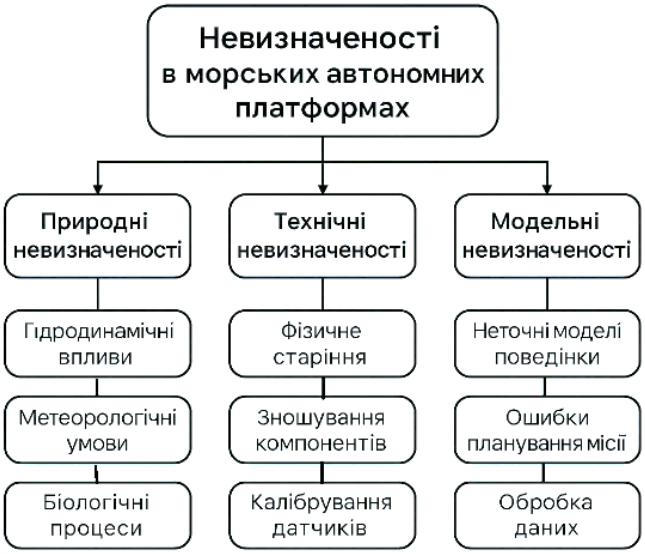


Рисунок 1.12 – Класифікаційна схема джерел невизначеності у МАП

При цьому ключовим завданням є моделювання невизначеностей у параметрах середовища, технічних вузлів і алгоритмів керування.

Формально це можна подати у вигляді стохастичного рівняння:

$$X(t+1) = f(X(t), U(t), W(t)), \qquad (1.12)$$

де $X(t)$ – вектор стану системи у момент часу t, $U(t)$ – вхідні дії керування, $W(t)$ – випадкові збурення (невизначеність середовища), f – нелінійна функція, що описує динаміку системи.

Традиційні підходи до оцінювання ефективності морських автономних платформ здебільшого базуються на детермінованих моделях, які оперують фіксованими параметрами навколишнього середовища та технічного стану систем. Такі моделі розраховані на передбачувані умови експлуатації та не враховують стохастичну природу морського середовища, і серед ключових обмежень детермінованих методів:

– відсутність урахування змін гідрофізичних параметрів середовища (течії, температура, хвилювання);

– ігнорування поступової технічної деградації системних компонентів;

– відсутність імовірнісної оцінки відхилень та ризиків при довготривалих автономних місіях.

У результаті, при експлуатації МАП у режимі тривалої автономії (понад 30 діб), такі підходи демонструють низьку прогностичну стабільність, що унеможливлює достовірне оцінювання ресурсу, навігаційної ефективності та ризику збою.

Стохастичний підхід розглядає процес функціонування як послідовність випадкових подій із певними розподілами ймовірностей і основними інструментами тут виступають марковські процеси, яки описують імовірнісний перехід системи між станами, моделі Монте-Карло, тобто симуляція великої кількості випадкових сценаріїв для оцінки середньої ефективності ну і стохастичні диференційні рівняння (SDE), які формалізують динаміку систем із шумом та випадковими параметрами.

Як приклад можна привести рівняння IoT для ефективності платформи може мати вигляд:

$$dI_E(t) = a(I_E, t)dt + b(I_E, t)dW_t, \qquad (1.13)$$

де a – тренд деградації, а b – амплітуда стохастичних коливань (впливу середовища).

На практиці така модель реалізується через багатошарову структуру взаємодії сенсорів, фільтрів та адаптивних підсистем (рис. 1.13).

Дана модель демонструє ієрархічну структуру системи, де кожен шар виконує певну функцію а саме від збору вхідних сигналів до узагальнення ефективності. Стохастичний потік $E(t)$ проходить крізь послідовність періодичних шарів, де відбувається стохастичне згладжування, корекція шумів та компенсація зовнішніх впливів, і завдяки цьому формується розподіл ефективності системи у часі, що дозволяє передбачати її деградацію навіть у випадкових умовах.

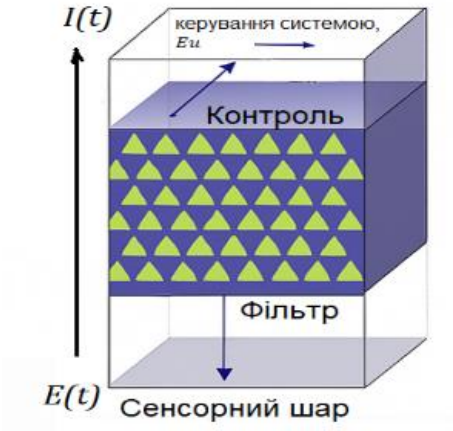


Рисунок 1.13 – Багатошарова модель морської адаптивної платформи

Схема алгоритму прогнозування ефективності з урахуванням невизначеності

Нижче наведено наукову блок-схему алгоритму, який поєднує стохастичний та баєсівський підходи для прогнозування ефективності функціонування морської платформи за умов інформаційної та динамічної невизначеності, що дозволяє інтегрувати дані сенсорів у процес адаптивного управління, забезпечуючи більш точне оновлення ймовірнісних оцінок станів системи.

Баєсівський підхід дозволяє оновлювати прогноз у реальному часі на основі нових спостережень, і його сила проявляється у тому, що він поєднує апріорні знання (попередні оцінки) із апостеріорними даними (нові вимірювання).

Основне рівняння Баєса:

$$P(\theta \mid D) = \frac{P(D \mid \theta) \cdot P(\theta)}{P(D)}, \qquad (1.14)$$

де θ – параметри моделі ефективності, D – отримані дані, $P(\theta \mid D)$ – оновлена ймовірність стану системи.

Слід зазначити що даний підхід особливо важливий для автономних суден, які коригують свої прогнози на основі сенсорних даних у режимі реальногу часу. Також баєсівські моделі застосовуються для фільтрації

невизначеностей у даних сенсорів і прийняття рішень на основі динамічного оновлення інформації.

На рис. 1.14 представлено структурну модель багаторівневого керування адаптивною морською платформою. У нижніх шарах (Processing, Interfaces) відбувається первинна обробка сигналів від сенсорів та інтеграція даних. Середній рівень (Filter, Adaptation) відповідає за корекцію похибок, фільтрацію й самооновлення параметрів [97].

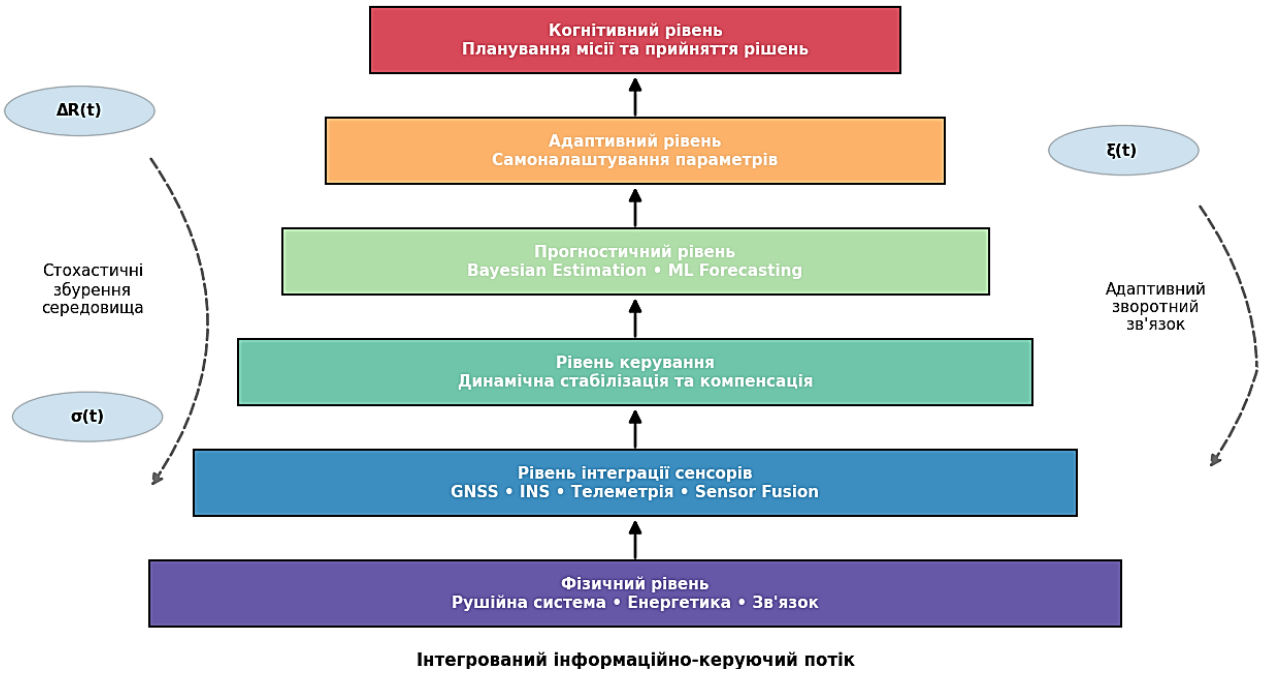


Рисунок 1.14 – Багаторівнева інтелектуальна структура адаптивного керування МАП в умовах невизначеності

Верхній рівень (Hierarchical Control) виконує функції прийняття рішень та управління стратегією дій системи. Зона Transition позначає перехід між фізичною й аналітичною частинами системи, забезпечуючи узгодженість між виміряними і прогнозованими параметрами.

У структурній моделі керування морською автономною платформою виділяють три взаємозв’язані рівні: базовий рівень сенсорного процесінгу та інтерфейсів, що забезпечує первинне зчитування та передобробку даних; рівень

фільтрації й адаптації, де виконується аналітична обробка, виявлення відхилень і локальна настройка алгоритмів; а також ієрархічний рівень стратегічного контролю, який відповідає за прийняття рішень з урахуванням ризику, сценарних варіантів і цільових показників ефективності.

Така трирівнева архітектура реалізує адаптивну систему, де вищі рівні здатні коригувати роботу нижчих рівнів залежно від змін середовища або появи нових джерел невизначеності (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Внутрішня структура шарів

Рівень	Назва шару	Основна функція	Математичне трактування / процес
1	Processing (Процесінг)	Первинне опрацювання сирих сигналів сенсорів, нормалізація, видалення шумів	$y_1(t) = f_1\big(x(t)\big)$ – фільтрація виміряного сигналу
2	Interfaces (Інтерфейси)	Координація між підсистемами; об’єднання різних джерел даних	$y_2(t) = f_2\big(y_1(t), u(t)\big)$ – інтеграція інформаційних каналів
3	Filter (Фільтр)	Динамічна компенсація шумів та аномалій, згладжування параметрів системи	$y_3(t) = H(s)\,y_2(t)$ – передавальна функція фільтрації
4	Adaptation (Адаптація)	Налаштування параметрів на основі похибок попередніх шарів; реалізація механізму навчання	$\Delta w = \eta \nabla E$ – градієнтне оновлення параметрів
5	Hierarchical Control (Ієрархічне керування)	Прийняття рішень, розподіл пріоритетів, управління станами платформи	$u(t) = K\big(y_4(t), r(t)\big)$ – функція керування, залежна від цілі та поточного стану

Додатково метод Монте-Карло, як імітаційна модель, яка створює тисячі випадкових сценаріїв роботи системи з різними наборами параметрів, в результаті чого формується ймовірнісний розподіл ефективності $I_{EE}(t)$, а не лише її середнє значення.

Для забезпечення адекватного вибору математичного апарату під час оцінювання ефективності суднових систем в умовах невизначеності було проведено порівняльний аналіз найпоширеніших методів прогнозування.

У табл. 1.8 наведено ключові характеристики кожного підходу, включно з перевагами, недоліками та типом невизначеності, яку вони здатні враховувати.

Таблиця 1.8 – Порівняльна таблиця методів прогнозування

Метод	Переваги	Недоліки	Тип невизначеності
Детермінований	Простота, швидкість	Нестійкість до флуктуацій	Параметрична
Стохастичний	Враховує випадкові зміни	Вимагає статистичних даних	Стохастична
Баєсівський	Самооновлення в реальному часі	Висока обчислювальна складність	Інформаційна
Монте-Карло	Дає розподіл результатів	Високе обчислювальне навантаження	Комплексна

Представлений аналіз свідчить про те, що кожен із розглянутих методів має обмеження щодо типу невизначеності та умов застосування. Так, детермінований підхід є доцільним на етапі попередньої оцінки або калібрування моделі, тоді як стохастичні методи ефективні при наявності достатнього обсягу експериментальних даних.

Баєсівські алгоритми забезпечують адаптивне оновлення оцінок у реальному часі, що особливо корисно для систем з активним зворотним зв’язком, тоді як метод Монте-Карло доцільно застосовувати для глибокого аналізу ризиків у складних, нелінійних сценаріях.

На рис. 1.15 наведено блок-схему алгоритму, який поєднує стохастичний та баєсівський підходи в системі управління морською платформою.

Алгоритм починається з ініціалізації моделі платформи, де враховуються дані сенсорів і параметри керування. На основі цих вхідних даних здійснюється оцінка ймовірностей поточних станів системи, після чого відбувається оновлення апостеріорного розподілу відповідно до баєсівської логіки.

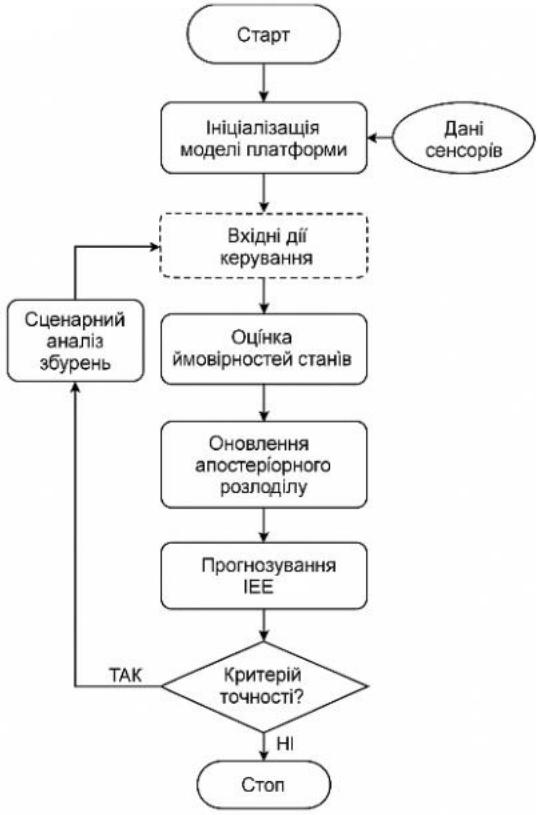


Рисунок 1.15 – Алгоритм прогнозування ефективності функціонування МАП з урахуванням невизначеності

Подальше прогнозування інтегрального енергетичного ефекту (*IEE*) дозволяє оцінити динаміку ефективності в умовах стохастичних збурень.

Якщо критерій точності прогнозу задовольняє задані межі, алгоритм завершує роботу; у протилежному випадку проводиться повторний сценарний аналіз з урахуванням виявлених відхилень, забезпечуючи структурно ітеративне уточнення прогнозів та підвищуючи надійність управлінських рішень у складних умовах.

На основі проведеного аналізу існуючих підходів, факторів невизначеності та особливостей функціонування автономних морських систем сформовано узагальнену концептуальну структуру адаптивного місійно-орієнтованого менеджменту. Дана структура забезпечує безперервну інтеграцію методів стохастичного моделювання, баєсівського оцінювання та адаптивного керування з механізмами ризик-орієнтованої корекції. Важливою складовою

концепції є безперервне оцінювання інтегральної ефективності, що базується на розгалужених механізмах інформаційного зворотного зв’язку (рис. 1.16).

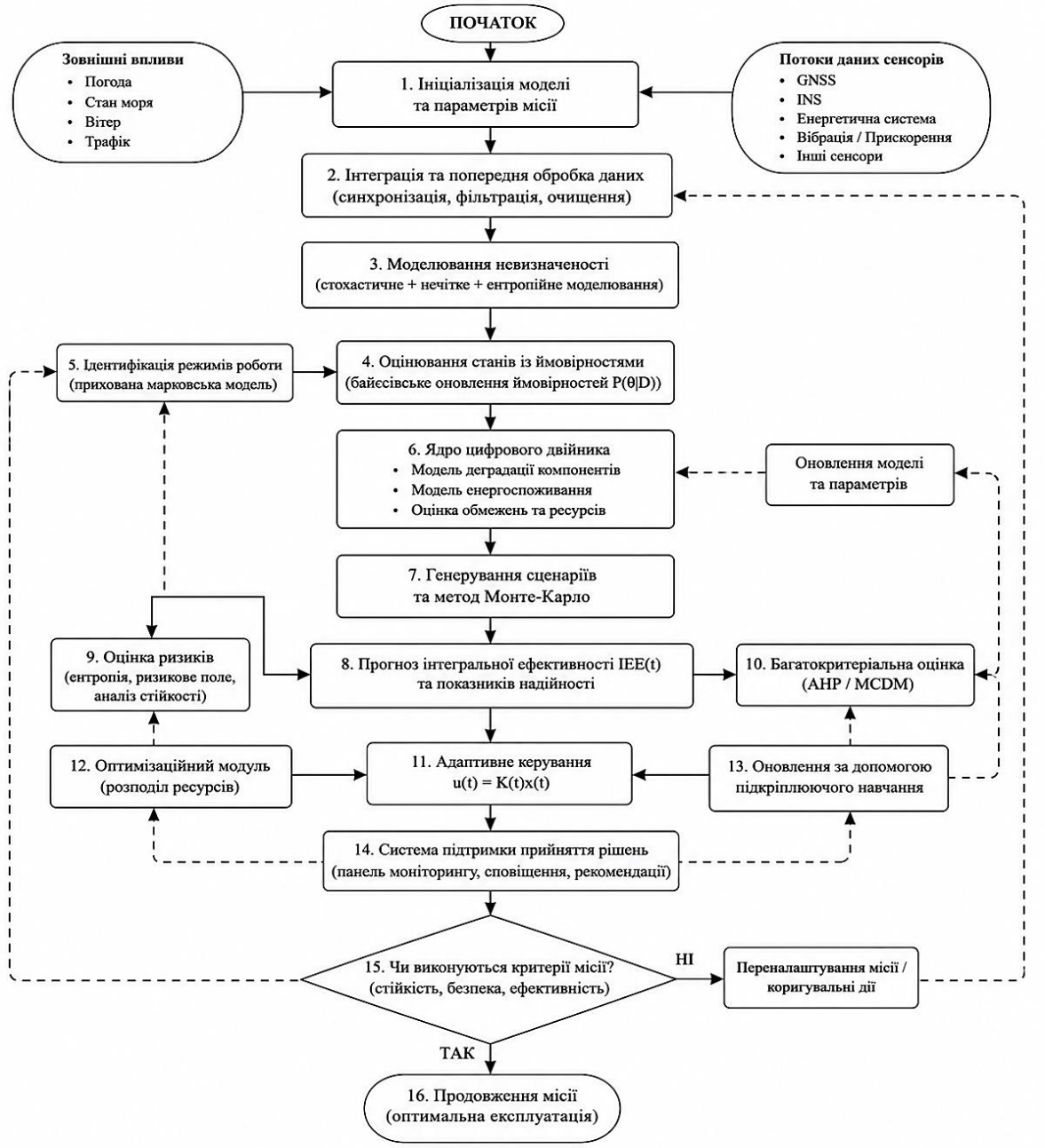


Рисунок 1.16 – Концептуальна структура адаптивного управління ефективністю АМТЗ в умовах невизначеності

Запропонована архітектура повною мірою відображає внутрішню логіку функціонування інтегрованої системи управління ефективністю АМТЗ. Вона дозволяє системі не лише реагувати на поточні зміни динамічного середовища,

а й предиктивно адаптуватися до багатофакторної невизначеності, підтримуючи цільову результативність місії на кожному ієрархічному рівні управління [98].

На рис. 1.17 показано ієрархічну модель передачі стійкості між рівнями адаптивної морської платформи. Нижні рівні (сенсорний, технічний) відповідають за фізичну стабільність, середні – за алгоритмічну адаптацію, верхні – за стратегічне керування.

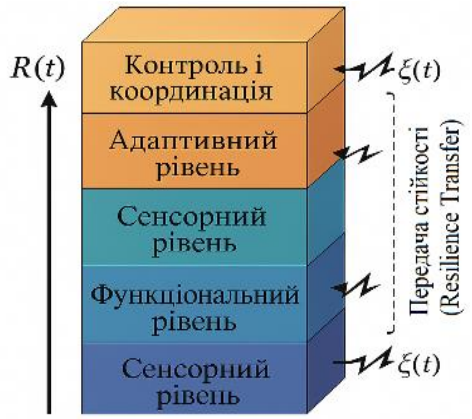


Рисунок 1.17 – Багатошарова модель передачі стійкості (resilience transfer) у системі прогнозування ефективності роботи МАП

Потік $R(t)$ відображає передачу функціональної стійкості, тоді як $\xi(t)$ представляє зовнішні збурення, забезпечуючи здатність системи до автономного відновлення ефективності після збурень середовища.

У запропонованій моделі стійкість системи реалізується як багаторівнева властивість, що передається між функціональними шарами: базові рівні відповідають за фізичну стабільність (роботу сенсорних модулів і механічних компонентів), проміжні забезпечують адаптацію алгоритмів керування до змінних умов, тоді як верхні реалізують стратегічне прийняття рішень і координацію ресурсів. Така ієрархічна структура дозволяє системі зберігати цільову ефективність навіть за умов збурень, здійснюючи автономну перебудову функціональних пріоритетів і перерозподіл ресурсів відповідно до поточного рівня ризику.

Таким чином комбінація стохастичного та баєсівського підходів у багатошаровій архітектурі формує інтелектуальну систему адаптивного прогнозування, де невизначеність не усувається повністю, а керовано мінімізується, що підвищує достовірність оцінки експлуатаційної ефективності навіть у змінних умовах середовища.

Представлено комплексний підхід до врахування невизначеності під час прогнозування експлуатаційної ефективності морських автономних платформ. На основі аналізу стохастичних, баєсівських та сценарних методів запропоновано багаторівневу методологію прогнозування, що забезпечує підвищену достовірність оцінки ефективності в умовах динамічного морського середовища.

Наукові результати проведеного дослідження базуються на розробці концептуальної багатошарової моделі адаптивної морської платформи, що забезпечує комплексний опис взаємодії сенсорного, фільтраційного та контрольного рівнів з обов’язковим урахуванням стохастичних впливів зовнішнього середовища. На основі цієї концепції побудовано структурну модель багаторівневого керування, яка інтегрує процеси обробки інформації, механізми адаптації та ієрархічний контроль, створюючи умови для самооновлення параметрів системи в режимі реального часу. Важливе місце в роботі посідає запропонована модель передачі стійкості між рівнями системи (resilience transfer), що дозволяє формалізувати процеси підтримання функціональної працездатності апарата в умовах інтенсивних зовнішніх збурень та природної деградації його окремих елементів.

Окрім того, у межах дослідження було проведено детальний аналіз взаємозв’язку між різними типами невизначеності – природною, технічною та алгоритмічною, що дозволило встановити характер їхнього кумулятивного впливу на динаміку індексу експлуатаційної ефективності $IEE(t)$. Підсумком даного етапу роботи стало наукове обґрунтування доцільності впровадження баєсівських механізмів самооновлення, які забезпечують високу точність

прогнозування ефективності функціонування автономних морських систем під час виконання довготривалих місій, створюючи надійне підґрунтя для прийняття адаптивних управлінських рішень [99, 100].

Наукова новизна полягає у формалізації багаторівневої структури управління, що забезпечує адаптивність платформи до збурень, та вперше введеному понятті «алгоритмічної невизначеності» як специфічної категорії ризику. Розроблений математичний апарат самооновлення параметрів у реальному часі підвищує точність прогнозів, а запропонована архітектура «сенсори – фільтрація – адаптація – контроль» гарантує динамічну стабілізацію системи навіть в умовах деградації її елементів або часткової втрати даних.

1.6 Архітектура автономної платформи як когнітивного агента у складі морських роботизованих комплексів

Сучасні підходи до управління автономними морськими системами переважно орієнтовані на локальне вирішення окремих задач навігації, стабілізації руху або моніторингу технічного стану. Проте ізольований розгляд автономного судна обмежує можливості системи щодо компенсації багатофакторної невизначеності та забезпечення результативності в умовах складних, довготривалих місій. Перехід від концепції одиничного автономного морського транспортного засобу до парадигми багатоагентних систем (*Multi-Agent Systems – MAS*) є об'єктивною вимогою до розвитку морських роботизованих комплексів (МРК). У такому контексті АМТЗ трансформується з ізольованого кіберфізичного об'єкта на розподіленого когнітивного агента, що діє у складі глобальної інформаційної транспортної мережі [454, 458].

Формалізація автономної платформи як вузла багатоагентної мережі є наступною.

Для опису взаємодії в межах МРК розглядаємо кожне судно як інтелектуальний вузол (агент), який володіє власним локальним простором

станів, цифровим двійником та системою підтримки прийняття рішень (СППР, DSS). Когнітивний агент A_i у складі МРК формалізується як кортеж:

$$A_i = \langle X_i, U_i, DT_i, DSS_i, C_{ij} \rangle,$$

де X_i – вектор внутрішнього стану платформи (навігаційні координати, залишковий ресурс, технічний стан вузлів); U_i – локальний простір невизначеності, який включає екологічну, технічну, алгоритмічну та інформаційну складові ($U_i = \{U_e, U_t, U_a, U_i\}$); DT_i – локальний цифровий двійник, що забезпечує безперервну синхронізацію фізичного та віртуального станів платформи; DSS_i – локальний модуль підтримки прийняття рішень; C_{ij} – топологія комунікації (матриця зв'язності), яка визначає спроможність агента A_i передавати та отримувати цифрові дані від сусіднього агента A_j.

На відміну від детермінованого управління одиничним судном, де керуючий вплив формується виключно на основі локального вектору вимірювань системи сенсорів системи, когнітивний агент використовує розширений вектор спостереження. Інтеграція інформаційних потоків у межах мережі дозволяє знизити рівень інформаційної невизначеності та підвищити достовірність оцінювання середовища функціонування [455, 457].

Трансформація об'єкта потребує докорінної перебудови архітектури систем підтримки прийняття рішень.

Якщо для одиничного АМТЗ місійно-орієнтоване управління фокусується на оптимізації індивідуальної траєкторії та енергоспоживання, то для МРК завданням DSS стає кооперативне планування.

Архітектура систем підтримки прийняття рішень (СППР, DSS) при плануванні спільних місій

Архітектура інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для багатоагентного МРК набуває ієрархічно-розподіленої структури:

– стратегічний рівень (глобальний консенсус) застосовується для визначення глобальної мети місії (наприклад, моніторинг заданої акваторії, спільне транспортування, пошуково-рятувальні операції). На цьому рівні DSS розподіляє ролі між когнітивними агентами залежно від їхнього поточного технічного стану та наявних енергетичних ресурсів;

– тактичний рівень (кооперативна оптимізація) застосовується дляузгодження локальних планів руху. Використовуються алгоритми уникнення колізій на основі взаємного обміну прогнозними траєкторіями, згенерованими локальними модельно-прогнозними контролерами (MPC);

– операційний рівень (адаптивна реакція) застосовується длядинамічного коригування режимів функціонування окремих платформ у реальному часі на основі даних про відмови систем або зміну гідрометеорологічної обстановки.

Формування емерджентних властивостей та досягнення інтегральної ефективності пояснюється так. Функціонування АМТЗ у складі децентралізованої мережі зумовлює появу нових емерджентних (системних) властивостей, які не притаманні жодному ізольованому судну. Основною такою властивістю є ройова живучість та структурна стійкість до алгоритмічної невизначеності.

Алгоритмічна невизначеність, як окрема категорія ризику автономних систем, включає похибки адаптивних алгоритмів та нестабільність процесів прийняття рішень. В ізольованій системі накопичення таких похибок неминуче призводить до деградації місії [456, 459].

У складі МРК інтегральна ефективність місії IEE_{MRK} досягається завдяки двох наступних чинників.

1. Інформаційній надмірності: при відмові датчиків (наприклад, систем GNSS чи радарів) на одній платформі, когнітивний агент здатний реконструювати свій вектор стану X_i за допомогою агрегації телеметричних даних від сусідніх платформ.

2. Розподіленому балансуванню ризиків: динамічна модель сценарної трансформації структури ризиків дозволяє перерозподіляти найбільш складні

або енергозатратні завдання (наприклад, рух проти хвилі чи льодової обстановки) на агенти з найвищим показником технічного стану (*Health Index*).

Таким чином, розгляд автономної платформи як когнітивного агента багатоагентної мережі розширює межі місійно-орієнтованого підходу. Інтегральна ефективність експлуатації АМТЗ досягається не лише шляхом локальної стабілізації та адаптивного управління, а й завдяки синергії, розподіленому інтелекту та роєвій взаємодії, що перетворює морський роботизований комплекс на високонадійну кіберфізичну систему, здатну функціонувати в умовах високого рівня ентропії морського середовища.

Функціонування АМТЗ у складі децентралізованих роботизованих комплексів неминуче відбувається під впливом стохастичних збурень зовнішнього середовища, що критично впливають на стабільність комунікаційних мереж. Інформаційна невизначеність у таких системах проявляється у формі затримок передачі даних, втрати інформаційних пакетів, неповноти даних, кібератак та повної відмови каналів зв'язку. У таких умовах застосування класичних централізованих алгоритмів управління стає неможливим, що вимагає розроблення моделей кооперативного консенсусу, здатних функціонувати при дискретній або розірваній топології комунікації.

При втраті стабільного інформаційного обміну між агентами рою на перший план виступає алгоритмічна невизначеність. Цей тип невизначеності є окремою категорією ризику автономних систем і включає похибки адаптивних алгоритмів, динамічну нестабільність моделей, неповноту інформації та нестабільність процесів прийняття рішень. Для компенсації алгоритмічної та інформаційної невизначеності під час переривання зв'язку кооперативне управління переходить у режим автономного прогнозування просторового положення інших платформ.

Для реалізації такого прогнозування застосовується інтегрована архітектура адаптивного управління, яка поєднує методи прогнозного керування (МПК), нечітку логіку та алгоритми навчання з підкріпленням. Кожен розподілений когнітивний агент застосує власне аналітичне ядро (модель

цифрового двійника) для екстраполяції подальших дій сусідніх платформ, що дозволяє мінімізувати вплив неповноти інформації та забезпечити безперервну синхронізацію віртуальних станів об'єктів. Завдяки механізмам самоналаштування параметрів системи залежно від зміни умов експлуатації, платформи здатні утримувати заданий режим або безпечно розходитися навіть за відсутності прямого обміну навігаційними даними [453, 455].

Критичним завданням кооперативного управління є математичне моделювання вирішення конфлікту цілей. У багатоагентній групі виникає об'єктивна суперечність між глобальною метою (успішність виконання місії всім комплексом) та локальними цілями окремих платформ (надійність, стабільність навігації, уникнення зіткнень та збереження енергетичних ресурсів). Розв'язання цього конфлікту формалізується як задача багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності.

Цільова функція кооперативного управління формується на основі інтегрального показника ефективності місії, який враховує ступінь досягнення цільових завдань, обсяг використаних ресурсів та часові характеристики функціонування. Оптимізація балансує між максимізацією результативності групи та мінімізацією інтегрального ризику і енергетичних витрат кожної окремої платформи.

У випадку виникнення непередбачуваних перешкод або критичних режимів функціонування, системи підтримки прийняття рішень застосовують нечіткі контролери для адаптивної зміни вагових коефіцієнтів цільової функції. Це дозволяє тимчасово надавати абсолютний пріоритет індивідуальній безпеці АМТЗ над жорстким утриманням просторової конфігурації рою. Такий структурно-сценарний підхід до моделювання режимів функціонування забезпечує досягнення консенсусу, дозволяючи групі децентралізованих агентів адаптивно реагувати на зміни гідрометеорологічної обстановки та відмови систем зв'язку, зберігаючи при цьому стійкість виконання глобальної місії.

У сучасній теорії експлуатації автономних морських платформ концепція цифрового двійника, наприклад, у працях українських вчених І. Грицука,

В. Вичужаніна, О. Мельника, А. Голованя, розглядається як активний елемент системи управління судном, що забезпечує безперервну синхронізацію фізичного та віртуального станів платформи, сценарне прогнозування режимів функціонування та підтримку прийняття рішень у реальному масштабі часу. [453–458] Однак в умовах використання децентралізованих роботизованих комплексів зосередженість виключно на локальному цифровому двійнику обмежує можливості загальної системи. Виникає об'єктивна необхідність розширення цієї концепції до рівня федеративної мережі цифрових двійників (*Federated Digital Twins – FDT*).

Федеративна мережа цифрових двійників передбачає інтеграцію локальних віртуальних моделей у єдиний інформаційно-аналітичний простір без необхідності централізованого акумулювання всього масиву сирих даних. Такий підхід концептуально спирається на методи федеративного машинного навчання (*Federated Learning*) і є критично важливим для створення систем передачі даних в умовах нестабільних каналів зв'язку. Замість безперервної трансляції великих обсягів телеметричної інформації, автономні транспортні засоби обмінюються лише оновленими параметрами локальних математичних моделей та адаптивних алгоритмів керування. Це дозволяє суттєво знизити навантаження на комунікаційні мережі та мінімізувати рівень інформаційної невизначеності.

Ключовим завданням такої мережі є забезпечення механізмів передачі «цифрового досвіду». Якщо один з автономних засобів у складі рою стикається з критичним сценарієм експлуатації або специфічними збуреннями (наприклад, надмірним хвильовим навантаженням або кавітацією у пропульсивних комплексах [451, 452]), його локальна інтелектуальна система управління на базі нечітких контролерів адаптується до нових умов. Отриманий адаптивний досвід формалізується в межах локального цифрового двійника та транслюється іншим учасникам комплексу у вигляді оновлених матриць знань і функцій належності. У результаті відбувається колективне навчання: інші платформи отримують готові предиктивні моделі реагування на аналогічні перешкоди ще до фактичного зіткнення з ними.

Не менш важливою функцією федеративної мережі цифрових двійників є колективне прогнозування деградації технічних вузлів АМТЗ.

Інтеграція неоднорідних інформаційних потоків технічних, енергетичних та середовищних даних від усієї групи суден дозволяє формувати високоточні загальні моделі зношування обладнання. Аналіз і моделювання деградаційних процесів у технічних вузлах автономних морських платформ на рівні рою дає змогу виявляти приховані кореляції та сценарії відмов, які неможливо ідентифікувати на базі даних одиничного судна. Віртуальна синхронізація станів групи суден дозволяє системі підтримки прийняття рішень превентивно перерозподіляти навантаження: найбільш ресурсомісткі або складні завдання спрямовуються на платформи з найвищим інтегральним показником технічного стану та оптимальним рівнем енергетичних ресурсів.

Інтеграція цифрових двійників у єдину федеративну мережу дозволяє ефективно подолати обмеження ізольованих систем оцінювання. Завдяки впровадженню механізмів передачі цифрового досвіду та колективному предиктивному аналізу досягається суттєве зниження алгоритмічної невизначеності, що є фундаментальною передумовою для збереження функціональної цілісності, операційної стійкості та місійної результативності децентралізованого морського роботизованого комплексу [454, 457].

Для попереднього дослідження процесів кооперативного управління та оптимізації комунікаційних протоколів у децентралізованих багатоагентних мережах АМТЗ розроблено спрощений симуляційний сценарій (мова *Python*, додаток Б). Моделюється рух двох АМТЗ (АМТЗ 1 та АМТЗ 2) через вигнутий *S*-подібний фарватер довжиною 150 м в умовах асиметричної часткової спостережуваності та сильних завад зв’язку, наприклад, сигналу акустичного захищеного каналу.

Фарватер має вигнуту вісь $y_{center}(x)$. АМТЗ 1 може вимірювати лише відстань до лівої межі каналу $o_1(t) = y_1(t) - y_{left}(x)$, а АМТЗ 2 вимірює лише відстань до правої межі $o_2(t) = y_{right}(x) - y_2(t)$. Жоден із апаратів самостійно не може визначити, де знаходиться центр каналу. Для утримання безпечного курсу

апарати повинні обмінюватися даними – диференційоване навчання зв'язку, DIAL. Вони генерують неперервні повідомлення $m_i(t) \in R$, які передаються з завадами: $\widehat{m}_j(t) = m_i(t) + \mathcal{N}(0, \sigma^2_{comm})$, де $\sigma_{comm} = 0{,}4$ є дуже інтенсивною завадою. Градієнт похибки траєкторії поширюється зворотно (назад, *back propagated*) безпосередньо через цей зашумлений канал зв'язку для спільного навчання інтелектуальних енкодерів повідомлень і декодерів-контролерів.

Після проведення 250 епох навчання за алгоритмом DIAL отримано наступні точні показники середньоквадратичного відхилення від осі фарватеру (рис. 1.18):

– режим без зв'язку, втрати 9,4359. Через неможливість обміну інформацією АМТЗ 1 та АМТЗ 2 діють наосліп щодо протилежних меж. Вони здійснюють небезпечний дрейф і врешті-решт виходять за межі безпечного фарватеру (аварійна ситуація);

– режим неоптимізованого зв'язку, втрати 49,6075. Передача повідомлень активна, але оскільки кодувальники та декодери не синхронізовані, випадкові сигнали сприймаються як хибні команди керування, що призводить до автоколивань, хаотичного рискання та високої вірогідності викиду суден на мілину.

– кооперативний DIAL, втрати 0,7378. Спільна оптимізація мережевих шарів дозволила апаратам виробити завадостійкий протокол стиснення даних. Незважаючи на шум в каналі зв’язку, система успішно відфільтрувала завади, забезпечивши синхронне утримання траєкторії з мінімальною похибкою.

Панель 1 (порівняння траєкторій руху у вигнутому фарватері) показує карту каналу та рух АМТЗ. Пурпурні пунктирні лінії (без зв'язку) демонструють, як апарати врізаються у межі каналу на поворотах. Зелена та бірюзова суцільні лінії (Кооперативний DIAL) показують ідеальне симетричне утримання центру вигнутого русла, навіть у найвужчому місці (пляшковому горлі x = 50–100 м).

Панель 2 (збіжність алгоритму навчання DIAL за епохами) показує стрімке експоненціальне падіння сукупної функції втрат (Joint Loss) з початкових 49,6 до стабільних 0,73 на фіналі навчання, доводячи математичну збіжність алгоритму DIAL.

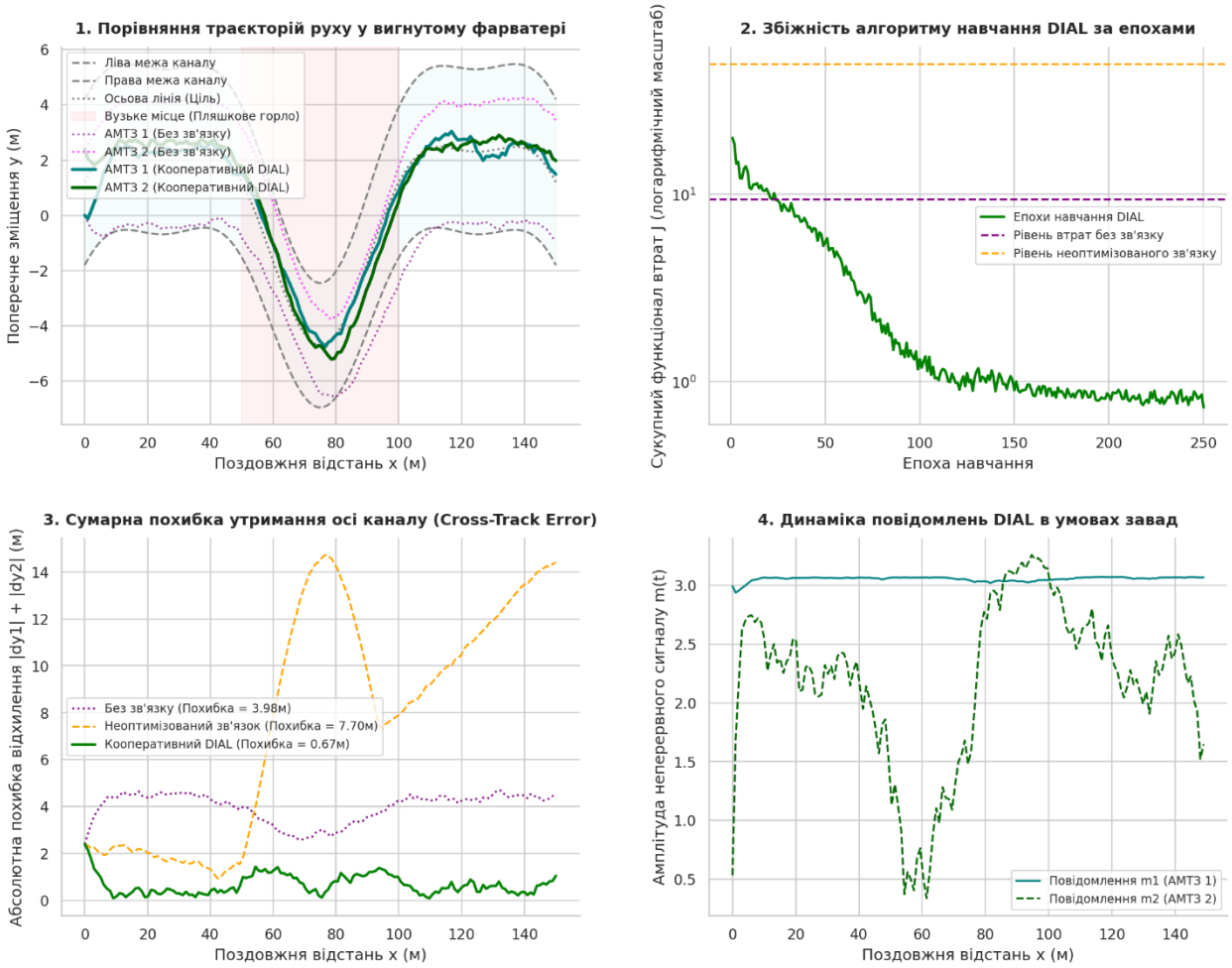


Рисунок 1.18 – Аналіз результату моделювання проходження каналу двома АМТЗ (імітація багатоагентного навчання DIAL для кооперативного проходження вузького каналу)

Панель 3 (сумарна похибка утримання осі каналу) порівнює інтегральну абсолютну похибку відхилення від курсу (Cross-Track Error) в метрах. DIAL зменшує середню похибку відхилення в декілька разів порівняно з іншими сценаріями.

Панель 4 (динаміка повідомлень DIAL в умовах завад) демонструє, як повідомлення $m_1(t)$ та $m_2(t)$ еволюціонували у протифазні синусоїди, що ідеально компенсують геометрію вигину фарватеру, підтверджуючи виникнення емерджентної мови взаємодії між двома АМТЗ для нівелювання завад.

Цей приклад доводить, що децентралізовані когнітивні агенти здатні самостійно синтезувати стійкі канали обміну досвідом безпосередньо під час виконання місії в умовах завад.

Адаптивне управління ефективністю МРК при відмовах обладнання за рахунок ройової компенсації слід пояснити наступним чином.

Безумовно, експлуатація АМТЗ у динамічному стохастичному середовищі неминуче супроводжується ризиками деградації технічних вузлів та відмов сенсорного обладнання. Для ізольованої платформи втрата критичних пристроїв контролю стану обладнання або навігаційних датчиків зазвичай призводить до екстреного переривання місії або переходу в критичний режим функціонування. Проте інтеграція судна до складу децентралізованої системи дозволяє розширити застосування структурно-сценарного підходу до моделювання режимів функціонування, запровадивши механізми ройової компенсації відмов.

Механізм міжплатформної передачі стійкості.

У межах розробленої архітектури концепція багаторівневої передачі стійкості, яка традиційно забезпечує компенсацію збурень між внутрішніми функціональними шарами одиничного судна, масштабується на міжплатформний (ройовий) рівень. У разі сценарної відмови обладнання на одному з агентів мережі ініціюється протокол адаптивного відмовостійкого керування.

Ройова компенсація полягає у тому, що інформаційні або навігаційні втрати пошкодженої платформи компенсуються за рахунок надлишковості всієї системи:

– інформаційне заміщення, тутпри виході з ладу локальних сенсорів просторового позиціонування, пошкоджений агент отримує екстрапольовані координати та телеметрію від сусідніх, повністю працездатних платформ;

– обчислювальне розвантаження, туту разі часткової деградації бортових обчислювальних потужностей або енергетичних збоїв, складні задачі з оптимізації маршруту та обробки масивів даних переносяться на цифрові двійники сусідніх вузлів, які функціонують у штатному режимі.

Алгоритмічне забезпечення та інтеграція даних при компенсації є окремим і важливим завданням. Відновлення достовірного вектору стану пошкодженого агенту на основі зовнішніх даних потребує глибокої інтеграції неоднорідних інформаційних потоків. Оскільки дані, які транслюються від інших суден флотилії (рою), містять алгоритмічну та інформаційну

невизначеність (через затримки в каналах зв'язку та просторове рознесення об'єктів), система управління застосовує розширені методи згладжування та просторово-часової фільтрації сигналів.

Федеративна мережа цифрових двійників генерує віртуальні (*proxy*) показники для деградованого вузла. Завдяки застосуванню нечітких контролерів та механізмів самоналаштування параметрів системи, локальний автопілот пошкодженої платформи отримує змогу продовжувати стабілізацію курсу та утримувати безпечну дистанцію ордера, спираючись виключно на синтезований інформаційний простір МРК. Саме тут затребуваною є оцінка місійної результативності та оптимізація ризиків.

В умовах деградації окремих елементів комплексу, динамічна модель сценарної трансформації структури ризиків забезпечує глобальне перепланування місії. Система підтримки прийняття рішень адаптивнокоригує параметри управління всією групою, наприклад, знижує загальну швидкість руху флотилії, змінює геометричну конфігурацію ордера для фізичного прикриття пошкодженого судна від хвильових збурень, або перерозподіляє енергоємні маневри.

У результаті такої кооперації інтегральний показник ефективності технічної експлуатації $IEE(t)$ утримується на рівні, достатньому для успішного завершення місії. Результативність досягається не за рахунок виснаження локальних резервів аварійного судна, а завдяки емерджентній властивості рою – здатності до динамічної реконфігурації та передачі стійкості. Це доводить, що перехід до багатоагентної парадигми якісно підвищує експлуатаційну надійність та гарантує виконання тривалих місій навіть у критичних сценарних умовах непередбачуваного морського середовища.

1.7 Висновки до першого розділу та постановка наукової проблеми

Аналіз сучасних теоретико-методологічних підходів до управління ефективністю автономних морських технічних засобів (АМТЗ) дозволив встановити, що існуючий науковий доробок переважно зосереджений на

вирішенні локальних завдань навігації, енергозабезпечення та адаптивного керування. Концептуальним недоліком розроблених рішень є відсутність цілісної методології управління ефективністю функціонування АМТЗ як складних систем у динамічному морському середовищі.

У результаті критичного огляду виявлено, що більшість існуючих моделей базується на детермінованих або вузькофункціональних принципах, які не враховують багатофакторну стохастичну невизначеність, варіативність режимів експлуатації та інтегративний вплив технічних, інформаційних і енергетичних підсистем, що суттєво обмежує можливість комплексного оцінювання результативності автономних місій та перешкоджає реалізації динамічного коригування режимів функціонування в реальному часі.

Показано, що об'єднання автономних морських транспортних засобів у багатоагентні системи, що функціонують на основі федеративної мережі цифрових двійників, гарантує живучість і функціональну стійкість морських роботизованих комплексів під час тривалого автономного плавання. Така архітектура дає змогу суднам у рої обмінюватися «цифровим досвідом» та адаптуватися до екстремальних умов із мінімальним трафіком у мережі. Додатково механізми інформаційного заміщення та розподілу обчислень компенсують відмови окремих датчиків чи алгоритмічні збої, що гарантує успішне виконання всієї місії.

Запропонована методологія управління ефективністю АМТЗ принципово відрізняється від існуючих підходів завдяки виокремленню алгоритмічної невизначеності у специфічну категорію ризику, що генерується похибками адаптивних алгоритмів, неповнотою вхідних даних та стохастичним дрейфом параметрів моделі під час виконання місії. На противагу традиційним детерміністичним схемам, концепція реалізує місійно-орієнтований принцип оцінювання, де механізми (адаптивне керування, системи підтримки прийняття рішень (DSS), моделювання сценаріїв та технології цифрових двійників) об’єднані у цілісний контур прийняття рішень. Такий синергетичний підхід забезпечує

динамічну реконфігурацію операційних режимів у реальному часі, що критично підвищує стійкість автономних платформ до зовнішніх збурень та гарантує досягнення цільової результативності в умовах високої ентропії середовища.

Дослідженням встановлено фундаментальне наукове протиріччя між необхідністю забезпечення операційної стійкості АМТЗ в умовах високої невизначеності та відсутністю інтегрованих методологій, здатних поєднати місійно-орієнтоване оцінювання, сценарне моделювання та адаптивну інформаційну підтримку в межах єдиного контуру управління.

Окремо визначено, що в сучасній науковій літературі практично не враховується алгоритмічна невизначеність як самостійна категорія ризику. Похибки адаптивних алгоритмів, інформаційна неповнота та динамічна нестабільність моделей створюють ризики, що безпосередньо впливають на достовірність прогнозування експлуатаційної надійності автономних платформ.

Проведене дослідження дозволило сформувати концептуальні засади побудови інтегрованої методології управління ефективністю АМТЗ, що базується на таких засадах:

– місійно-орієнтований принцип оцінювання цільової корисності;

– багаторівневе інтегральне оцінювання технічного стану підсистем;

– сценарне моделювання та адаптивне коригування експлуатаційних режимів;

– інтеграція неоднорідних потоків даних та цифрових двійників у процеси прийняття рішень;

– урахування алгоритмічної невизначеності як чинника ризику.

На основі отриманих результатів ідентифіковано необхідність розв’язання комплексу наукових завдань, що включають розроблення методології управління ефективністю АМТЗ в умовах невизначеності, формування інтегрованих моделей місійної результативності, удосконалення методів сценарного прогнозування та створення механізмів адаптивного управління з використанням цифрових двійників.

Для узагальнення логіки дослідження, взаємозв’язку розроблених моделей, методів та механізмів управління у роботі сформовано концептуальну схему методології управління ефективністю автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності. Запропонована схема на рис. 1.19 відображає багаторівневу структуру дослідження та демонструє взаємозв’язок між джерелами невизначеності, теоретико-методологічною базою, аналітичним інструментарієм і практичною реалізацією адаптивного управління автономними місіями.

Методологічна карта дослідження репрезентує інтегровану логіку формування та імплементації процесів адаптивного керування ефективністю АМТЗ. Вона дозволяє формалізувати перехід від аналізу чинників невизначеності до побудови операційних алгоритмів, що забезпечують живучість та місійну результативність технічних засобів у динамічних експлуатаційних середовищах виступаючи інструментом структурно-функціонального синтезу всіх розроблених у роботі наукових положень.

На першому рівні визначається проблемна область дослідження, яка характеризується динамічністю середовища функціонування, багатофакторною невизначеністю та змінністю умов виконання місій. Обмеження існуючих методів управління, що базуються на детермінованих підходах, обумовлюють необхідність переходу до адаптивних моделей управління ефективністю.

Другий рівень формує науково-методологічний базис дослідження. На цьому етапі визначаються ключові наукові протиріччя, формулюється гіпотеза дослідження, здійснюється класифікація факторів впливу та розробляється інтегрована модель оцінювання ефективності. Особлива увага приділяється моделюванню невизначеності як базовому елементу прийняття рішень в умовах нестабільності.

Третій рівень представлений аналітичним та цифровим інструментарієм реалізації дослідження. Він включає методи багатокритеріального аналізу (AHP/MCDM), сценарного моделювання, стохастичного аналізу та нечіткої логіки. Цифрова складова реалізується через інтеграцію інформаційних систем, цифрових двійників та систем підтримки прийняття рішень, що забезпечують адаптивність та гнучкість управління.

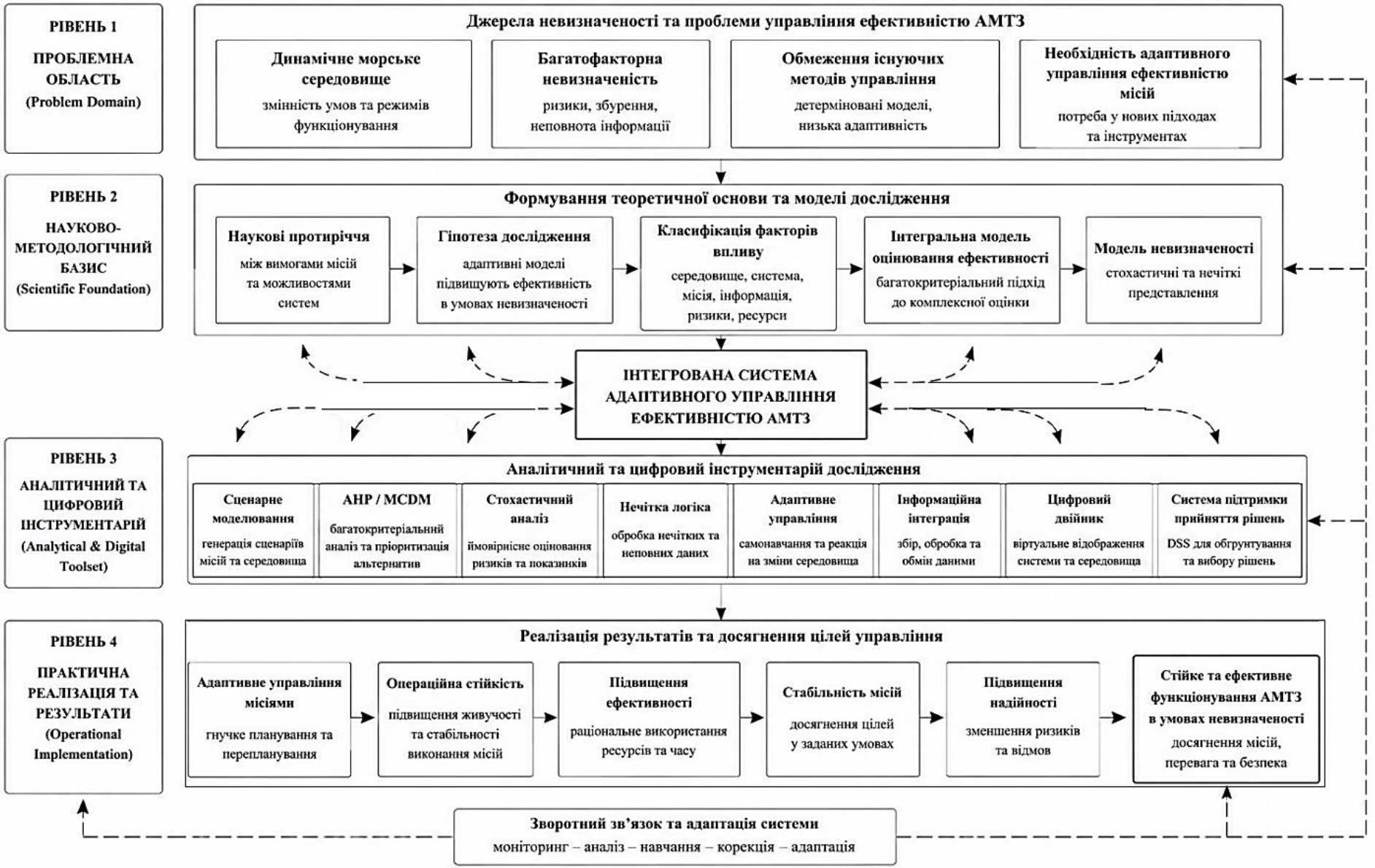


Рисунок 1.19 – Методологічна карта дослідження

Четвертий рівень відображає практичну реалізацію отриманих результатів у вигляді адаптивного управління місіями, підвищення операційної стійкості, ефективності функціонування та надійності системи. На цьому етапі забезпечується трансформація аналітичних результатів у конкретні управлінські рішення.

Центральним елементом методологічної карти є інтегрована система адаптивного управління ефективністю АМТЗ, яка поєднує всі рівні дослідження та забезпечує їх взаємодію через механізми зворотного зв’язку та інформаційної інтеграції.

Таким чином, запропонована методологічна карта відображає системний підхід до дослідження, що поєднує теоретичні, аналітичні та прикладні аспекти, та забезпечує досягнення основної мети – підвищення ефективності та стійкості функціонування морських автономних систем в умовах невизначеності.

Результати першого розділу формують науково-методологічне підґрунтя для розроблення концепції інтегрованого управління ефективністю АМТЗ, що є предметом подальших розділів дисертаційного дослідження.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [1, 17, 18, 22, 25, 31–33, 45, 47, 49].

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Концепція ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів

Сучасні автономні морські транспортні засоби (АМТЗ) характеризуються високим рівнем мультизадачності та здатністю адаптуватися в динамічних середовищах. За таких умов традиційні методи оцінювання ефективності, орієнтовані суто на економічні або транспортно-технологічні показники, не забезпечують адекватного аналізу специфіки автономного функціонування. На відміну від класичного судноплавства, результатом роботи АМТЗ є не просто транспортна робота, а успішне виконання автономної місії в межах жорстких часових, енергетичних та функціональних обмежень. Це зумовлює перехід від оцінювання локальних параметрів до місійно-орієнтованого підходу, де ключовим критерієм стає результативність системи в умовах багатофакторної невизначеності.

Як відомо, *ефективність у широкому розумінні* – це здатність отримувати максимальний результат при мінімальних витратах ресурсів (часу, грошей, зусиль). Отже, в залежності від того, що вважати результатом, формуються показники ефективності. Традиційно для оцінки ефективності експлуатації морських транспортних засобів використовуються два основні показники: тайм-чартерний еквівалент та сумарні витрати. Тайм-чартерний еквівалент застосовується у тих випадках (а це більшість у загальному обсязі експлуатації суден), коли йдеться про комерційне використання транспортних засобів, тобто для перевезення вантажів (якщо мова йде про вантажні судна) на комерційних умовах. Максимізація тайм-чартерного еквівалента пов'язана із забезпеченням

ефективності експлуатації суден. Така ситуація є типовою для більшості суден і судноплавних компаній, тому що саме комерційна мета є основною для більшості суб'єктів фрахтового ринку [101, 102].

Тим не менш, є ситуації, коли судна не використовують на комерційних умовах для перевезення, а мета їх експлуатації – наприклад, транспортне забезпечення логістичних систем або обслуговування проєктів. Прикладом можуть бути танкери транснаціональних компаній, пов'язаних із видобутком, продажом і переробкою нафти, і навіть судна великих експортерів зерна, руди, вугілля. У таких ситуаціях ефективність експлуатації з економічної точки зору оцінюється сумарними витратами, які є транспортними витратами проекту або експортера (імпортера), отже їх мінімізація позитивно впливає на прибуток експортера або економічні показники проекту. Таким чином, у цьому випадку немає традиційного комерційного інтересу в процесі експлуатації суден, тобто отримання прямої вигоди від перевезення вантажів, а їх основне завдання – відповідне транспортне обслуговування з мінімальними витратами [103, 104].

Таким чином, певні показники ефективності пов'язані з експлуатацією «традиційних» вантажних суден. Ще однією особливістю експлуатації даних суден і те, що структурної одиницею роботи судна є «рейс». Саме з рейсом пов'язаний показник тайм-чартерний еквівалент, до конкретного рейсу можуть прив'язуватись витрати для суден в іншому варіанті їх експлуатації [105, 106].

Сьогодні в секторі комерційних перевезень автономні морські транспортні засоби використовуються як пілотні проекти і до повноцінного використання автономних транспортних засобів замість традиційних суден у комерційному судноплавстві ще потрібен значний час. Тому сьогодні автономні транспортні засоби мають значення для збору даних та наукових досліджень, виконання стратегічних (оборонних) завдань, охорони морської інфраструктури, рятувальних операцій тощо (див. розд. 1).

Тому результат експлуатації автономних транспортних засобів у широкому сенсі – це не прибуток чи інша комерційна вигода, а «виконання

місії». Отже, введемо до розгляду термін «*виконання місії*», під яким будемо розуміти виконання *певних завдань* у *певні терміни* (протягом певного часу). Виконання завдань потребує ресурсів, а саме, енергоресурсів, перш за все. Час є також ресурсом [107, 108].

Слід зазначити, що на відміну від врахування «комерційного» (економічного) результату експлуатації суден торговельного судноплавства, *ефективність експлуатації автономних морських транспортних засобів* потребує іншого підходу, який дозволяє узагальнити визначення ефективності для будь-яких АМТЗ для будь-яких варіантів їх використання.

Отже, можна говорити про *ефективне виконання місії*, якщо вона виконана в повному обсязі у встановлені терміни (або протягом встановленого часу) з використанням запланованих ресурсів. У такій ситуації співвідношення «ресурси-результат» відповідає запланованій ситуації. Якщо виконання місії відбувається з використанням більшої кількості енергоресурсів, або потребує додаткового часу та додаткової кількості ресурсів, то вже має місце менш ефективне виконання місії. Невиконання усіх завдань, або виконання їх з помилками також свідчить про неефективне виконання місії [109].

Таким чином, термін «місія» у даному контексті є о*диницею вимірювання роботи автономних транспортних засобів*. Якщо при використанні запланованих ресурсів, місія виконана у повному обсязі в заплановані терміни, то це свідчить про *ефективність експлуатації автономних транспортних засобів*. Якщо місія виконана раніше, ніж було заплановано, та з використанням меншої кількості енергоресурсів, то можна вважати, що місія виконана навіть ефективніше, ніж планувалося.

При такому підході, «місію» можна розглядати як аналог рейсу, якщо основне завдання для автономного транспортного засобу є перевезенням вантажу з пункту А в пункт Б. Отже, введене поняття «виконання місії» є значно ширшим і включає, зокрема, рейс як один із варіантів його виконання [110].

Отже, *місія* – це завдання, терміни та енергоресурси для автономного морського транспортного засобу, *виконання місії* – аналог роботи транспортного засобу, послідовність виконання місій *формує експлуатацію автономного транспортного засобу*.

Таким чином, з урахуванням мультизадачності автономних морських транспортних засобів, запропонована термінологія є універсальною для характеристики та визначення їх *роботи, експлуатації та ефективності.*

Для подальшої формалізації процесу виконання автономної місії введено систему параметрів, що визначають структуру завдань, часові інтервали реалізації операцій, динаміку використання енергетичних та технічних ресурсів, а також інтегральний рівень фактичного виконання місії. Такий параметричний опис дозволяє перейти від якісного аналізу до кількісної оцінки результативності АМТЗ, формуючи аналітичне підґрунтя для розроблення алгоритмів адаптивного управління. Ця система параметрів є базовим фреймворком для моніторингу стану платформи в реальному часі та забезпечує зворотний зв'язок для коригування траєкторії місії відповідно до встановлених обмежень [111].

Введемо наступні позначення:

M^* – сутність (завдання) місії АМТЗ, фактично M^* об'єднує множину завдань, які можна уявити з різним ступенем деталізації. У будь якому разі:

$$M^* = \left\langle M_1^*, M_2^*, ..., M_n^* \right\rangle, \tag{2.1}$$

де M_i^* – *i*-те планове завдання місії; *n* – кількість завдань у складі місії.Фактичне виконання місії подається вектором характеризує рівень виконання $M = \{M_1, M_2, ..., M_n\}$, де $M_i \in [0;1]$ характеризує рівень виконання *i*-го завдання.

Наприклад, M_1^* – збір даних про екологічний стан морської води у відповідності до переліку маркерів, M_2^* – збір даних про погодні умови відповідно до переліку складових тощо.

T^* – час виконання місії;

R^* – кількість енергоресурсів (якщо крім поновлюваних використовуються непоновлювальні);

M – фактичне виконання завдань, де компоненти $M = \langle M_1, M_2, ..., M_n \rangle$ у частках одиниці (у відсотках) характеризують обсяг виконання завдань;

T – фактичний час виконання місії;

R – фактична кількість використаних енергоресурсів.

Формалізація успішного виконання місії (тобто місія вважається повністю виконаною, якщо всі її завдання виконані на рівні 100 %):

$$M = 1,\ i = 1, \ldots,\ n. \tag{2.2}$$

або

$$M_1 = 1, M_2 = 1, ..., M_n = 1. \tag{2.3}$$

Отже, місію можна вважати успішною, якщо усі її завдання виконані на 100 %.

У випадках, коли допускається часткове виконання окремих завдань, вводяться мінімально допустимі рівні виконання m_i. Тоді умова успішного виконання місії має вигляд:

$$M_i \geq m_i, \quad i = 1, \ldots, n, \tag{2.4}$$

де

$$0 < m_1, m_2, ..., m_n \leq 1, \tag{2.5}$$

де $m_i \in (0;1]$. Значення m_i дозволяють математично описати обов'язковість і мінімально допустиму повноту виконання кожного завдання місії. Тоді за результатами місії, якщо виконується (2.4) – місія успішна, тому що усі завдання виконані.

Але «успішна» не означає «ефективна», тому що якщо завдання виконані в необхідному обсязі, але не своєчасно, або використано більше ресурсів, то

місія виконана, але неефективно [112, 113]. Отже, пропонується концепція ефективності експлуатації АМТЗ у вигляді наступної схеми (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Концепція ефективної експлуатації АМТЗ

Умови ефективного виконання місії автономних морських транспортних засобів:

$$\begin{cases} M_1 \geq m_1, M_2 \geq m_2, ..., M_n \geq m_n, \\ T \leq T^*, \\ R \leq R^*. \end{cases} \quad (2.6)$$

Отже, ефективна місія передбачає виконання завдань з дотриманням обмежень щодо часу та енергоресурсів.

Слід зазначити, що в деяких випадках місія АМТЗ передбачає не виконання з*авдань в рамках обмежень за часом*, а *виконання завдань протягом певного часу*, наприклад, стратегічні задачі, патрулювання, охорона, тощо. В даних випадках потрібно, що саме в рамках певного часу АМТЗ виконувала необхідні дії. Якщо до встановленого часу АМТЗ не спроможна була виконувати певні завдання, наприклад, не вистачило енергоресурсів, або відбувся збій у роботі певних систем, то можна вважати, що *місія не виконана успішно*.

Для формалізації запропонованого місійно-орієнтованого підходу ефективність експлуатації АМТЗ доцільно розглядати як інтегровану характеристику результативності виконання автономної місії з урахуванням ступеня виконання завдань, часових обмежень і використання енергетичних ресурсів. На відміну від традиційних транспортних систем, у яких ефективність визначається переважно економічними показниками, для АМТЗ визначальним критерієм є здатність автономної платформи забезпечувати виконання місії в умовах невизначеності та змін зовнішнього середовища [114].

У зв’язку з цим запропоновано концептуальну структуру оцінки ефективності експлуатації АМТЗ, яка відображає взаємозв’язок між виконанням завдань місії, ресурсними обмеженнями та результативністю автономного функціонування (рис. 2.1).

$$\begin{cases} M_1 \geq m_1, M_2 \geq m_2, ..., M_n \geq m_n, \\ T = T^*, \\ R \leq R^*. \end{cases}, \qquad (2.7)$$

Формула (2.7) враховує, що завдання, наприклад, моніторингу певної акваторії, виконувались протягом встановленого часу T^* з використанням запланованої кількості енергоресурсів. Таким чином, в залежності від сутності та особливості місії, час має слугувати як обмеження (2.6), або як обов’язкова умова (2.7).

Виконання даних умов ґрунтується *на надійному експлуатаційному стані АМТЗ*, отже, для забезпечення ефективності виконання місій необхідною умовою є забезпечення з певною ймовірністю необхідного стану систем АМТЗ, що буде далі розглянуто [115–118].

Отже, виконання завдань у необхідному обсязі, дотримання обмежень часу та енергоресурсів формують *базис для оцінки ефективності експлуатації АМТЗ*. Обґрунтуємо дані структурні елементи ефективності більш детально.

*Виконання завдань місії (*аналог перевезення) – мається на увазі рівень їх виконання або виконання взагалі в залежності від підходу за завдань, що власне й є результатом місії. Отже, експлуатація АМТЗ спрямована на виконання завдань в рамках місії, їх сутність та номенклатура залежать від конкретного АМТЗ та його призначення [118–121].

Час виконання місії Т формується з декількох складових (рис. 2.2):

– $T_{вз}$ *часу виконання завдань*;

– $T_{м}$ *часу на маневри та слідування маршрутом* (в деяких випадках даний елемент часу місії співпадає с часом виконання завдань, отже деякі процеси у місії виконуються паралельно);

– $T_{дод}$ часу, який не пов'язаний з «ефективним» використанням даного ресурсу АМТЗ, а є наслідком *проблем с автономною роботою транспортного засобу у процесі виконання місії.*

Прикладом останньої складової є порушення у системі, яка відповідає за навігацію або управління в цілому, що може привести до ситуації, коли АМТЗ або не рухається, або рухається не за оптимальним маршрутом певний час або протягом всієї місії при складних погодних умовах АМТЗ може неправильно прийняти рішення щодо оптимального або ефективного варіанту руху.

Отже, якщо для звичайних транспортних засобів *вплив людини є*, як правило, вирішальним для вибору ефективного або навпаки варіанту маневрування та ходу в певних умовах, то для автономних транспортних засобів

узгодженість та якість систем, які відповідають за діагностику та прийняття рішень є вирішальним фактором.

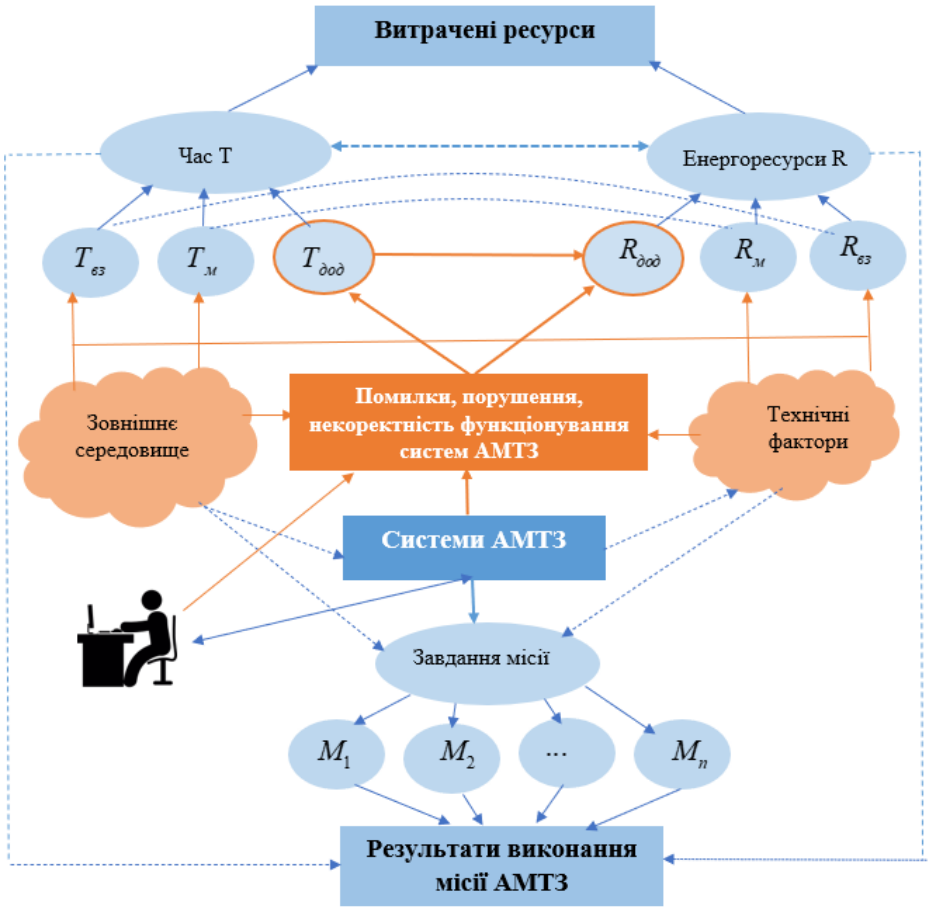


Рисунок 2.2 – Концепція оцінки ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів

Саме тому *додатковий час* $T_{дод}$ є наслідком або складних зовнішніх умов, або технічних проблем у системах АМТЗ (відмова, некоректне функціонування тощо) або наслідком прийняття рішень АМТЗ, або комбінації даних факторів [122, 125].

Енергоресурси залежать, безумовно, від часу місії та іноді сутності завдань. Отже, розподіл енергоресурсів в ході місії передбачає наступні складові:

– $R_{вз}$ – енергоресурси, які необхідні для виконання завдань місії:

– $R_{м}$ – енергоресурси, які витрачаються в процесі маневрів та руху АМТЗ;

– $R_{дод}$ – енергоресурси, які пов'язані з додатковим часом $T_{дод}$, помилками та некоректністю функціонування систем АМТЗ, у тому числі, в процесі виконання завдань.

Таким чином, збільшення споживання енергоресурсів в процесі виконання місії обумовлюється не тільки збільшенням часу $T_{дод}$, а ще й неоптимальним або нераціональним режимом роботи двигунів, що пов'язано з *некоректною роботою та прийняття рішень відповідними системами АМТЗ*.

Отже, *збільшення часу та використання зайвих енергоресурсів* обумовлюється трьома групами основних факторів:

– *впливом зовнішнього середовища* (погоді умови, трафік, кібератаки, інш.);

– *впливом технічних факторів* (старіння, знос, режим та умови експлуатації, технічне обслуговування тощо);

– *впливом некоректного функціонування та помилок систем АМТЗ (отже, причина у самому АМТЗ та його системах – аналог людського фактору впливу для звичайних вантажних морських суден).*

Отже, результати місії та витрачені ресурси визначаються, перш за все, технічним *станом систем АМТЗ та їх рівнем* з точки зору можливості автономного прийняття рішень. Якщо передбачається коригування експлуатації АМТЗ у процесі виконання місії оператором (віддалено), то до системи факторів впливу додається ще й *людський фактор* [126–129].

Отже с*піввідношення витрачених ресурсів та результатів виконання* місії АМТЗ формує основу для *оцінки ефективності експлуатації* АМТЗ. Помилки, порушення та некоректність функціонуванням систем АМТЗ обумовлює зростання витрачених ресурсів та зменшення результати (невиконання або часткове виконання завдань) [130–133].

Ефективність експлуатації АМТЗ визначається, перш за все, его техніко-технологічним рівнем та спроможністю автономного виконання завдань у поєднанні з рухом та маневрами. Тому що від цього залежить рівень та кількість помилок, збоїв, неефективних рішень під впливом зовнішніх факторів [134–137].

Таким чином, введено до *розгляду нову термінологію*, яка відповідає сутності та різноманіттю автономних морських транспортних засобів, а саме, *місія, завдання місії, виконання місії.* Запропонована концепція оцінки ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів передбачає співвідношення витрачених ресурсів (часу та енергоресурсів) і результатів виконання завдань у рамках місії. Обґрунтовано, що техніко-технологічний рівень систем АМТЗ, їх стійкість та надійність є вирішальними факторами ефективного виконання місій та експлуатації АМТЗ. Визначені умови ефективного виконання місії – ефективної експлуатації АМТЗ для двох варіантів місій з точки зору часу: час як ресурс та час як частина завдання місії. Такий підхід охоплює усі можливі варіанти призначення та використання АМТЗ.

2.2 Оцінювання показників ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів

Слід зазначити, що (2.6) та (2.7) є умовами ефективного виконання місії. Проте як теоретичний, так і практичний інтерес має певна оцінка ефективності виконання місії, яка б дозволяла не тільки оцінювати, а також порівнювати результати виконання місій за аналогією з традиційними показниками ефективності експлуатації суден. Дана оцінка має базуватися на співвідношенні «результат – час та енергоресурси», що відповідає сутності поняття «ефективність» відповідно до концепції, яка надана у п.п. 2.1.

Подальший розгляд ефективності передбачає розмежування двох ситуацій, які було зазначено вище: у першій ситуації *час як ресурс,* у другий ситуації – *час як частина завдання місії*.

Спочатку розглянемо першу ситуацію.

З урахуванням вищевикладеного, введемо до розгляду наступні показники.

Інтегральний показник виконання місії:

$$I_M = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \frac{M_i}{m_i}, \tag{2.8}$$

або

$$I_M = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i I_{M_i}, \tag{2.9}$$

де I_{M_i} – показники виконання завдань місії

$$I_{M_i} = \begin{cases} \dfrac{M_i}{m_i}, M_i < m_i; \\ 1, M_i \geq m_i. \end{cases} \tag{2.10}$$

α_i – вага *i*-го завдання в загальному обсязі завдань місії, згідно прийнятому підходу до вагових коефіцієнтів, $0 < \alpha_i < 1$, $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$.

Два варіанти інтегральної оцінки виконання місії базуються на двох підходах до оцінки виконання окремого завдання в рамках місії.

Формула (2.8) передбачає, що завдання може бути виконане у більшому обсязі, ніж це припускалось як мінімальні припустимі умови місії, отже можливо, що $\frac{M_i}{m_i} > 1$, що у свою чергу обумовлює $I_M > 1$.

Формула (2.9) для тих випадків, коли виконання завдання перевищує припустимі мінімальні обсяги, показник виконання завдання $I_{M_i} = 1$, тоді $I_M \leq 1$.

Отже, в залежності від політики щодо виконання завдань та розуміння ефективного їх виконання в рамках місії, можна використовувати той чи інший підхід.

Не обмежуючи загальності, у подальшому дослідження приймаємо за основу (2.9). Щодо вагових коефіцієнтів $\alpha_i, i = \overline{1,n}$, їх мета – врахування важливості та пріоритетності кожного завдання в рамках місії. В залежності від

сутності місії та завдань, а також їх «вагомості», дані коефіцієнти дозволяють у подальшому врахувати, наскільки важливим та пріоритетним було кожне завдання. У сучасній теоретичній базі прийняття рішень, оцінки ризиків тощо існує значна кількість підходів до визначення $\alpha_i, i=\overline{1,n}$. Тому у даному дослідженні приймається, що метод визначення вагових коефіцієнтів α_i встановлює особа, яка приймає рішення.

Для виконання експериментальних розрахунків, в даному дослідженні було прийнято наступний підхід. Для кожного завдання визначено оцінку важливості $0<\beta_i<1$ експертним шляхом, потім для отримання вагових коефіцієнтів α_i використано наступну формулу:

$$\alpha_i=\frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^{n}\beta_i}, i=\overline{1,n}. \qquad (2.11)$$

Отримані даним шляхом α_i відповідають необхідним умовам, а саме, $0<\alpha_i<1, \sum_{i=1}^{n}\alpha_i=1.$

Для підсумкової оцінки *ефективності виконання місії* пропонується наступний показник:

$$I_E=I_M\cdot\frac{T^*}{T}\cdot\frac{R^*}{R}=\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha_i I_{M_i}\right)\cdot\frac{T^*}{T}\cdot\frac{R^*}{R}, \qquad (2.12)$$

де $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R}$ характеризують використання запланованого часу та енергоресурсів в процесі виконання місії та грають роль коригуючих коефіцієнтів до інтегральної оцінки виконання завдань місії.

На відміну від традиційних підходів до оцінювання експлуатаційної ефективності транспортних систем, запропонований показник інтегральної

ефективності враховує не лише факт виконання місії, а й ступінь досягнення цільових завдань, обсяг використаних ресурсів та часові характеристики автономного функціонування. Такий підхід забезпечує можливість комплексного mission-oriented assessment ефективності АМТЗ в умовах багатофакторної невизначеності та змінних режимів експлуатації [138].

Якщо $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R} \geq 1$, це означає, що витрачені час та енергоресурси не перевищують планованих показників. Якщо $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R} < 1$, фактичний час виконання місії та витрачені енергоресурси перевищують встановлені показники.

У виразі (2.12) $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R}$ «збільшують» значення інтегрального показника виконання місії, якщо має місце перша ситуація, та «погіршують» його значення при другій, корегуючи його таким чином. Такий підхід дозволяє врахувати *три основних складових ефективності:*

– виконання завдань місії у відповідності до їх вагомості та умов щодо повноти виконання;

– використання часу;

– використання енергоресурсів.

Показник ефективності $I_E > 0$ та приймає значення $I_E \to 1$, коли усі завдання виконані у відповідності до вимог з точки зору часу та енергоресурсів. В такій ситуації можна говорити про *планову ефективність виконання місії.*

Показник ефективності $I_E > 1$ у ситуації, коли усі завдання виконані, отже $I_M \to 1$ та $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R} \geq 1$, дана ситуація відповідає більшому рівню ефективності, ніж планувалось. Отже, чим більш значення I_E, тим більш ефективне виконання місії автономним морським транспортним засобом.

Для проведення експериментальних розрахунків розглянемо наступний приклад (табл. 2.1).

Місія передбачає виконання шості завдань, обмеження за часом T^*=12 годин, за енергоресурсами – R^*=50 у. о. енергоресурсів. Отже, однакова за змістом та обмеженнями місія виконується 5 разів.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані щодо визначення ефективності виконання місії автономним морським транспортним засобом

m_i	0,9	0,8	0,7	0,8	0,95	0,5	T^*=12	R^*=50
завдання	M1	M2	M3	M4	M5	M6	T	R
місія 1	0,9	0,8	1	0,7	1	1	10	40
місія 2	1	1	0	1	1	0	9	45
місія 3	1	0,7	1	0,6	1	0,9	8	35
місія 4	1	1	0,7	1	0	0,8	12	50
місія 5	1	0,8	1	0,8	1	1	10	45
β_i	1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	–	–
α_i	0,196	0,176	0,176	0,156	0,156	0,137	–	–

Вагові коефіцієнти α_i визначають відносну важливість окремих компонентів ефективності місії та формуються на основі експертного аналізу, узагальнення результатів наукових досліджень і практики експлуатації АМТЗ. При їх визначенні використовуються принципи багатокритеріального оцінювання та ієрархічної структуризації критеріїв, що дозволяє враховувати різний ступінь впливу окремих факторів на інтегральний результат виконання місії, інтегральні оцінки успіху місії розраховані на базі (2.9), (2.10).

У табл. 2.2 наведено результати розрахунку складових показника ефективності виконання місії (2.12), на рис. 2.3 проілюстровані дані розрахунків.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку показника ефективності виконання місії

Складові показника ефективності	Інтегральна оцінка виконання I_M	$\frac{T^*}{T}$	$\frac{R^*}{R}$	$I_M \cdot \frac{T^*}{T}$	$I_M \cdot \frac{T^*}{T} \cdot \frac{R^*}{R}$
місія 1	0,953	0,833	0,800	1,144	1,429
місія 2	0,686	0,750	0,900	0,915	1,017
місія 3	0,871	0,667	0,700	1,306	1,866
місія 4	0,763	1,000	1,000	0,763	0,763
місія 5	0,933	0,833	0,900	1,120	1,244

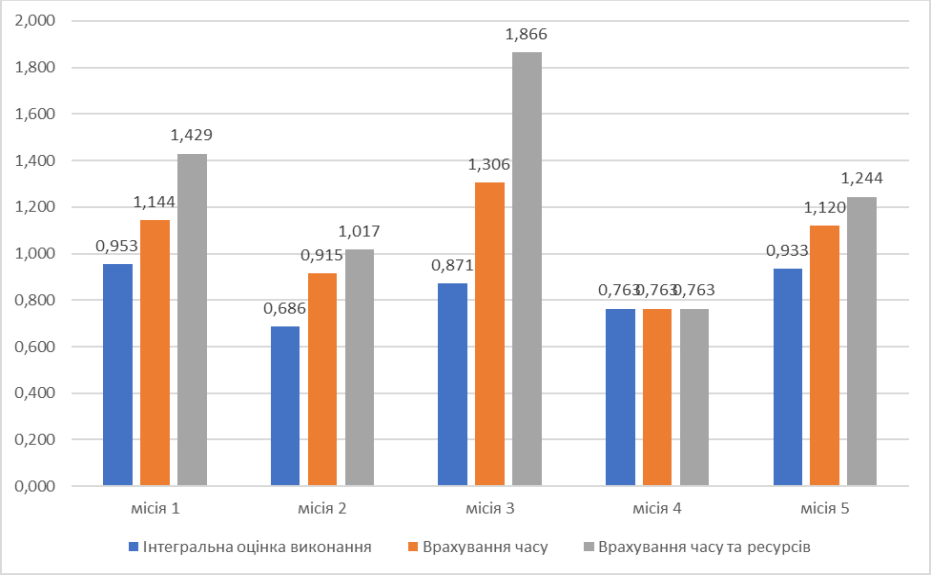


Рисунок 2.3– Результати розрахунку показника ефективності виконання місії

Наведені числові значення мають демонстраційний характер і використовуються для ілюстрації працездатності запропонованого методичного підходу. Метою прикладу є демонстрація послідовності розрахунків і впливу окремих параметрів на інтегральний показник технічної експлуатації, а не відтворення характеристик конкретної експлуатаційної місії.

На базі проведених розрахунків можна зробити такі висновки: більш високі інтегральні оцінки виконання у місії 1 та місії 5, відповідно, 0,953 та 0,933, близькі до значення 1, свідчать про виконання майже всіх завдань у необхідному обсязі. Для усіх місій час та енергоресурси не перевищують задані обмеження, тому врахування коригуючих показників $\frac{T^*}{T}, \frac{R^*}{R}$ обумовлює достатньо високі показники ефективності I_E для місій $1, 3, 5$. Місія 4 має мінімальну оцінку ефективності 0,763 з урахуванням того, що час та ресурси витрачені у повному обсязі, але завдання місії виконані не в повному обсязі (інтегральна оцінка успіху 0,763). Місія 2 виконана також не в повному обсязі, завдання 3 та 6 не виконані взагалі, їх оцінка 0, але використані час та ресурси значно менше, ніж планові, тому той обсяг завдань, який виконано, виконано достатньо ефективно, саме тому оцінка складає 1,017.

Якщо для місії 2 встановити виконання завдань 3 та 6 у припустимих обсягах, то отримаємо відповідно оцінку ефективності 1,481. Слід зазначити, зо під час експериментальних розрахунків відбувалася варіація вхідними даними щодо обсягу виконання завдань, їх пріоритетності, часу виконання та витрачених енергоресурсів [139].

На рис. 2.4–2.8 наведені окремі результати експериментальних досліджень. Залежність ефективності місій від часу їх виконаннядля прийнятої кількості ресурсів R=40 наведено на рис. 2.3. Для місій 2 та 4 при максимально припустимому часі виконання T=12 год ефективність менш за 1. Це пояснюється низьким рівнем виконання завдань (див. табл. 2.2), інтегральна оцінка виконання (успіху) місій становить 0,686 та 0,763 відповідно.

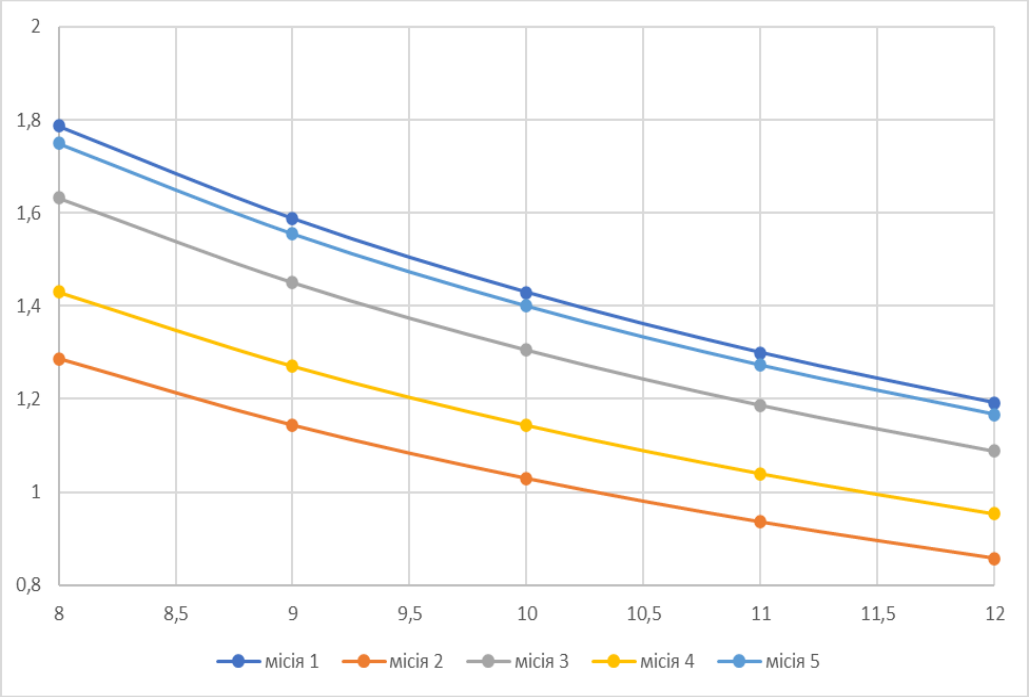


Рисунок 2.4 – Залежність ефективності місій від часу їх виконання для R=40

На рис. 2.5 наведено на прикладі місії 1 залежність ефективності від часу виконання для різної кількості використаних ресурсів (R=60, 50, 40, 30) при прийнятому обмеженні R*=50. Найвища ефективність для R=30 та мінімального часу виконання місії. Для використаної кількості ресурсів R=60, що перевищує

встановлене обмеження R^*=50, ефективність мінімальна та приймає значення більш одиниці тільки для T=8 год, тобто для самого швидкого варіанту виконання місії.

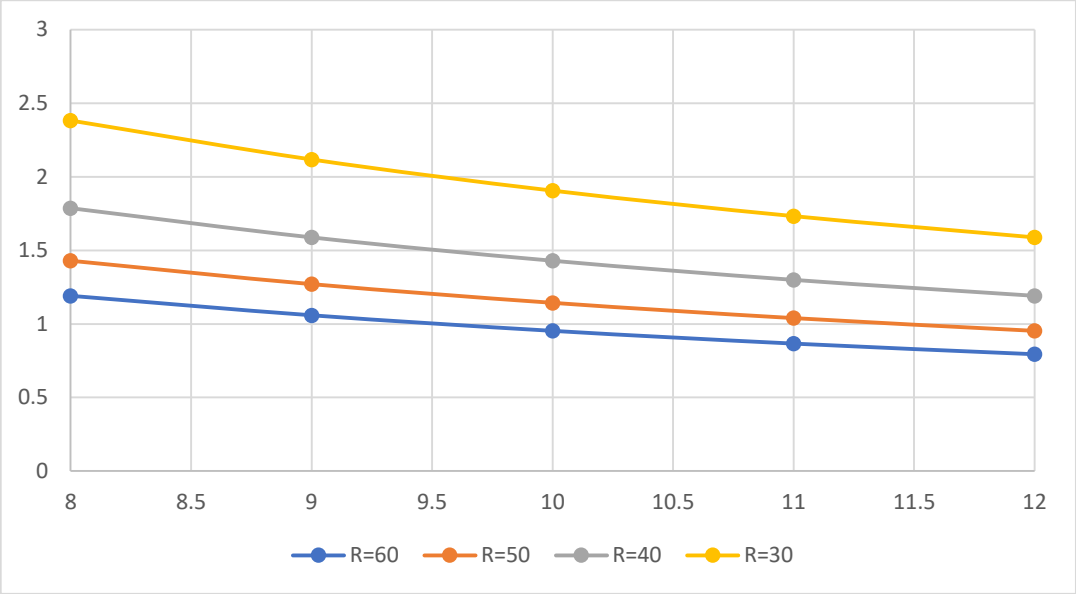


Рисунок 2.5 – Залежність ефективності місії 1 від часу виконання місії для різних рівнів використаних ресурсів

Залежність ефективності місії 1 від часу та енергоресурсів представлено на рис. 2.6.

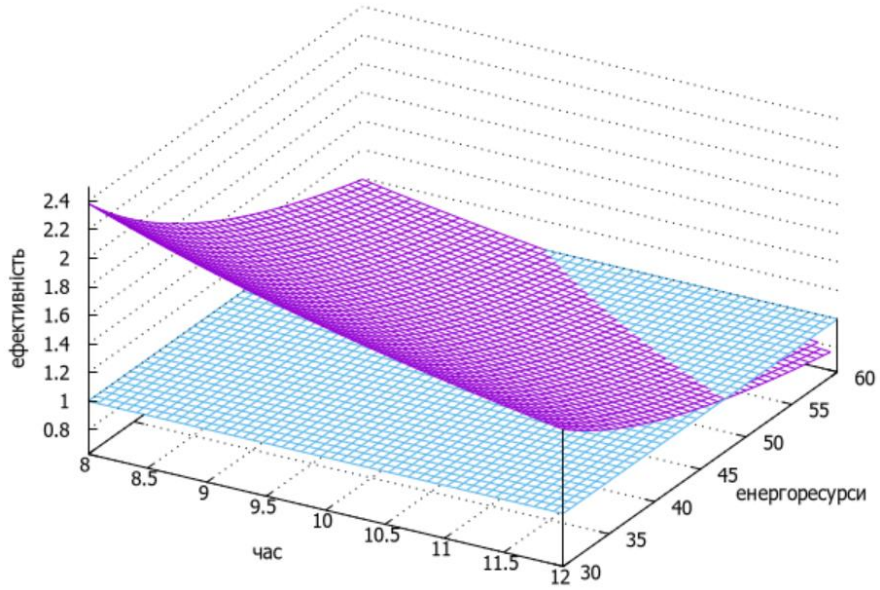


Рисунок 2.6 – Залежність ефективності місії 1 від часу та енергоресурсів

Поверхня на рівні одиничної ефективності умовно розподіляє можливі значення ефективності місії 1 – для рівня ресурсів R=50 та часу T близко 9,5 год ефективність переходить в зону менше 1.

На рис. 2.7 наведено порівняння залежностей ефективності від часу та ресурсів для місій 1, 2.

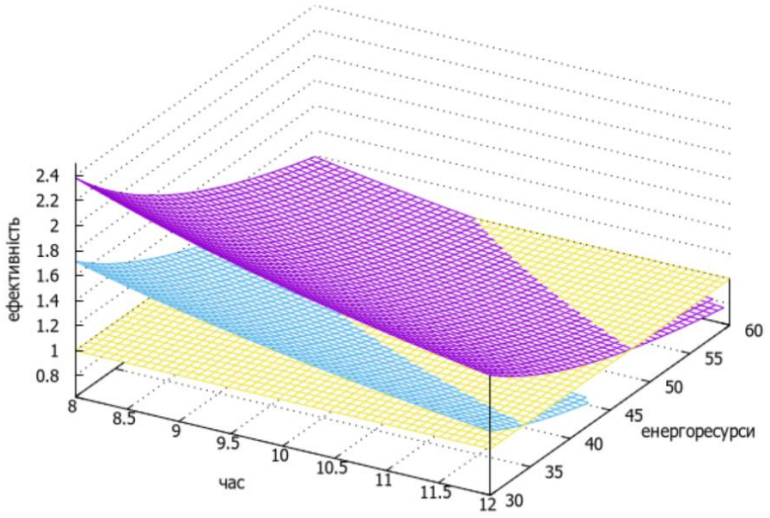


Рисунок 2.7 – Залежність ефективності місій 1, 2 від часу та енергоресурсів

Вплив обмежень за енергоресурсами на ефективність за однакових значень часу та використаних ресурсах місії 1 наведено на рис. 2.7.

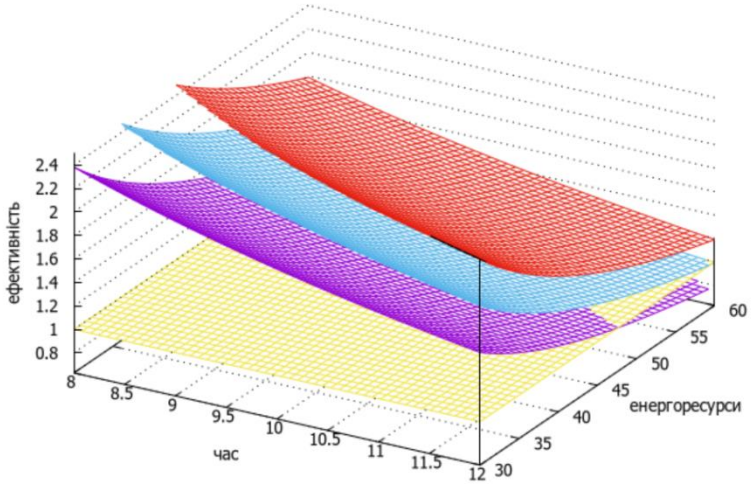


Рисунок 2.8 – Залежність ефективності від часу та енергоресурсів для трьох варіантів обмежень за часом місії 1 (T*=12, 15, 18 год)

Червона поверхня навіть при рівні витрачених енергоресурсів R=60 (що перевищує регламентовані R*=50) не перетинає «одиничну» ефективність, тому що час як ресурс використовується мінімально.

Отже, як висновок, отримані значення ефективності відповідним чином реагували на зміни вхідних даних в процесі експериментальних розрахунків, що обґрунтовує достовірність запропонованого методу.

Необхідно зауважити, що такий ретельний аналіз запропонованого показника ефективності для АМТЗ був необхідним, оскільки цей *показник вводиться вперше*.

На відміну від прийнятих у судноплавстві показників ефективності, даний п*оказник є універсальним, тому що він базується на врахуванні виконання завдань як результату з урахуванням їх вагомості для місії.* Саме тому даний показник можна поширити на будь-які об’єкти та процеси, які передбачають оцінку виконаних завдань як основного результату у співвідношенні до витрачених ресурсів (часу, енергоресурсів, тощо), що не передбачає оцінку результату в грошових одиницях, як це традиційно було прийнято у судноплавстві [140].

До речі, якщо в якості автономного морського транспортного засобу розглядається автономне вантажне судне, яке здійснює перевезення між двома портами (що зараз тестується у пілотних проєктах), то запропонована формула оцінки ефективності АМТЗ (2.12) набуває вигляду:

$$I_E = 1 \cdot \frac{T^*}{T} \cdot \frac{R^*}{R}, \qquad (2.13)$$

з урахуванням тільки одного завдання місії, а саме, *перевезення вантажів*. Даний показник доповнює традиційний показник ефективності – тайм-чартерний еквівалент (ТЧЕ), характеризуючи саме *експлуатаційний аспект виконання завдання, на відміну від комерційного*.

Показник ТЧЕ також враховує енергоресурси *R* та час виконання завдання *T*, але *R* враховується у грошовому еквіваленті як одна зі складових витрат рейсу. Якщо рівень фрахтової ставки достатньо високий, то навіть додаткові витрати на бункерування можуть не дуже вплинути на економічну ефективність. Отже, I_E дозволяє оцінити саме *експлуатаційну ефективність, як результат інтегрованого функціонування усіх систем АМТЗ в умовах певної місії,* тому він характеризує зовсім інший аспект АМТЗ, ніж традиційний показник ефективності ТЧЕ [141].

Якщо крім енергоресурсів та часу необхідно врахувати ще інші ресурси (або деталізувати енергоресурси за видами), то запропонований показник ефективності експлуатації можна представити у наступному загальному вигляді:

$$I_E = I_M \cdot \prod_{j=1}^{J} \frac{R_j^*}{R_j} = \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i I_{M_i} \right) \cdot \prod_{j=1}^{J} \frac{R_j^*}{R_j}, \qquad (2.14)$$

де R_j^*, R_j – планові та фактичні значення витрачених ресурсів *j*-го виду в рамках виконання місії, *J* – загальна кількість видів ресурсів. Чим менша кількість витрачених ресурсів у порівнянні з плановими кількостями, тим більше значення $\prod_{j=1}^{J} \frac{R_j^*}{R_j}$, що, у свою чергу, збільшує значення показника I_M, який характеризує успіх місії, тобто *виконання її завдань*.

Для аналізу ефективності мають значення обидва основні показники – інтегральна оцінка виконання місії I_M, що характеризує *успіх місії з точки зору виконання завдань,* та власне *оцінка ефективності* I_E. Перша оцінка дає змогу зробити остаточні висновки щодо другої. Наприклад, якщо значення I_M недостатньо високе (тобто значно менше 1), проте ефективність I_E висока (тобто її значення більш 1), це свідчить про те, що завдання, які виконані, чи їх

частка, виконані з високою ефективністю з точки зору ресурсів – часу та енергоресурсів. Якщо I_M близько до 1, тобто завдання виконані майже у необхідному обсязі, проте I_E менше за 1, то це означає, що завдання виконані з перевищенням використаних ресурсів. Отже, дані приклади висновків демонструють інтегральний аналіз запропонованих показників.

Попередні результати стосувалися *окремих місій АМТЗ*, далі необхідно поширити їх *на певний період часу*, тому що це відповідає логіці аналізу ефективності у будь-якому контексті для будь-якого процесу [142].

Отже, однакові місії (як аналог рейсу) мають різні показники успіху (виконання завдань) та ефективності, але для аналізу ефективності експлуатації АМТЗ за певний період (декілька місій) необхідно визначити загальну ефективність із урахуванням окремих значень за місіями. Для цього пропонується використовувати наступний показник ефективності експлуатації АМТЗ за певний період часу:

$$I_E(t) = \frac{\sum_{k=1}^{K} \left(T_k \cdot I_E^k \right)}{\sum_{k=1}^{K} T_k}, \qquad (2.15)$$

де t – період часу, що розглядається, K – кількість виконаних місій за цей період, T_k – тривалість місій, I_E^k – ефективність виконання кожної місії в рамках даного періоду часу, $\sum_{k=1}^{K} T_k$ – загальний час виконання місій в рамках встановленого періоду.

Вираз $0 < \frac{T_k}{\sum_{k=1}^{K} T_k} < 1$ характеризує вагу кожної місії в загальному часі t виконання місій.

Таким чином, (2.15) визначає середньозважену оцінку ефективності виконання місій за певний період.

Слід зазначити, що $\sum_{k=1}^{K} T_k$ не обов'язково дорівнює *t*, фактично $\sum_{k=1}^{K} T_k \le t$, тому що не весь період часу АМТЗ виконує місії. Таким чином оцінюється саме той період у межах*t*, коли АМТЗ фактично виконував завдання.

Наступне зауваження до (2.15): даний показник передбачає, що вагомість кожної місії визначається її часом. Проте можливі ситуації, коли місії проводилися в різних умовах складності, або сутність місій можна диференціювати за ступенем складності завдань. Отже, в окремих умовах забезпечити ефективність апріорі складніше, ніж у других з урахуванням як сутності місій так й умов їх виконання [143].

Тому пропонується ще інша версія (2.15), яка враховує особливості місій на базі введення вагових коефіцієнтів, які відображають «складність» умов та завдань місії. Отже, узагальнена оцінка складності місії:

$$I_E(t) = \frac{\sum_{k=1}^{K} \mu_k \cdot I_E^k}{\sum_{k=1}^{K} \mu_k}, \qquad (2.16)$$

де $0 < \mu_k \le 1$ – ваговий коефіцієнт *складності експлуатаційних умов k*-ої місії.

Таким чином, більш вагомою при розрахунку усередненої ефективності є ефективність найскладнішої місії. Отже, ефективність експлуатації АМТЗ за певний період визначається з урахуванням складності, з якою впорався або не в повному обсязі автономний морський транспортний засіб.

Доцільно визначати дані вагові коефіцієнти наступним чином:

$$\mu_k = \sum_{l=1}^{L} \varphi_l \cdot \lambda_l^k, \qquad (2.17)$$

де $0 < \varphi_l < 1$ – вага впливу *l*-го фактору складності місії, *L* – загальна кількість прийнятих факторів складності експлуатації АМТЗ в рамках місії, які можна розподілити за групами, або прийняти як одну множину.

У межах цього переліку факторів можна визначити дві основні групи – зовнішнього та внутрішнього характеру. До факторів с*кладності експлуатації АМТЗ* зовнішнього характеру можна віднести: *навігаційні умови, погодні умови, зв'язок з оператором.* Як приклад деталізації даного переліку:

– щільність суднопотоку, вузькі протоки, канали, небезпечні зони;

– штормові умови, температура, вологість, обмерзання;

– затримки в передачі даних, відмова зв'язку [144].

До внутрішніх факторів *складності експлуатації* слід віднести складність місії з точки зору маршруту та сутності завдань. Отже, вагові коефіцієнти μ_k складності експлуатаційних умов місії ґрунтуються на системі факторів впливу та їх вагомості φ_l. Сліз зазначити, що μ_k характеризує складність власне місії без урахування технічних факторів, які пов'язані зі станом АМТЗ, якщо прийняти, що експлуатаційний стан АМТЗ в рамках періоду часу, що розглядається, відносно однаковий.

Умова $\sum_{l=1}^{L} \varphi_l = 1$ обґрунтовує виконання $0 < \mu_k \le 1$. Отже, *складність місії* оцінюється на базі системи факторів, які характеризують *складність умов експлуатації, маршруту та завдань.*

Аналогічний підхід застосовано до узагальненого показника *інтегральної оцінки виконання місій у межах певного періоду часу t.* Пропонується два варіанти оцінки:

$$I_M(t) = \frac{\sum_{k=1}^{K} \left(T_k \cdot I_M^k \right)}{\sum_{k=1}^{K} T_k}, \qquad (2.18)$$

де I_M^k – інтегральний показник виконання *k*-ої місії;

$$I_M(t) = \frac{\sum_{k=1}^{K} \mu_k \cdot I_M^k}{\sum_{k=1}^{K} \mu_k}. \qquad (2.19)$$

Вираз (2.18) відображає успішність виконання завдань місій без урахування складності експлуатаційних умов, (2.19) враховує їх. Отже, в залежності від прийнятого підходу до оцінки ефективності застосовується той чи інший варіант.

Для прикладу, що розглядався вище, розраховані узагальнені показники виконання та ефективності місії протягом періоду часу *t*. Приймаємо, що п’ять зазначених місій було виконано у цей період часу в відносно однакових умовах експлуатації, тому *не враховуємо складність експлуатаційних умов* місій [145].

Ефективність для даного періоду часу складає $I_E(t) = 1,224$, показник виконання місій $I_M(t) = 0,839$.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що протягом періоду часу, що розглядається, показник виконання значно нижче 1, що свідчить про незадовільний рівень виконання завдань у необхідному обсязі, хоча ефективність перевищує 1, що свідчить про ефективне використання часу та енергоресурсів *для того обсягу завдань*, що були виконані повністю або частково.

Якщо для місії 2 завдання 3, 6, які для початкового набору вхідних даних визначено як невиконані взагалі, прийняти як виконані у встановлених межах m_3, m_6, тоді $I_E(t) = 1,31$, $I_M(t) = 0,9$. Отже, інтегральна оцінка виконання завдань місій підвищується на цей період часу, ефективність також зростає, що узгоджується зі змінами вхідних даних.

Для ситуації, коли застосовується другий підхід до оцінки усередненої ефективності на базі (2.16). Для наступних значень вагових коефіцієнтів складності експлуатаційних умов місій

$$\mu_1 = 0,8; \mu_1 = 0,9; \mu_1 = 1; \mu_1 = 0,6; \mu_1 = 0,5$$

отримали значення $I_E(t) = 1,354$, показник виконання місій $I_M(t) = 0,835$. Таким чином, ефективність з урахуванням складності умов експлуатації став вище, проте рівень виконання завдань майже однаковий. Отже, місія 3 має найвищий рівень ефективності та складності, тому при врахуванні складності місії, дана ефективність найбільшим чином вплинула на усереднене значення. На рис. 2.9 наведені результати розрахунків значень ефективності за місіями та їх усереднене значення за двома варіантами розрахунків (перший – на базі (2.15), другий – у відповідності до (2.16).

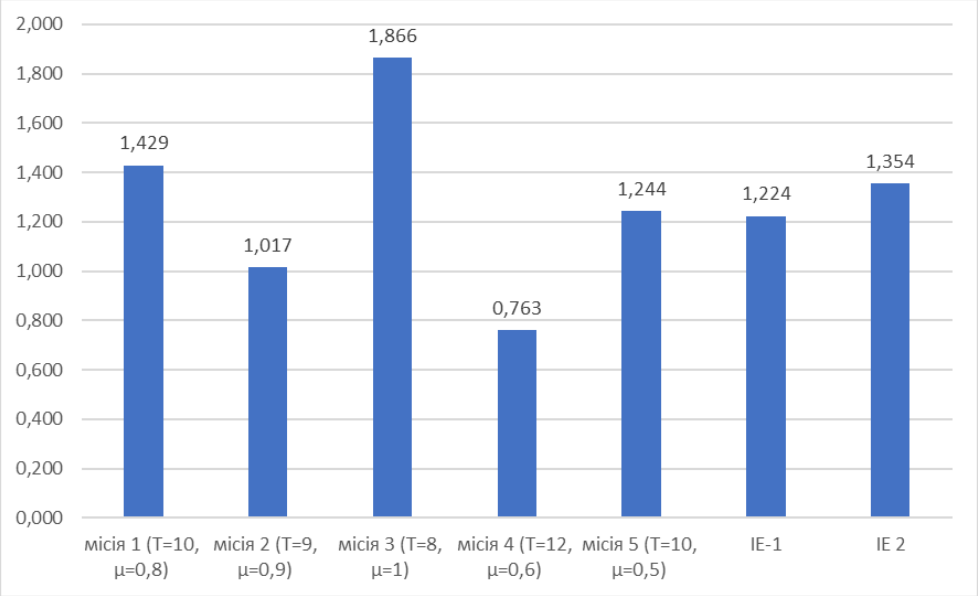


Рисунок 2.9 – Порівняння ефективності місій та усереднених значень за двома варіантами розрахунків

Для ситуації, коли *час є не ресурсом, а частиною завдання* (наприклад, виконання моніторингу та охорони певної акваторії чи інфраструктури саме протягом певного періоду часу, тощо) *інтегральний показник виконання місії* необхідно відкоригуватинаступним чином:

$$I'_M = \frac{T}{T^*} \cdot \sum_{i=1}^{n} \alpha_i I_{M_i}. \qquad (2.20)$$

Якщо фактичний час виконання завдань менш, ніж встановлений термін, то $\frac{T}{T^*}<1$, інтегральна оцінка успіху виконання завдань у відповідності до (2.20) зменшується. В такій ситуації ефективність набуває наступний вигляд:

$$I'_E = I'_M \cdot \frac{R^*}{R} = \left(\frac{T}{T^*} \cdot \sum_{i=1}^{n} \alpha_i I_{M_i} \right) \cdot \frac{R^*}{R}. \qquad (2.21)$$

Показники виконання завдань та ефективності експлуатації за певний час для даної ситуації трансформуються відповідним чином. Фактично, коли час є частиною завдань місії, змінюється тільки інтегрована оцінка виконання місії, враховуючи час T (2.20). Оцінка ефективності не змінюється формально. Якщо необхідно врахувати складність умов експлуатації для місій, то використовується підхід, який був запропонований вище.

Пропонуючи нову концепцію та відповідний метод оцінки ефективності експлуатації АМТЗ, в даному дослідженні *не пропонується шкала розподілу оцінок*. Мається на увазі, що не надаються певні умови щодо значень $I_M^k, I_E^k, I_M(t), I_E(t)$ у наступному вигляді:

$$I_M^k, I_E^k, I_M(t), I_E(t) \le Q^1 \qquad (2.22)$$

низькій рівень виконання, ефективності;

$$Q^1 < I_M^k, I_E^k, I_M(t), I_E(t) \le Q^2 \qquad (2.23)$$

достатній рівень виконання, ефективності;

$$I_M^k, I_E^k, I_M(t), I_E(t) > Q^2 \qquad (2.24)$$

високій рівень виконання, ефективності,

де $0 < Q^1, Q^2 < 1$ – межі різних рівнів виконання та ефективності.

Наявність умов (2.20–2.24) необхідна для *інтерпретації результатів* оцінки виконання місій та ефективності експлуатації. Проте встановлення певних значень Q^1, Q^2 потребує розгляду певного типу АМТЗ з урахуванням його основного призначення. Це аналогічно показникам економічної ефективності – для деяких видів діяльності рентабельність 15 % є високою, для інших – достатньо низькою. Тому подальший розвиток запропонованих результатів потребує збір та вивчення статичних даних щодо певних типів АМТЗ та певних варіантів їх використання з урахуванням загальних умов їх експлуатації (наприклад, експлуатація в небезпечному регіоні або в регіоні з постійно складними погодними умовами, тощо). Таким чином, практичне впровадження методів оцінки використання АМТЗ та їх ефективності потребує встановлення певних меж для різних рівнів їх застосування [146, 147].

На рис. 2.10 представлено деталізацію архітектоніки формування системи показників оцінювання ефективності АМТЗ при реалізації парадигми місійно-орієнтованого підходу. У межах запропонованої моделі кожна автономна місія декомпозується на сукупність елементарних завдань M_i, для яких встановлюється мультипараметричний опис, що охоплює рівень реалізації, граничні пороги виконання, вагові коефіцієнти пріоритетності, а також часові та енергетичні обмеження.

Сформований на цій основі інтегральний показник виконання місії відображає не лише результативність досягнення цільових орієнтирів, а й ресурсну ціну реалізації операцій у конкретних умовах функціонування. Методологія передбачає верифікацію ефективності через призму фактичної тривалості місії, інтенсивності споживання ресурсів та складності експлуатаційного середовища. Введення адаптивних коефіцієнтів дозволяє формалізувати вплив навігаційних, кліматичних та інформаційних факторів на загальну продуктивність платформи. На відміну від класичних транспортних

метрик, представлена модель забезпечує комплексне mission-oriented assessment, що встановлює чіткий аналітичний зв’язок між операційним успіхом, витратами та зовнішніми збуреннями в умовах алгоритмічної невизначеності.

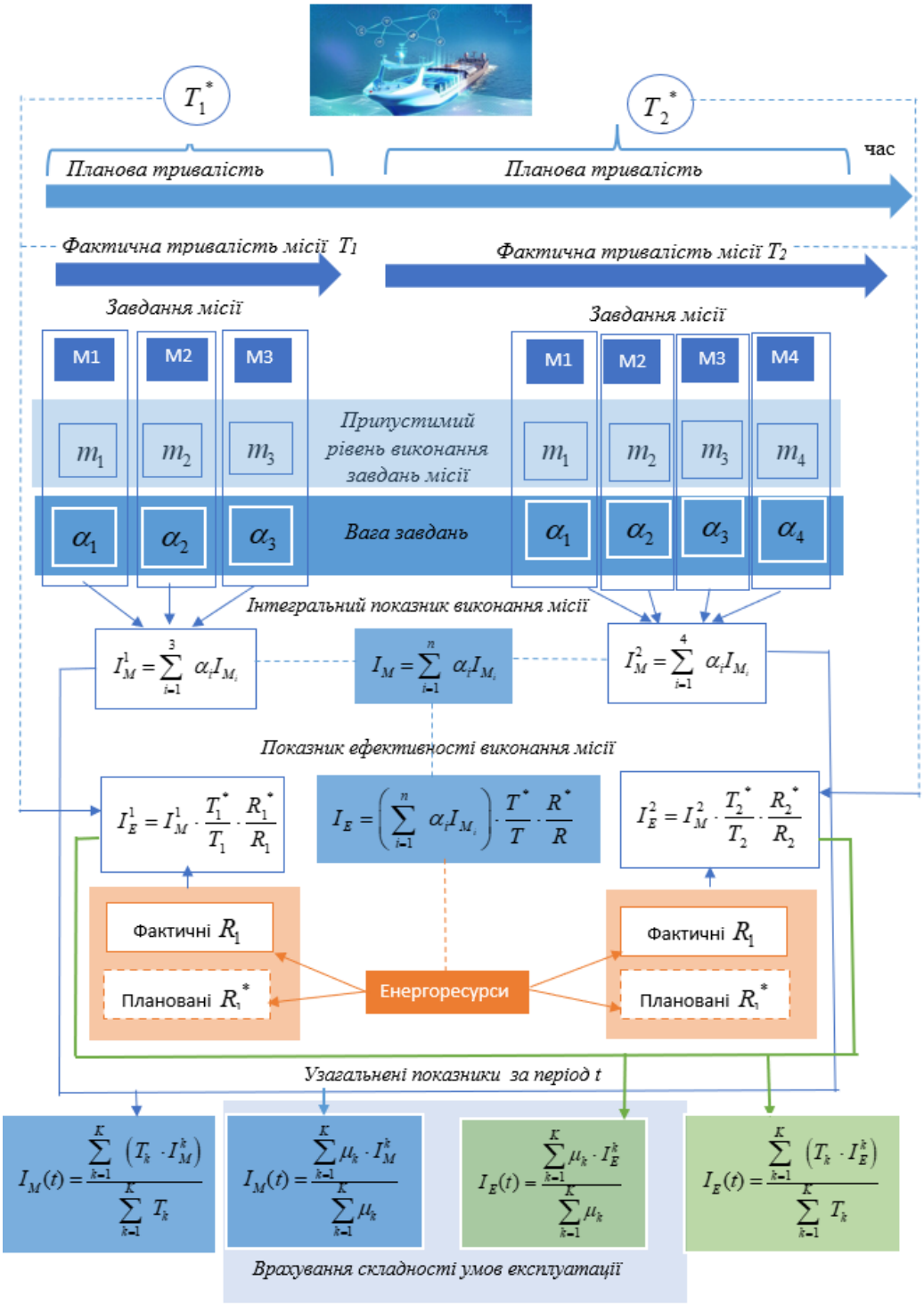


Рисунок 2.10 – Логіка формування показників ефективності експлуатації АМТЗ

Підсумовуючи, за результатами експлуатації АМТЗ необхідним є аналіз виконання та ефективності в термінах «місій», як більш широкого поняття, ніж «рейс» з урахуванням мультизадачності та різноманітності АМТЗ, що охоплює значне більшу кількість завдань АМТЗ ніж для звичайних суден у традиційному їх використанні для морських перевезень вантажів. Отже, місія – це аналог рейсу, множина завдань – аналог традиційного перевезення (виконання транспортної роботи), виконання місій – сутність експлуатації АМТЗ [148].

Введено до розгляду нову термінологію: «місія», «завдання місії», «успіх місії», «ефективність місії», що ґрунтується на розгляді експлуатації АМТЗ з урахуванням особливостей їх призначення як послідовності місій (аналогів послідовності рейсів).

Сукупність завдань, яка перевищує одне завдання – перевезення вантажів звичайними морськими транспортними засобами, обґрунтовує необхідність оцінювання успіху виконання завдань, для чого запропоновано новий показник *інтегральна оцінка виконання місії,* що враховує вагу кожного завдання та плановані показники мінімального обсягу виконання завдань.

На базі інтегральної оцінки виконання місії розроблено показник *ефективності виконання місії*з урахуванням фактичних та планованих значень часу виконання місії та використаних енергоресурсів, що системно *охоплює усі основні фактори впливу*. Дані показники розроблено для двох варіантів експлуатації АМТЗ: *коли час є ресурсом и коли час є частиною місії (завдань)*.

Для аналізу показників оцінки виконання та ефективності експлуатації АМТЗ *за певний період часу*запропоновані відповідні формули, які надають *середньозважені оцінки успіху та ефективності* з урахуванням тривалості кожної місії у періоді часу, що розглядається. Окремо розроблені аналогічні формули для ситуації, коли необхідно врахувати складність умов експлуатації АМТЗ в процесі виконання місій, для цього введено до розгляду вагові *коефіцієнти складності місій,* які формуються на базі оцінювання системи

факторів впливу, *відображаючи навігаційні, погодні умови, складність маршруту та завдань, якість зв'язку з оператором АМТЗ,* що охоплює основні фактори впливу [149, 150].

Наведені результати призначені для аналізу фактичних результатів експлуатації АМТЗ за структурою «завдання-місія-період часу». Проведено експериментальні розрахунки на умовних даних, які обґрунтували достовірність запропонованих результатів.

2.3 Методи та моделі прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів

Вище розглянуті питання оцінки ефективності АМТЗ за фактом вже здійсненної експлуатації. На досягнення певного рівня результатів виконання завдань та ефективності АМТЗ впливає система факторів, як зовнішнього , так і внутрішнього характеру. Їх вплив обумовлює досягнення або недосягнення планованих результатів в процесі експлуатації.

Ефективність виконання автономної місії визначається не лише рівнем виконання окремих завдань або ресурсними витратами, а й комплексним впливом зовнішніх та внутрішніх факторів функціонування АМТЗ. В умовах автономної експлуатації морська платформа функціонує як складна багаторівнева система, у межах якої результативність місії залежить від взаємодії технічних підсистем, стану зовнішнього середовища, інформаційного забезпечення та режимів управління.

Особливого значення набуває вплив стохастичних факторів, пов'язаних із:

– кліматичними умовами;

– навігаційною обстановкою;

– інформаційною невизначеністю;

– зміною технічного стану підсистем;

– аварійними та відмовними ситуаціями.

У зв’язку з цим виникає необхідність формалізованого представлення структури факторів, що визначають результативність виконання автономної місії та рівень ефективності функціонування АМТЗ. Запропоновану систему взаємозв’язків між основними підсистемами автономної платформи та факторами впливу наведено на рис. 2.11.

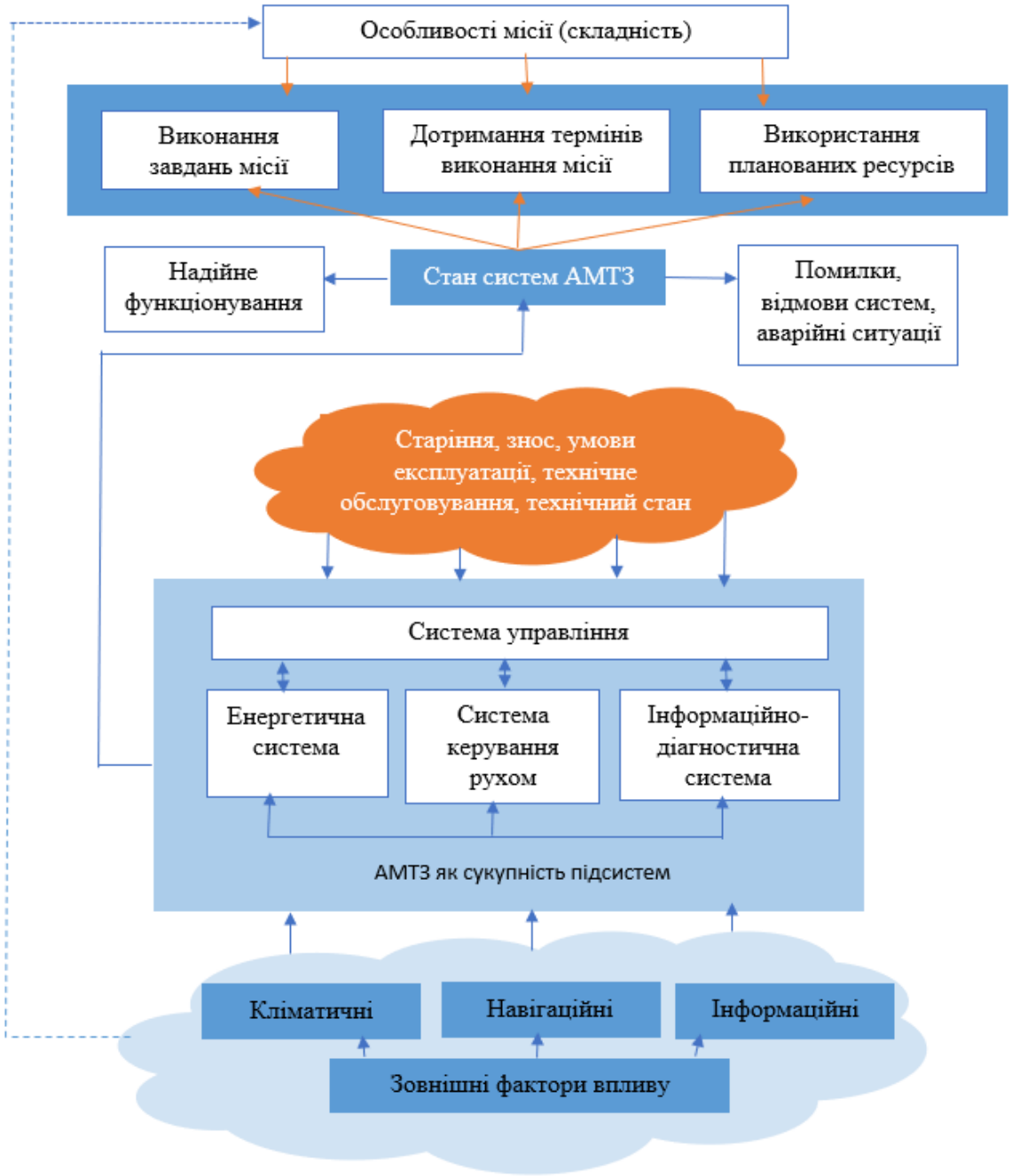


Рисунок 2.11 – Вплив системи факторів на результати виконання місії

Автономні морські транспортні засоби можна уявити у вигляді системи, яка складається з чотирьох підсистем, кожна з яких є окремою системою з власними особливостями:

– енергетична система,

– система керування рухом,

– інформаційно-аналітична система,

– система управління.

Їх і*нтегрований стан обумовлює або надійну експлуатацію АМТЗ*, або наявність помилок, відмов систем та аварійних ситуацій. Приймаємо, що корпус АМТЗ є апріорі у необхідному стані, а увагу у даному дослідженні приділено саме тим системам, які пов’язані з *автономною роботою АМТЗ*. Стан систем АМТЗ обумовлює успішність та ефективність виконання місії. Особливості місії у контексті її складності з точки зору завдань та специфіки маршруту також впливають на результати виконання місії [151].

Перш за все, стан систем АМТЗ залежить від їх технічного стану, умов експлуатації (у тому числі, якості планових ремонтів, технічного обслуговування), а також природних процесів старіння та зносу.

До зовнішніх факторів відносяться три основні групи факторів – кліматичні, навігаційні та інформаційні. До *кліматичних факторів* відносяться погодні умови – швидкість вітру, висота хвилі, температура, *навігаційні фактори* охоплюють щільність суднопотоку, характеристики протоків, каналів, небезпечні зони. *Інформаційні фактори,* пов’язані з кібербезпекою та якістю зв’язку оператора з АМТЗ [152].

З урахуванням стохастичного характеру морського середовища та багатофакторної природи впливу зовнішніх і внутрішніх факторів ефективність виконання місії має розглядатися не лише як детермінований результат, а як імовірнісна характеристика здатності АМТЗ забезпечувати необхідний рівень функціонування протягом місії.

Отже, до початку місії необхідно оцінити (спрогнозувати) ймовірність того, що місія буде виконана ефективно, тобто:

$$P_{\text{eff}} = P\left(I_E \geq I_E^*\right) = P\left(\bigcap_{i=1}^{n}\{M_i \geq m_i\} \cap \{T \leq T^*\} \cap \{R \leq R^*\}\right). \qquad (2.25)$$

У виразі (2.25) подія ефективного виконання місії визначається як одночасне виконання всіх завдань не нижче встановлених допустимих рівнів, дотримання часових обмежень та неперевищення запланованого обсягу енергоресурсів.

Умова (2.26) задає мінімально допустимий рівень імовірності ефективного виконання місії, який має бути забезпечений до її початку:

$$P_{\text{eff}} \geq P^*, \qquad (2.26)$$

де $P*$ – мінімально допустима ймовірність ефективного виконання місії.

Оскільки виконання умов (2.25) залежить від функціонального стану систем управління, енергетичної системи, системи керування рухом та інформаційно-діагностичної системи, подальше прогнозування ефективності місії здійснюється через оцінювання ймовірності збереження надійного експлуатаційного стану ключових систем АМТЗ протягом місії. Такий перехід дозволяє пов’язати місійно-орієнтований критерій ефективності з технічним станом АМТЗ та впливом зовнішніх і внутрішніх факторів ризику.

У даному випадку використовується умовна ймовірність виконання завдань місії в необхідному обсязі за наявності обмежень за часом та енергоресурсами, оскільки виконання завдань залежить від часу та енергоресурсів. Для забезпечення виконання (2.26) необхідно, щоб усі системи АМТЗ за прогнозованого впливу зовнішнього середовища мали необхідний рівень надійності та перебували в необхідному експлуатаційному стані.

Для цього розглянемо більш детально оцінку ймовірності того, що усі системи АМТЗ знаходяться у необхідному стані та будуть залишатися у даному стані під впливом системи факторів впливу [153].

Введемо наступні позначення:

C_1, C_2, C_3, C_4 – високий рівень надійності та відмінний експлуатаційний стан систем АТМЗ,відповідно, системи управління, енергетичної системи, системи керування рухом, інформаційно-діагностичної системи *протягом виконання місії*;

$P(C_1), P(C_2), P(C_3), P(C_4)$ – ймовірності надійного експлуатаційного стану систем АМТЗ протягом місії.

Ймовірність ефективного виконання місії, тобто виконання (2.26), можна вважати ймовірністю надійного експлуатаційного стану всіх систем АМТЗ протягом місії з урахуванням їх початкового стану та прогнозів впливу відповідних системних *факторів*. Для визначення ймовірності надійного стану пропонується вирішувати завдання від зворотного, тобто визначити *ймовірність порушення надійної експлуатації* АМТЗ. Для цього скористуємося підходами до оцінки ризиків, які розглядалися для різних систем та сукупності факторів впливу в дослідженнях [154], використовуючи їх як ідею врахування факторів впливу та результатів їх дії. Згідно з [155], для врахування нерівнозначного впливу факторів, вводяться до розгляду вагові коефіцієнти, які забезпечують переваги певних факторів у контексті ризику порушення стану системи, що розглядається.

Нехай C_v – подія надійного експлуатаційного стану v-ої системи АМТЗ протягом місії, $v = 1,\ldots,4$. Тоді:

$$P_A(C) = P\left(\bigcap_{v=1}^{4} C_v\right), \qquad (2.27)$$

де A – сукупність факторів впливу протягом місії, C – надійний експлуатаційний стан АМТЗ протягом місії, відповідно $\overline{C}$ – ненадійний стан, тому $P_A(\overline{C})$ характеризує ймовірність порушення надійного експлуатаційного стану АМТЗ або ймовірнісною оцінкою ризика порушення надійного стану АМТЗ.

Під надійним експлуатаційним станом АМТЗ розумітимемо *надійний експлуатаційний стан всіх систем*, що розглядаються. Отже, якщо *навіть одна з систем знаходиться у ненадійному стані*, то АМТЗ вважається також таким, що є у ненадійному експлуатаційному стані.

За умови незалежності станів систем або як інженерна апроксимація першого рівня:

$$P_A(C) = \prod_{v=1}^{4} P_A(C_v), \tag{2.28}$$

де $\overline{C}_1, \overline{C}_2, \overline{C}_3, \overline{C}_4$ – ненадійний експлуатаційний стан окремих систем АМТЗ протягом місії під впливом системи факторів.

Системи, що розглядаються можуть потрапити у ненадійний стан незалежно одна від одної, крім того, системи можуть одночасно перебувати у ненадійному стані, отже, з урахуванням сумісності $\overline{C}_1, \overline{C}_2, \overline{C}_3, \overline{C}_4$ $P_A(\overline{C_1} + \overline{C_2} + \overline{C_3} + \overline{C_4})$ набуває наступний вигляд: $P_A(\overline{C_1} + \overline{C_2} + \overline{C_3} + \overline{C_4}) = 1 - \sum_{v=1}^{4} P_A(1 - \overline{C}_v)$, оцінює ймовірність того, що хоча б одна з систем протягом місії стане ненадійною.

Ймовірність порушення надійного експлуатаційного стану хоча б однієї системи:

$$P_A(\overline{C}) = 1 - \prod_{v=1}^{4} P_A(C_v) = 1 - \prod_{v=1}^{4} \left(1 - P_A(\overline{C_v})\right) \tag{2.29}$$

Формула (2.29) використовується як інженерна апроксимація ймовірності порушення надійного експлуатаційного стану хоча б однієї з ключових систем АМТЗ. У випадку наявності статистично підтверджених залежностей між відмовами систем добуткова модель може бути замінена моделлю залежностей або правилом включення-виключення. У межах даного дослідження приймається припущення про умовну незалежність систем на рівні експертно-ймовірнісної оцінки ризику. Тому для оцінювання надійності АМТЗ протягом місії, необхідно оцінити ймовірність ненадійного стану кожної системи під час місії під впливом системи факторів [156].

У подальшому викладі ймовірності порушення надійного експлуатаційного стану використовуються як інтегральні експертно-ймовірнісні оцінки ризику. При цьому залежності між окремими факторами впливу не моделюються явно, а враховуються опосередковано через систему вагових коефіцієнтів та експертних оцінок. Такий підхід дозволяє забезпечити практичну придатність моделі для задач прогнозування ефективності експлуатації АМТЗ в умовах обмеженості статистичних даних.

Розглянемо більш детально структуру системи факторів впливу. З урахуванням викладеного вище, A є інтегрованою множиною, яка складається з наступних множин факторів впливу на експлуатаційний стан АМТЗ протягом місії:

– A_1 – кліматичні фактори;

– A_2 – навігаційні фактори;

– A_3 – інформаційні фактори;

– A_4 – техніко-технологічні фактори.

Перші три множини факторів вище були вже охарактеризовані, що стосується A_4 – це фактори впливу внутрішнього характеру, пов’язані з надійністю та технологічним рівнем систем АМТЗ, тобто характеризують, наскільки «розумна» АМТЗ та наскільки вона перебуває в необхідному

експлуатаційному стані з урахуванням її віку, технічного обслуговування, зносу тощо.

Кожна з зазначених множин факторів впливу складається з елементів $A_l^1, A_l^2, ..., A_l^g, A_l^{G_l}, l = \overline{1,4}$, $G_l, l = \overline{1,4}$ – потужність даних множин. У свою чергу кожен елемент характеризується певними можливими значеннями, приймаємо, що кожному фактору впливу A_l^g відповідає множина можливих значень:

$$A_l^{gh}, l = \overline{1,4}, h = \overline{1, H_l^g}, g = \overline{1, G_l}, \qquad (2.30)$$

де H_l^g – потужність множини (кількість) можливих значень певного фактору впливу з певної групи (множини) факторів впливу.

Добуткова форма виразу (2.30) використовується для врахування одночасного впливу ймовірності виникнення фактора, його інтенсивності та ступеня прояву в межах конкретної системи АМТЗ. Якщо хоча б один із компонентів наближається до нуля, сумарний вплив відповідного фактора також зменшується, що відповідає логіці ризик-орієнтованого оцінювання.

Наприклад, для фактору висота хвилі – можливі у даному регіоні значення висоти хвилі у метрах. Для певного АМТЗ сукупність факторів впливу умовно постійна, їх можливі значення залежать від регіону та також є умовно постійними (умовно – тому що з урахуванням зміни клімату, зміни напруженості судноплавних шляхів, політичних подій та т.п. з'являються нові фактори впливу та змінюються варіанти можливих значень у вже прийнятих до увазі факторів впливу) [157].

Кожному значенню фактору впливу відповідає певна ймовірність $P(A_l^{gh}), l = \overline{1,4}, h = \overline{1, H_l^g}, g = \overline{1, G_l}$, для певного часового проміжку з урахуванням регіону експлуатації АМТЗ та його особливостей. Таким чином, мова йде про закон розподілу A_l^g в певний момент часу для певного регіону та АМТЗ зі значеннями A_l^{gh} та їх ймовірностями $P(A_l^{gh})$.

Вплив кожного фактора не є однаковим, окремі фактори впливають дуже сильно на експлуатаційний стан АМТЗ, деякі фактори впливають з меншим ступенем [158].

Таким чином, далі розглядаємо послідовно різні рівні ймовірності надійного стану систем АМТЗ:

– рівень впливу *певного фактору* певної групи факторів на певну систему АМТЗ;

– рівень впливу *певної групи факторів* на певну систему АМТЗ;

– рівень впливу *усіх груп факторів* на певну систему АМТЗ;

– рівень впливу *всіх груп факторів інтегровано – на всі* системи АМТЗ.

Приймаємо, що $0 \le \beta_{lv}^{gh} \le 1$ – експертним шляхом встановлені вагові коефіцієнти факторів впливу, які у даному випадкуінтерпретуються як експертно визначені коефіцієнти впливу факторів на надійний експлуатаційний стан відповідної системи АМТЗ за умови, що даний фактор A_l^g прийняв певне значення A_l^{gh} з ймовірністю $P(A_l^{gh})$. Таким чином, отримаємо наступний вираз:

$$P_{A_l^g}(\overline{C}_v) = \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh}), v = \overline{1,4}, l = \overline{1,4}, g = \overline{1,G_l}, \qquad (2.31)$$

який оцінює *повну ймовірність надійності певної системи АМТЗ* під впливом фактору A_l^g з урахуванням його розподілу.

Вираз (2.31) не описує ймовірність спільної появи незалежних подій, а реалізує процедуру агрегування впливу факторів ризику в межах експертно-аналітичної моделі. Тому використання зваженої суми відповідає задачі інтегрального оцінювання рівня ризику, а не класичному обчисленню сумісних імовірностей подій.

Коментар щодо сутності β_{lv}^{gh}: наприклад розглядається фактор «висота хвилі», якщо висота хвилі приймає значення «1 м», то це ніяк майже не впливає

на надійність усіх систем АМТЗ, тому відповідне значення β_{lv}^{gh} або 0, або близько до 0. Якщо фактор «висота хвилі» приймає значення «3 м», то для окремих систем АМТЗ це значно вплине на їх надійний стан, тому відповідне значення β_{lv}^{gh} буде вже ближче до 1. Отже, чим більш вплив на надійність у контексті ризику її порушення, тим більш значення β_{lv}^{gh}, та навпаки, якщо певне значення фактору не впливає на порушення надійності систем, то відповідне значення β_{lv}^{gh} зменшується або приймає значення 0.

Отже, $\beta_{lv}^{gh} = 0$, якщо певне значення фактору не впливає на ризик порушення надійності, $\beta_{lv}^{gh} = 1$, якщо певне значення фактора обумовлює 100 % порушення надійності системи.

Подальший розгляд (2.31) на іншому рівні – *рівні певної групи факторів* обумовлює наступний вираз для ймовірності *надійності певної системи АМТЗ* під впливом *певної групи факторів*:

$$P_{A_l}(\overline{C}_v) = \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} \cdot P_{A_l^g}(\overline{C_v}) = \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh}), \quad l = \overline{1,4}, v = \overline{1,4}, \tag{2.32}$$

де $0 \le \lambda_{lv}^{g} < 1, l = \overline{1,4}, g = \overline{1,G_l}, v = \overline{1,4}$ – вагові коефіцієнти, які відображають нерівнозначний вплив кожного фактору у кожній групі факторів. Значення вагових коефіцієнтів β_j визначаються експертним шляхом та характеризують відносну важливість окремих факторів ризику у межах відповідної групи факторів впливу.

Для даних коефіцієнтів необхідною є вимога:

$$\sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} = 1, l = \overline{1,4}, v = \overline{1,4}. \tag{2.33}$$

Умова (2.33) забезпечує нормування вагових коефіцієнтів та збереження інтерпретації інтегральної оцінки ризику в межах одиничного інтервалу.Дані вагові коефіцієнти приймають різні значення для різних систем АМТЗ, враховуючи, що саме для певної системи АМТЗ вплив певного фактору з групи вищу, ніж для іншої системи.

Слід зазначити, що аналогійний підхід використаний для всіх інших рівнів розгляду ймовірності ризику порушення надійності систем АМТЗ протягом місії. На цьому рівні здійснюється інтеграція впливу окремих груп факторів (кліматичних, навігаційних, інформаційних та техніко-технологічних) на надійний експлуатаційний стан системи АМТЗ.

На рівні *впливу усіх груп факторів на певну систему* АМТЗ ймовірність її надійного стану визначається наступним чином:

$$P_A(\overline{C}_v) = \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} P_{A_l}(\overline{C}_v) = \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_l^g P_{A_l^g}(\overline{C}_v) = \\ = \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^g \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh}), v = \overline{1,4}, \tag{2.34}$$

де $0 \le \gamma_{lv} < 1$ – вагові коефіцієнти груп факторів, які для кожної системи приймають відповідні значення, задовольняючи умовам:

$$\sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} = 1, v = \overline{1,4}. \tag{2.35}$$

Нормування коефіцієнтів груп факторів дозволяє уникнути зміщення результатів оцінювання ризику та забезпечує порівнюваність результатів для різних систем АМТЗ.

Далі розглядаємо рівень *впливу усіх груп факторів інтегровано на системи АМТЗ* у відповідності до (2.29).

Для забезпечення коректності інтегральної оцінки ризику всі вагові коефіцієнти факторів та груп факторів попередньо нормуються відповідно до умов (2.33) та (2.35):

$$P_A(\overline{C}) = P_A(\overline{C_1} + \overline{C_2} + \overline{C_3} + \overline{C_4}) = 1 - \prod_{v=1}^{4} (1 - P_A(\overline{C}_v)) = \\ = 1 - \prod_{v=1}^{4} \left(1 - \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh})\right). \quad (2.36)$$

Вираз (2.36) визначає інтегральну оцінку ризику порушення надійного експлуатаційного стану АМТЗ з урахуванням впливу всіх основних груп факторів протягом виконання місії, їх диференціації з точки зору впливу на кожну систему як на рівні групи факторів, так й на рівні окремого фактору групи. Такий підхід відповідає реальним умовам експлуатації АМТЗ у контексті ризику її порушення під впливом системи факторів [159].

У свою чергу ймовірність *надійного експлуатаційного стану АМТЗ протягом місії* складає:

$$1 - P_A(\overline{C}) = 1 - P_A(\overline{C_1} + \overline{C_2} + \overline{C_3} + \overline{C_4}) = \prod_{v=1}^{4} (1 - P_A(\overline{C}_v)) = \\ = \prod_{v=1}^{4} \left(1 - \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh})\right), \quad (2.37)$$

де

$$P_A(C) = 1 - \sum_{l=1}^{4} \gamma_{lv} \sum_{g=1}^{G_l} \lambda_{lv}^{g} \sum_{h=1}^{H_l^g} \beta_{lv}^{gh} \cdot P(A_l^{gh}) \quad (2.38)$$

ймовірність *надійного експлуатаційного стану* v-ої системи АМТЗ.

Отже, ймовірність надійного експлуатаційного стану АМТЗ протягом місії обумовлює ймовірність ефективного виконання місії, що було обґрунтовано раніше. Узагальнюючи вищевикладене, запропонований метод

оцінки (прогнозування) надійного експлуатаційного стану АМТЗ протягом місії схематично представлений на рис. 2.12.

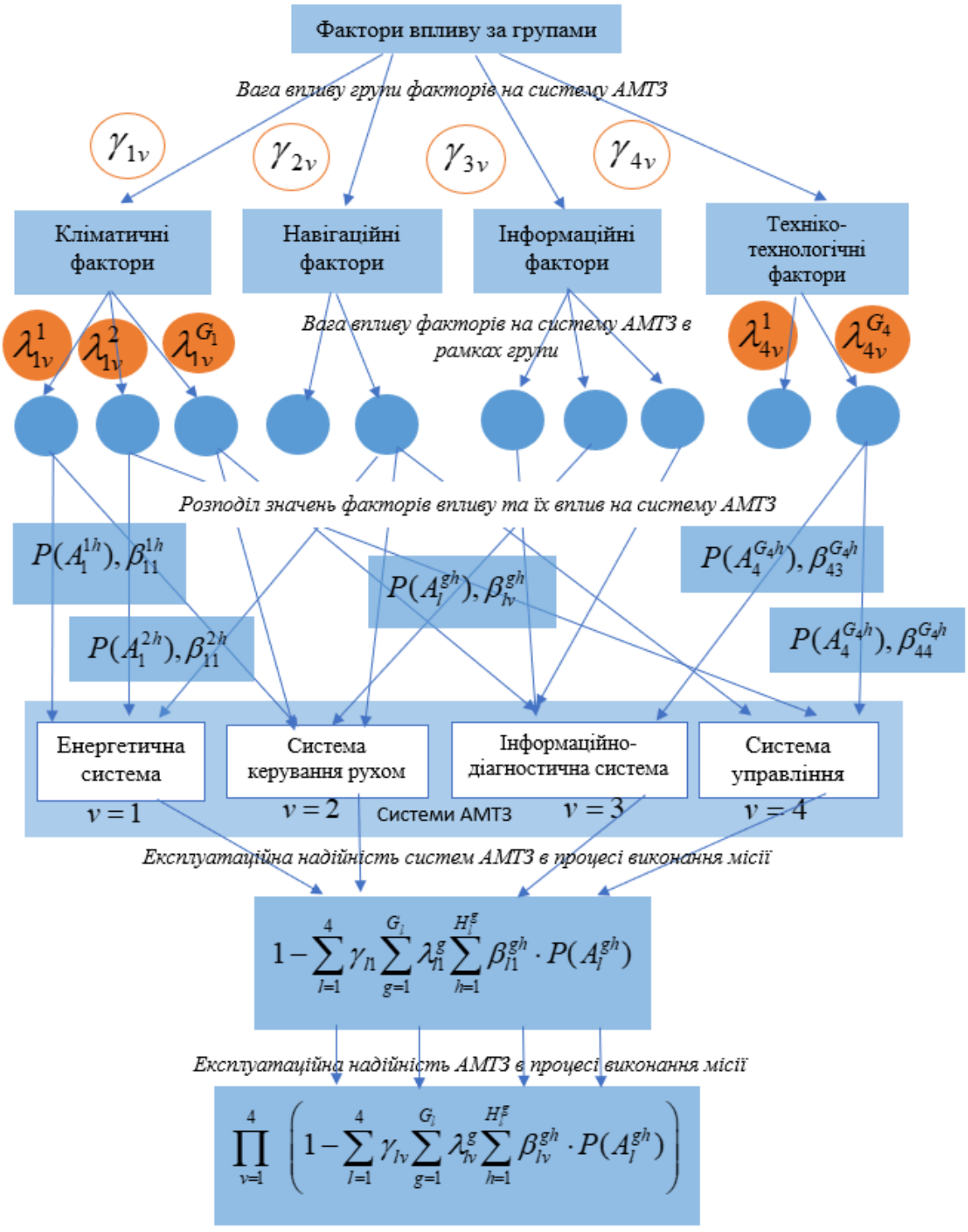


Рисунок 2.12 – Метод оцінки (прогнозування) надійного експлуатаційного стану АМТЗ протягом місії

Експериментальна перевірка запропонованого методу проведена на умовних даних, прийнято до увазі по три фактору впливу в рамках груп кліматичних, навігаційних та інформаційних факторів впливу та чотири фактори у четвертій групі – техніко-технологічних факторів. Для кожного фактору розглядається п’ять можливих значень. Вихідні дані щодо розподілу ймовірностей значень факторів впливу наведено у табл. 2.3. Вплив певних значень факторів на кожну систему β_{lv}^{gh} наведено у табл. 2.4–2.7.

Наведені числові дані в табл. 2.3–2.8 мають демонстраційний характер та використовуються для ілюстрації працездатності запропонованого підходу.

Таблиця 2.3 – Розподіл ймовірностей значень факторів впливу

	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A_3– інформа-ційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення 1	0,7	0,1	0,3	0,05	0,01	0,025	0,05	0,1	0,9	0,2	0,3	0,7	0,05
значення 2	0,1	0,5	0,2	0,05	0,09	0,025	0,05	0,08	0,025	0,2	0,2	0,1	0,05
значення 3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,7	0,025	0,8	0,01	0,025	0,5	0,2	0,1	0,05
значення 4	0,05	0,1	0,1	0,6	0,1	0,025	0,05	0,01	0,025	0,05	0,1	0,05	0,8
значення 5	0,05	0,1	0,2	0,2	0,1	0,9	0,05	0,8	0,025	0,05	0,2	0,05	0,05

Таблиця 2.4 – Вплив певних значень факторів впливу на систему 1

	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A^3– інформа-ційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення 1	0,01	0,05	0	0	0,1	0,1	0	0	0,05	0,1	0	0	0
значення 2	0	0,02	0	0,12	0	0	0	0	0,15	0,3	0	0	0
значення 3	0	0	0,3	0,2	0	0,07	0	0	0,2	0,01	0,02	0,05	0,06
значення 4	0,1	0	0,2	0,08	0,5	0	0	0,2	0	0,09	0,01	0	0,01
значення 5	0,1	0	0	0	0	0,2	0	0	0,4	0,1	0,2	0	0

Таблиця 2.5 – Вплив певних значень факторів впливу на систему 2

	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A_3– інформа-ційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення1	0,02	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0,05	0,2	0,1	0	0	0
значення 2	0,05	0,08	0	0,03	0	0	0	0,05	0,1	0,03	0	0	0
значення 3	0	0	0,3	0,3	0	0,09	0	0	0	0,09	0,03	0,1	0,5
значення 4	0,1	0	0,2	0,2	0,5	0	0,8	0	0	0,09	0,078	0	0
значення 5	0,1	0	0	0	0	0,2	0,5	0	0	0	0,09	0	0

Таблиця 2.6 – Вплив певних значень факторів впливу на систему 3

	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A_3– інформа-ційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення1	0,2	0	0	0	0,1	0,06	0	0	0,8	0	0	0,01	0
значення 2	0	0	0	0,04	0	0	0	0	0,1	0	0	0,02	0
значення 3	0	0	0,13	0,15	0	0,08	0	0	0	0	0	0,02	0
значення 4	0,1	0	0,2	0,18	0,5	0	0	0	0	0	0	0,03	0
значення 5	0,1	0	0	0	0	0,09	0	0	0	0	0	0,04	0

Таблиця 2.7 – Вплив певних значень факторів впливу на систему 4

	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A_3– інформа-ційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення1	0,2	0,15	0	0	0	0,15	0	0	0	0	0	0	0
значення 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
значення 3	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0,06
значення 4	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09
значення 5	0,07	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,08

У табл. 2.8 наведені розрахунки складових (2.37). Прийнято, що вагові коефіцієнти груп однакові для кожної системи та дорівнюють:

$$\gamma_{1v} = 0,2; \gamma_{2v} = 0,3; \gamma_{3v} = 0,2; \gamma_{4v} = 0,4.$$

Таблиця 2.8 – Розрахунки ймовірностей ненадійного експлуатаційного стану систем АМТЗ

	ВАГА ГРУПИ 0,2			ВАГА ГРУПИ 0,3			ВАГА ГРУПИ 0,2			ВАГА ГРУПИ 0,4			
	СИСТЕМА 1												
	A_1– кліматичні фактори			A_2– навігаційні фактори			A_3– інформаційні фактори			A_4– техніко-технологічні фактори			
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення 1	0,007	0,005	0	0	0,001	0,0025	0	0	0,045	0,02	0	0	0
значення 2	0	0,01	0	0,006	0	0	0	0	0,003	0,06	0	0	0
значення 3	0	0	0,06	0,02	0	0,00175	0	0	0,005	0,005	0,004	0,005	0,003
значення 4	0,005	0	0,02	0,048	0,05	0	0	0,002	0	0,004	0,001	0	0,008
значення 5	0,005	0	0	0	0	0,18	0	0	0,01	0,005	0,04	0	0
Вплив	**0,017**	**0,015**	**0,08**	**0,074**	**0,051**	**0,18425**	**0**	**0,002**	**0,063**	**0,094**	**0,045**	**0,005**	**0,011**
Вага	0,2	0,7	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
Вплив групи			0,0219			0,1112			0,026				0,0333
З вагою			0,0043			0,03336			0,005				0,01332
	СИСТЕМА 2												
значення 1	0,014	0,01	0	0	0,001	0,0025	0	0,005	0,18	0,02	0	0	0
значення 2	0,005	0,04	0	0,0015	0	0	0	0,004	0,002	0,006	0	0	0
значення 3	0	0	0,06	0,03	0	0,00225	0	0	0	0,045	0,006	0,01	0,025
значення 4	0,005	0	0,02	0,12	0,05	0	0,04	0	0	0,004	0,007	0	0
значення 5	0,005	0	0	0	0	0,18	0,02	0	0	0	0,018	0	0
вплив	**0,029**	**0,05**	**0,08**	**0,1515**	**0,051**	**0,18475**	**0,06**	**0,009**	**0,182**	**0,075**	**0,031**	**0,01**	**0,025**
вага	0,2	0,7	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
Вплив групи			0,0488			0,13465			0,084				0,03346
З вагою			0,0097			0,04039			0,016				0,01338

Продовження табл. 2.8

	СИСТЕМА 3												
	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43	A44
значення 1	0,14	0	0	0	0,001	0,0015	0	0	0,72	0	0	0,007	0
значення 2	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0,002	0	0	0,002	0
значення 3	0	0	0,026	0,015	0	0,002	0	0	0	0	0	0,002	0
значення 4	0,005	0	0,02	0,108	0,05	0	0	0	0	0	0	0,001	0
значення 5	0,005	0	0	0	0	0,081	0	0	0	0	0	0,002	0
вплив	**0,15**	**0**	**0,046**	**0,125**	**0,051**	**0,0845**	**0**	**0**	**0,722**	**0**	**0**	**0,014**	**0**
вага	0,2	0,7	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
Вплив групи			0,0346			0,0866			0,289				0,0029
З вагою			0,0069			0,02598			0,057				0,00116
	СИСТЕМА 4												
значення 1	0,14	0,015	0	0	0	0,00375	0	0	0	0	0	0	0
значення 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
значення 3	0	0	0	0	0	0,00125	0	0	0	0	0	0	0,003
значення 4	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,072
значення 5	0,003	0	0	0	0	0,09	0	0	0	0	0	0	0,004
вплив	**0,148**	**0,015**	**0**	**0**	**0**	**0,095**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0,079**
вага	0,2	0,7	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4
Вплив групи			0,0401			0,038			0				0,0316
З вагою			0,0080			0,0114			0				0,01264

Ймовірності ризику порушення надійної експлуатації систем АМТЗ під впливом системи факторів складають:

$$P_A(\overline{C_1}) = 0,056; P_A(\overline{C_2}) = 0,08; P_A(\overline{C_3}) = 0,09; P_A(\overline{C_4}) = 0,032 .$$

Підсумковий результат – ймовірність порушення надійної експлуатації АМТЗ під час місії:

$$P_A(\overline{C}) = 0,237 .$$

Дана ймовірність відповідає ситуації, коли хоча одна з систем АМТЗ протягом місії під впливом системи факторів характеризується як ненадійна з експлуатаційної точки зору. Для прикладу, що розглядається, отримане значення свідчить про достатньо високий ризик порушення надійної експлуатації протягом місії.

Слід зауважити, що в даному дослідженні не пропонується певна шкала для ідентифікації ситуації щодо ризику порушення надійного експлуатаційного стану АМТЗ. У сучасних публікаціях, які присвячені визначенню рівнів ризику для різних технічних систем пропонуються різні версії, тому в залежності від відношення до ризику особи, які приймає рішення, можна скористатися тим чи іншим варіантом.

В якості прикладу такої диференціації можна навести наступний:

– $P_A(\overline{C}) \le 0,1$ – ризик мінімальний;

– $0,1 < P_A(\overline{C}) \le 0,2$ – ризик помітний;

– $0,2 < P_A(\overline{C}) \le 0,3$ – ризик середній;

– $P_A(\overline{C}) > 0,3$ – ризик високий.

Наведена шкала рівнів ризику має експертно-інтерпретаційний характер і призначена для практичного оцінювання результатів прогнозування надійного експлуатаційного стану АМТЗ. Граничні значення інтервалів сформовано на

основі експертних оцінок та використовують для класифікації рівня ризику під час прийняття експлуатаційних рішень. Отже, висновок, який було зроблено, базувався саме на такому підході.

В процесі експериментальних розрахунків здійснювалася варіація розподілом ймовірностей впливу факторів, вагових коефіцієнтів для груп та окремих факторів. Результати оцінки ризику порушення надійного експлуатаційного стану необхідним чином реагували на зміни даних.

На рис. 2.13, 2.14 наведені результати оцінки ризику порушення надійної експлуатації систем та АМТЗ у цілому для різних варіантів вагових коефіцієнтів груп факторів впливу. Можна побачити, що для прийнятих вхідних даних збільшення ваги для групи інформаційних факторів та відповідне зменшення для групи техніко-технологічних факторів обумовлює збільшення ризику для усіх систем та АМТЗ в цілому.

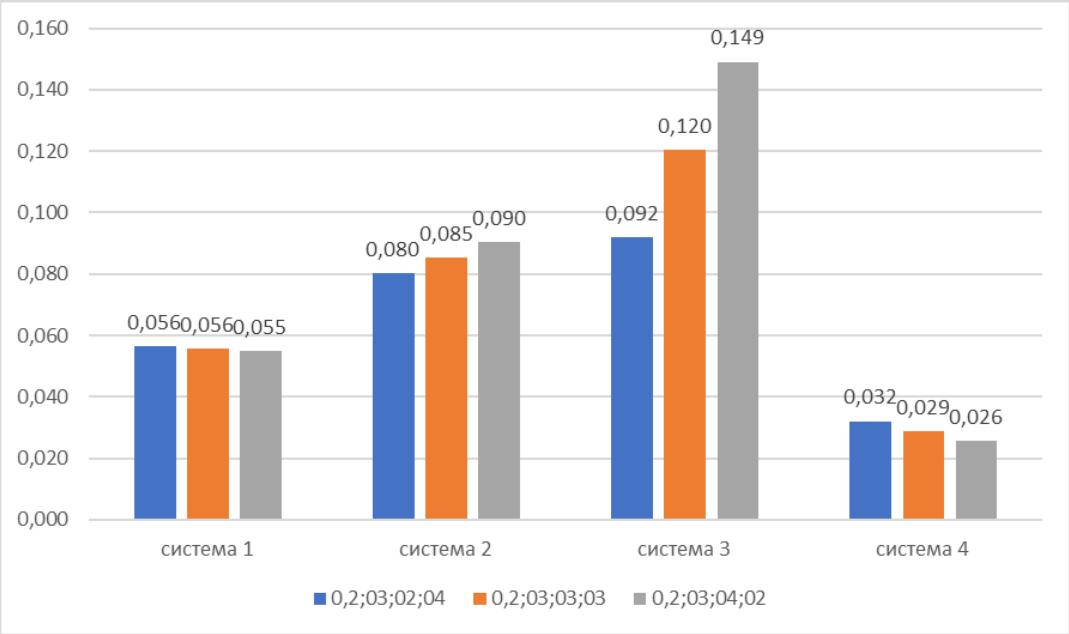


Рисунок 2.13 – Залежність ризику порушення надійного стану систем АМТЗ від вагових коефіцієнтів груп факторів впливу

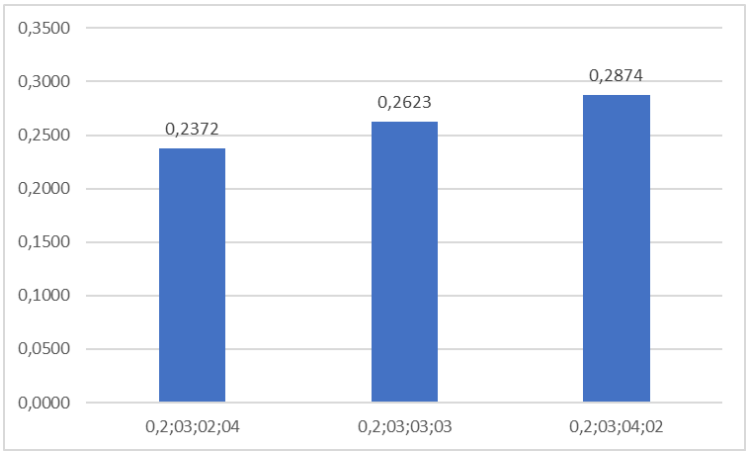


Рисунок 2.14 – Залежність ризику порушення надійного експлуатаційного стану АМТЗ в залежності від вагових коефіцієнтів груп факторів впливу

Запропонований метод передбачає суб'єктивне оцінювання вагових коефіцієнтів, наприклад, з залученням експертів. Проте наявність певного досвіду у експертів та підтримуючих статистичних даних дозволить обґрунтувати певні значення вагових коефіцієнтів з високою достовірністю. Практична реалізація запропонованого методу також передбачає врахування особливостей певного виду АМТЗ, зокрема його місій, регіону експлуатації, складності маршруту тощо [160].

Отже, забезпечення необхідного рівня ефективності експлуатації АМТЗ ґрунтується на забезпеченні певного рівня надійного експлуатаційного стану АМТЗ як сукупності систем – енергетичної, системи керування рухом, інформаційно-діагностичної та системи управління. Надійний стан АМТЗ передбачає надійний стан усіх розглянутих систем. Розроблено метод оцінки ймовірності надійного експлуатаційного стану АМТЗ під впливом чотирьох груп факторів: кліматичних, навігаційних, інформаційних та техніко-технологічних. Перші три групи об'єднують зовнішні фактори та техніко-технологічні фактори, пов'язані безпосередньо зі техніко-технологічним станом і особливостями АМТЗ у контексті автономної роботи. Метод ґрунтується на поетапному оцінюванні впливу окремого фактору впливу на кожну систему, групи факторів, усіх груп факторів, що надає можливість оцінити надійність експлуатації в рамках місії.

2.4 Висновки до другого розділу

У розділі розроблено методологічні засади оцінювання та прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів на основі місійно-орієнтованого підходу, відповідно до якого результативність функціонування АМТЗ визначається не лише фактом виконання окремих операцій, а здатністю автономної системи забезпечувати виконання місії в умовах часових, енергетичних та функціональних обмежень.

Встановлено, що традиційні підходи до оцінювання ефективності морських транспортних систем, орієнтовані переважно на економічні або транспортно-технологічні показники, не забезпечують адекватного врахування мультизадачності автономних місій, стохастичного характеру зовнішнього середовища та адаптивної природи функціонування АМТЗ. У зв’язку з цим запропоновано нову концепцію ефективності експлуатації АМТЗ, у межах якої базовою одиницею оцінювання визначено «місію» як інтегровану сукупність завдань, часових обмежень та ресурсного забезпечення.

У межах дослідження введено та формалізовано систему нових понять: «місія», «завдання місії», «успіх місії», «ефективність місії», що формують єдину термінологічну основу для аналізу експлуатації автономних морських платформ різного призначення. Обґрунтовано, що поняття «місія» є значно ширшим за традиційний «рейс» та дозволяє уніфікувати підходи до оцінювання результативності АМТЗ незалежно від їх функціонального призначення.

Розроблено метод інтегрального оцінювання ефективності виконання автономних місій, що базується на синергії кількісних показників реалізації цільових завдань та їх пріоритетності, вираженої через систему вагових коефіцієнтів. Методологія передбачає безперервний моніторинг дотримання часових інтервалів та інтенсивності використання енергоресурсів, інтегруючи ці параметри з аналізом поточних умов функціонування АМТЗ. Такий комплексний підхід дозволяє отримати динамічну оцінку результативності

системи, що є критично важливим для оперативного коригування алгоритмів управління в умовах багатофакторної невизначеності.

На відміну від традиційних детермінованих підходів, запропонований показник інтегральної ефективності базується на багатофакторному аналізі, що враховує не лише фінальний факт виконання місії, а й повноту досягнення цільових завдань у синергії з рівнем споживання ресурсів та часовими характеристиками автономного функціонування. Такий підхід дозволяє здійснювати комплексну оцінку результативності АМТЗ в умовах високої ентропії середовища та змінних режимів експлуатації, забезпечуючи перехід від бінарної системи оцінювання до прецизійного вимірювання операційної доцільності кожного етапу місії.

Розроблено узагальнені показники ефективності експлуатації АМТЗ для окремої місії та для сукупності місій у межах заданого періоду часу. На відміну від існуючих локальних підходів, запропоновані моделі враховують:

– тривалість місій;

– складність експлуатаційних умов;

– пріоритетність завдань;

– структуру ресурсних витрат;

– неоднорідність умов функціонування автономних платформ.

Обґрунтовано доцільність введення вагових коефіцієнтів складності місій, що формуються на основі системи кліматичних, навігаційних, інформаційних та техніко-технологічних факторів впливу. Запропонований підхід дозволяє враховувати стохастичний характер експлуатаційного середовища та диференціювати ефективність функціонування АМТЗ залежно від рівня складності автономної місії.

Подальшого розвитку набули методи прогнозування ефективності експлуатації АМТЗ, що базуються на імовірнісному підході до оцінювання надійності стану автономних платформ. Запропонована багаторівнева модель дозволяє комплексно аналізувати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на функціональну стійкість критичних підсистем АМТЗ, зокрема енергетичного

комплексу, систем керування рухом та управління, а також інформаційно-аналітичного забезпечення. Такий підхід забезпечує перехід від констатації поточного стану до предиктивного моделювання працездатності платформи, що є фундаментом для превентивного управління ризиками в умовах тривалих автономних місій.

На відміну від існуючих підходів, запропонований метод прогнозування враховує інтегрований вплив кліматичних, навігаційних, інформаційних та техніко-технологічних факторів з використанням вагових коефіцієнтів впливу та імовірнісного опису ризику порушення надійного експлуатаційного стану АМТЗ протягом місії, що дозволяє здійснювати імовірнісну оцінку ефективності автономних місій і формувати основу для адаптивного управління, орієнтованого на ризики автономних морських систем.

Експериментальні розрахунки, виконані на умовних сценаріях функціонування автономних морських транспортних засобів, продемонстрували працездатність запропонованих моделей та їх чутливість до зміни вхідних параметрів місії, структури ресурсних витрат і часових обмежень. Отримані результати показали узгоджену зміну інтегральних показників ефективності залежно від рівня виконання завдань, використаних ресурсів та умов реалізації місії. Проведені дослідження підтвердили можливість практичного застосування розробленого методичного апарату для оцінювання та аналізу ефективності автономних місій. Разом із тим подальша валідація запропонованих моделей на фактичних експлуатаційних даних АМТЗ є перспективним напрямом подальших досліджень.

Отримані результати формують методологічне та математичне підґрунтя для подальшого розроблення алгоритмів адаптивного регулювання, корекції з урахуванням ризиків та інтелектуальних механізмів управління ефективністю АМТЗ у реальному масштабі часу, що розглядаються у наступних розділах дисертаційного дослідження.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [17–19, 22, 23, 26, 27, 45, 47, 51].

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ МОРСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

3.1 Формалізація задачі адаптивного управління морськими автономними платформами в умовах невизначеності

Стрімкий розвиток автономних технологій як надводних, так і підводних зумовив суттєву перебудову принципів функціонування сучасних морських транспортних систем. На відміну від конвенційних суден, автономні платформи функціонують у різних динамічних та змінних умовах морського середовища, де параметри зовнішнього впливу такі як вітер, хвилювання, течії та інші навантаження можуть істотно варіюватися у часі, що призводить до необхідності постійного коригування режимів роботи систем управління, і що неможливо забезпечити за допомогою фіксованих або жорстких традиційних стратегій керуваннях.

Функціонування морських автономних платформ у стохастичному середовищі супроводжується впливом великої кількості зовнішніх і внутрішніх факторів невизначеності, які змінюють динаміку системи в реальному масштабі часу. До таких факторів належать хвильові збурення, вітрові навантаження, течії, похибки навігаційних вимірювань, деградація технічних вузлів, нестабільність енергетичних підсистем, а також алгоритмічна невизначеність, пов’язана з адаптивними процедурами прийняття рішень.

У зв’язку з цим задача управління морською автономною платформою формулюється як задача багатокритеріального адаптивного керування в умовах стохастичної невизначеності та змінних режимів функціонування.

Стан морської автономної платформи описується вектором:

$$x(t) = [x_1(t) \;\; x_2(t) \;\cdots\; x_n(t)]^T \in R^n, \qquad (3.1)$$

де $x(t)$ – вектор стану системи; n – кількість координат стану.

До складу вектора стану включаються:

– координати платформи;

– швидкість руху;

– курс;

– кути крену та диференту;

– параметри енергетичного стану;

– індикатори деградації технічних вузлів.

Вектор стану морської автономної платформи може бути подано у вигляді

$$x(t) = \begin{bmatrix} \eta(t) \\ \nu(t) \\ e_b(t) \\ d(t) \end{bmatrix},$$

де $\eta(t)$ – координати та кути орієнтації; $\nu(t)$ – лінійні та кутові швидкості; $e_b(t)$ – рівень енергетичних ресурсів; $d(t)$ – показник деградації технічних вузлів.

Вектор керувальних дій визначається як:

$$u(t) = [u_1(t) \;\; u_2(t) \;\cdots\; u_m(t)]^T \in R^m, \qquad (3.2)$$

де $u(t)$ – керуючі впливи; m – кількість каналів управління.

До вектора керування входять:

– тяга рушіїв;

– азимутальні кути;

– параметри стабілізації;

– режими енергоспоживання;

– адаптивні коефіцієнти регуляторів.

Зовнішні збурення описуються вектором:

$$w(t) \in R^p, \qquad (3.3)$$

де $w(t)$ – сукупність зовнішніх впливів; p – кількість факторів невизначеності.

Для врахування різної природи невизначеності збурення подаються у вигляді: $w(t) = w_d(t) + w_s(t)$, де $w_d(t)$ – детерміновані збурення; $w_s(t)$ – стохастичні збурення.

До детермінованих збурень належать:

– прогнозовані хвильові процеси;

– регулярні течії;

– керовані зміни навантаження.

Стохастична складова враховує:

– випадкові пориви вітру;

– турбулентність;

– шум сенсорних систем;

– випадкові відмови;

– алгоритмічну нестабільність.

З урахуванням зазначених факторів динаміка системи описується нелінійною моделлю простору станів:

$$\begin{cases} M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau + \tau_w + \tau_c \\ \dot{\eta} = J(\eta)\nu \end{cases},$$

де η – вектор положення та орієнтації платформи в інерціальній системі координат; ν – вектор лінійних і кутових швидкостей у зв'язаній з корпусом системі координат; M – матриця інерції з урахуванням приєднаних мас; $C(\nu)$ – матриця коріолісових і відцентрових складових; $D(\nu)$ – матриця гідродинамічного демпфування; τ – вектор керуючих сил і моментів; τ_w та τ_c –

збурення, спричинені хвилюванням, вітром і течіями; $J(\eta)$ – матриця перетворення швидкостей між зв'язаною та інерціальною системами координат.

Для конкретизації фізичного змісту узагальненої моделі простору станів динаміку морської автономної платформи доцільно подати у стандартній формі рівнянь руху морського об'єкта:

$$\dot{x}(t) = f\left(x(t), u(t), w_d(t), w_s(t), t\right), \qquad (3.4)$$

де $f(\cdot)$ – нелінійний оператор динаміки системи. Вихідний вектор системи визначається як: $y(t) = h(x(t), u(t))$, де$h(\cdot)$ – оператор спостереження.

Узагальнений запис (3.4) використовується для подальшої побудови адаптивних алгоритмів керування, де фізична модель руху доповнюється енергетичними, інформаційними та деградаційними змінними стану.

Для забезпечення фізичної реалізованості системи вводиться обмеження на рівень невизначеності: $\| w(t) \| \le w_{\max}$, де $w_{\max}$ – допустима межа зовнішніх збурень.

Для детермінованих збурень може використовуватися жорстке обмеження $\| w(t) \| \le w_{\max}$. Для стохастичних складових коректнішою є ймовірнісна форма обмеження $P\{\|w(t)\| \le w_{\max}\} \ge 1-\varepsilon$, яка враховує можливість рідкісних екстремальних реалізацій зовнішнього середовища.

У межах даного дослідження задача адаптивного управління формулюється як мінімізація інтегрального функціоналу ефективності:

$$J(u) = \int_0^T \left[e^T(t) Q e(t) + u^T(t) R_u u(t) + \lambda R^*(t) \right] dt, \qquad (3.5)$$

де

$$e(t) = x(t) - x_{ref}(t).$$

де $e(t)$ – вектор похибки відносно еталонної траєкторії або бажаного режиму функціонування; $Q = Q^T \ge 0$ – матриця ваг похибки стану; $R_u = R_u^T > 0$ –

матриця ваг керуючих впливів; $R^*(t) \in [0;1]$ – нормований інтегральний показник ризику; λ – коефіцієнт вагомості ризикової складової; T – горизонт прогнозування.

Перший доданок функціоналу характеризує точність стабілізації системи, другий – енергетичні витрати керування, а третій враховує ризик втрати стійкості або порушення виконання місії.

Таким чином, запропонована постановка задачі адаптивного місійно-орієнтованого управління відрізняється від традиційних підходів тим, що процес керування розглядається не лише як задача стабілізації руху, а як комплексна задача забезпечення місійної ефективності в умовах багатофакторної невизначеності. При цьому функціонал управління одночасно враховує точність руху, енергетичні витрати, рівень інтегрального ризику та стійкість функціонування автономної платформи у динамічному середовищі.

Сформована формалізація створює необхідний математичний базис для подальшої конвергенції методів прогностичного керування (MPC), нечіткої логіки (fuzzy logic) та глибокого навчання з підкріпленням (reinforcement learning). Інтеграція технологій цифрових двійників (digital twins), систем підтримки прийняття рішень (DSS) та ризик-орієнтованого адаптивного менеджменту дозволяє трансформувати ці підходи у єдину багаторівневу систему управління ефективністю морських автономних платформ.

Впровадження адаптивних систем управління, здатних реагувати на зміни середовища та параметрів руху у реальному часі має висикоий науковий інтерес. Сучасні дослідження зосереджені на інтеграції предиктивних, робастних і штучно-інтелектуальних методів контролю, орієнтованих на підвищення стійкості, енергетичної ефективності та безпеки морських операцій.

Одним із найпоширеніших підходів є модельно-прогнозне управління (Model Predictive Control, MPC), яке забезпечує оптимальність процесу керування за рахунок прогнозування майбутніх станів системи, і в роботах [161,

162] продемонстровано, що MPC дає змогу ефективно регулювати енергетичні процеси та стабільність руху морських автономних платформ під час дії стохастичних збурень. Основним обмеженням MPC залишається його висока обчислювальна складність, що ускладнює застосування на малопотужних автономних системах [163].

Новим етапом розвитку стали методи підкріплювального навчання (Reinforcement Learning, RL), орієнтовані на самонавчання системи шляхом взаємодії із середовищем, у [164] запропоновано RL-контролер для сумісного управління кількома надводними апаратами, що показав здатність до формування стійких формацій у мінливих умовах. У [165] підтвердили ефективність багаторівневої RL-архітектури у застосуванні до автономних пошуково-рятувальних систем. Головною проблемою RL у морському контексті є потреба у великих обсягах даних і наявність цифрових двійників для безпечного навчання.

Поступово у практику впроваджуються гібридні системи, які поєднують MPC, fuzzy та RL-підходи. Праці [166, 167] продемонстрували, що такі архітектури забезпечують баланс між точністю, адаптивністю та швидкодією. Використання цифрових двійників (Digital Twin Systems), як показано у [168], дає змогу моделювати складні сценарії і прискорює навчання контролерів у віртуальному середовищі. Слід зазначити, що загальна тенденція полягає у створенні багаторівневих гібридних архітектур адаптивного управління, де локальний MPC забезпечує точне регулювання, нечітка логіка – інтерпретованість рішень, а RL – довгострокову оптимізацію. Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішеними питання реального часу, енергетичних обмежень та інтеграції різних типів контролерів у єдину автономну систему.

В табл. 3.1 наведено порівняльний аналіз методів adaptive control морських автономних платформ

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз методів adaptive control морських автономних платформ

Метод управління	Адаптивність	Урахування невизначеності	Управління, орієнтоване на виконання завдань	Робота в реальному часі	Основні обмеження	Похибка	Ризик
PID	Низька	Відсутнє	Відсутнє	Висока	Не адаптується до змін середовища	висока	високий
MPC	Середня	Часткове	Обмежене	Середня	Висока обчислювальна складність	середня	середній
Fuzzy Logic Control	Середня	Середнє	Часткове	Висока	Складність масштабування правил	середня	середній
Reinforcement Learning	Висока	Високе	Часткове	Низька	Потребує великих обсягів даних	низька	середній
Запропонована MPC–FLC–RL архітектура	Висока	Інтегроване	Повне	Адаптивна	Підвищені вимоги до інформаційної інтеграції	низька	низький

Запропонована архітектура MPC–FLC–RL забезпечує інтегроване врахування зазначених критеріїв у процесі прийняття рішень, що дозволяє реалізувати місійно-орієнтоване управління автономною платформою.

Проведене порівняння свідчить, що традиційні підходи до адаптивного керування (adaptive control approaches) переважно орієнтовані на розв'язання локальних задач стабілізації та навігації. Проте окремі існуючі методи не

дозволяють одночасно враховувати чинники стохастичної невизначеності, показники місійної ефективності, механізми адаптивного прийняття рішень (adaptive decision-making) та ризик-орієнтовану корекцію в межах єдиного інформаційного середовища [169–171].

На відміну від відомих рішень, розроблена архітектура на базі конвергенції MPC–FLC–RL забезпечує синергетичне поєднання прогностичного керування (predictive control), нечіткої адаптації (fuzzy adaptation) та навчання з підкріпленням (reinforcement learning). Це дозволяє реалізувати цілісний адаптивний менеджмент місії (adaptive mission management) у межах єдиного інтегрованого контуру управління ефективністю морської автономної платформи, гарантуючи її стійкість та результативність у динамічних умовах експлуатації.

Таким чином, сутність досліджуваної проблеми полягає у необхідності створення цілісного алгоритмічного забезпечення для адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ, що гарантувало б їхню функціональну стійкість, високу енергоефективність та навігаційну безпеку в умовах динамічного середовища. Запропонований науковий підхід базується на впровадженні багаторівневого зворотного зв’язку між масивами сенсорних даних, предиктивними моделями та аналітичними модулями підтримки прийняття рішень, що у своїй сукупності забезпечує автоматичну корекцію робочих режимів системи в реальному часі [172–174].

Застосування адаптивного управління, в свою чергу, дає змогу в динаміці змінювати параметри контролерів у відповідь на зміну стану системи або дії зовнішніх впливів, забезпечуючи стійкість і ефективність функціонування та виконання місій. Такий підхід набуває особливої актуальності в контексті довготривалих автономних моніторингових завдань, зокрема під час інспекції морських об’єктів, контролю інфраструктури та координації руху безекіпажних надводних апаратів (USV). Водночас більшість наявних рішень базуються на

спрощених моделях або ручному налаштуванні коефіцієнтів (gain scheduling), що обмежує їх універсальність та уніфікованість.

Слід зазначити, що у межах даного дослідження термін «морська автономна платформа» використовується як узагальнене поняття, що охоплює автономні морські технічні засоби, безекіпажні надводні апарати, автономні підводні апарати, а також гібридні роботизовані морські системи. Використання узагальненого терміна обумовлено необхідністю формалізованого опису інтегрованих автономних морських систем у межах єдиної методології управління ефективністю автономних місій.

3.2 Аналіз сучасних методів та архітектура багаторівневої адаптивної системи управління морськими автономними платформами

Серед сучасних методів, що демонструють високу ефективність в адаптивному керуванні, виділяють модельно-прогнозне управління (Model Predictive Control, MPC), нечітку логіку (fuzzy logic control) та підкріплювальне навчання (reinforcement learning, RL). Підхід MPC дозволяє формувати оптимальні керуючі дії з урахуванням фізичних обмежень системи та прогнозних моделей середовища. Методи нечіткої логіки забезпечують інтерпретованість і можливість використання експертних правил у процесі прийняття рішень а алгоритми підкріплювального навчання, у свою чергу, здатні самостійно навчатися оптимальним стратегіям управління на основі досвіду функціонування системи [175].

Однак інтеграція цих методів у єдину гібридну архітектуру для морських автономних систем залишається малодослідженою. Існує виразна наукова прогалина щодо побудови алгоритмічних структур адаптивного управління, які б поєднували предиктивну точність MPC, гнучкість нечіткої логіки та самонавчання RL у реальному часі.

Архітектура алгоритмічної системи

Архітектура алгоритмічної системи адаптивного управління побудована за багаторівневим принципом з чітким функціональним поділом між шарами сприйняття, оцінювання стану, прийняття рішень та виконання дій. Сенсорна підсистема (Perception Layer) охоплює широкий набір навігаційних та діагностичних сенсорів: GNSS/INS, гідроакустичні та РЛС, анемометри, лідарами, вітро-хвильові датчики, моніторинг енергетичного та технічногостану. Підсистема оцінювання стану (State Estimation) реалізує злиття даних із використанням фільтрів Калмана, UKF та байєсівських оцінювачів, одночасно виконуючи виявлення аномалій. Менеджер режимів і оцінка ризику (Mode & Risk Manager) класифікує ситуації, аналізує індикатори ризику та визначає відповідний режим функціонування платформи – крейсерський, оглядовий, швартовий, динамічного позиціонування (DP) або кооперативний. Контур розрахунку керування (Control Synthesis Layer) включає локальні регулятори (MPC, PID), надбудову з нечіткою логікою для адаптації до умов середовища, а також стратегічного агента на основі підкріпленого навчання (policy π) для довгострокової оптимізації. Блок оптимізації та планування (Optimization & Scheduling) розв’язує задачі швидкої оптимізації (QP / NLP), формує траєкторії, профілі швидкості та керує енергоспоживанням. Виконавча підсистема (Actuation) здійснює реалізацію керувальних дій через приводи, гребні гвинти, азимутальні рушії, буксирні модулі та стабілізаційні актуатори. Далі цифровий двійник і система запису данних (Digital Twin & Logging) забезпечують моделювання для прогнозної перевірки дій, зберігання подій і даних для подальшого аналізу та калібрування а комунікаційна підсистема відповідає за обмін даними між підсистемами та з зовнішніми об'єктами (V2X / V2V), реалізуючи шифрування, ідентифікацію та ізоляцію критичних контурів управління [176–180].

На рис. 3.1 представлено узагальнену архітектуру алгоритмічної системи адаптивного управління, побудовану за багаторівневим принципом. Вона охоплює три основні контури а саме швидкий, середній та повільний, які відрізняються часовими масштабами та функціональним призначенням.

Багаторівнева структура адаптивного управління

У межах запропонованої методології система adaptive mission-oriented management реалізується як багаторівнева ієрархічна структура керування, у якій окремі рівні відповідають різним часовим масштабам, типам управлінських рішень та ступеням невизначеності.

Необхідність побудови багаторівневої структури обумовлена тим, що процеси функціонування морських автономних платформ характеризуються різною динамікою зміни параметрів. Частина процесів має швидкоплинний характер та потребує високочастотного регулювання, тоді як стратегічні рішення формуються у більш повільних часових масштабах [181].

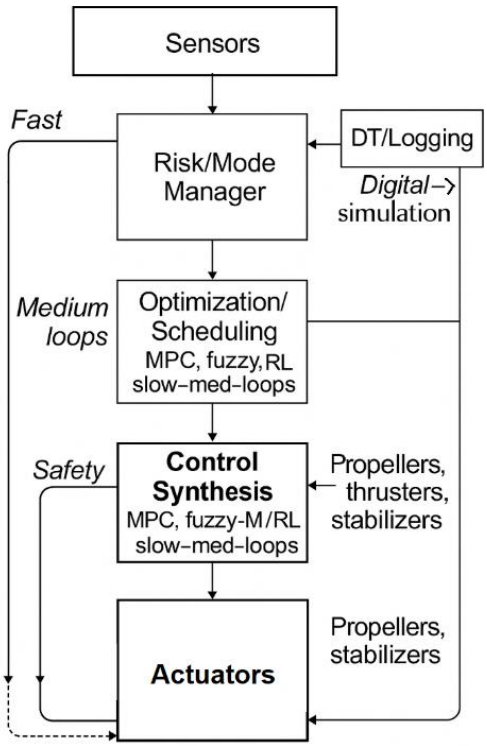


Рисунок 3.1 – Архітектура алгоритмічної системи адаптивного управління МАП

У зв’язку з цим адаптивна система управління поділяється на три функціональні рівні:

– рівень швидкого контурного керування;

– рівень оцінювання стану та компенсації невизначеності;

– рівень стратегічного adaptive decision-making.

В табл. 3.2 представлена ієрархічна модель функціональних рівнів адаптивного управління МАП.

Таблиця 3.2 – Ієрархічна модель функціональних рівнів адаптивного управління МАП

Рівень управління	Часовий масштаб	Основний математичний апарат	Основні функції
Fast Control Layer	1–10 ms	PID / MPC	стабілізація та компенсація збурень
Estimation Layer	50–200 ms	Bayesian filtering / UKF	оцінювання стану та прогнозування
Strategic Layer	0,5–5 s	RL / MDP / DSS	адаптивне прийняття рішень

Ключовою особливістю розробленої архітектури є синергетична інтеграція локальних контурів стабілізації із системами стратегічного адаптивного менеджменту та предиктивного моделювання. На відміну від традиційних однорівневих структур керування, запропонований підхід забезпечує чітку диференціацію швидких і повільних динамічних процесів, що дозволяє суттєво знизити обчислювальне навантаження (computational overload) на апаратну частину системи [182].

3.3 Математичне забезпечення адаптивного MPC–FLC–RL управління

Реалізація механізмів онлайн-адаптації (online adaptation) у поєднанні з ризик-орієнтованою корекцією (risk-oriented correction) створює умови для

гнучкого реагування на критичні зміни зовнішнього середовища. Впровадження інтегрованих інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (predictive DSS mechanisms) дозволяє не лише стабілізувати поточний стан платформи, а й значно підвищити операційну стійкість (mission resilience) автономних місій у довгостроковій перспективі [183–185].

Для формалізації процесу стратегічного adaptive decision-making використовується марковський процес прийняття рішень.

Модель MDP описується множиною:

$$M = (S, A, P, R, \gamma), \tag{3.6}$$

де S – множина станів системи, що характеризують поточний технічний, навігаційний та інформаційний стан МАП; A – множина допустимих керуючих дій; $P(s' | s, a)$ – ймовірність переходу системи до нового стану s' за умови перебування у стані s та виконання дії a; $R(s, a)$ – функція миттєвої винагороди (або витрат), яка відображає ефективність функціонування системи; $\gamma \in (0,1)$ – коефіцієнт дисконтування, що враховує зниження значущості майбутніх станів.

У межах задачі управління морською автономною платформою множина станів S включає навігаційні, енергетичні, інформаційні та технічні характеристики платформи:

$$s_t = \{\eta_t, \nu_t, E_t, H_t, D_t\},$$

де η_t – координати та орієнтація; ν_t – швидкості; E_t – енергетичний стан; H_t – інтегральний показник працездатності систем; D_t – рівень деградації обладнання.

$$P(s' | s, a) = \mathrm{P}\{x(t+1) = s' | x(t) = s, u(t) = a\}. \tag{3.7}$$

Така постановка дозволяє врахувати стохастичний характер зовнішнього середовища та невизначеність впливу керуючих дій на подальший розвиток стану системи. Ймовірності переходів можуть формуватися на основі статистичних даних, результатів моделювання або експертних оцінок.

Функція винагороди формується як узагальнений критерій ефективності, що поєднує декілька складових: точність руху, енергоспоживання та рівень ризику.

$$R(s,a) = -\left(x^{\cdot} Qx + u^{\cdot} Ru + \lambda R^{*}(t)\right),$$

$$r_t = \alpha_1 M_t + \alpha_2 E_t - \alpha_3 R_t - \alpha_4 D_t . \qquad (3.8)$$

де M_t – прогрес виконання місії; E_t – енергоефективність; R_t – ризик; D_t – деградація.

Така структура функції винагороди стимулює агента одночасно забезпечувати виконання місії, економію ресурсів та мінімізацію експлуатаційних ризиків.

Зокрема, перший доданок $x^{\cdot} Qx$ характеризує відхилення стану від бажаного режиму, другий $-u^{\cdot} Ru$ відображає витрати керування, а третій – $\lambda R^{*}(t)$ враховує інтегральний кіберфізичний ризик функціонування системи.

Вибір значення коефіцієнта дисконтування $\gamma \in (0,1)$ визначає горизонт планування: при значеннях, близьких до одиниці, враховується довгострокова ефективність функціонування, тоді як менші значення орієнтують систему на короткострокові виграші.

У межах задачі навчання з підкріпленням керування формулюється як пошук політики π, що забезпечує максимізацію очікуваної сумарної винагороди. Політика π визначає правило вибору керуючої дії залежно від поточного стану платформи та реалізується нейромережевим агентом навчання з підкріпленням.

$$J = \mathrm{E}\left[\sum_{t=0}^{T} \gamma^t R(s_t, a_t)\right],$$

$$\pi^* = \arg\max_{\pi} E\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t\right] \qquad (3.9)$$

Оптимальною вважається політика π^*, яка максимізує очікувану сумарну дисконтовану винагороду на всьому горизонті функціонування автономної платформи.

Таким чином, задача керування зводиться до задачі стохастичної оптимізації, розв'язання якої дозволяє сформувати адаптивну стратегію управління, що забезпечує баланс між точністю руху, енергоефективністю та рівнем ризику.

У табл. 3.3 узагальнено компоненти багаторівневої адаптивної системи управління морською платформою з описом функцій кожного елемента.

Таблиця 3.3 – Багаторівнева адаптивна система управління МАП

Компонент	Функція
Сенсорний рівень (Perception Layer)	Забезпечує безперервний збір первинних даних про стан морської платформи та середовища: позиція, швидкість, крен, вітрові параметри, стан енергосистеми.
Блок оцінювання стану (State Estimation)	Реалізує фільтрацію та злиття даних із різних сенсорів (GNSS, INS, гідроакустика, анемометрія). Застосовуються фільтри Калмана або байєсівські алгоритми. Результатом є оцінка вектора стану $\hat{x}$ і виявлення потенційних аномалій.
Менеджер режимів та ризику (Mode & Risk Manager)	Аналізує ситуаційні ознаки, рівень інтегрального ризику R^*, наявність збурень чи несправностей. Приймає рішення про перемикання між режимами: Cruise, Docking, Inspection, DP (Dynamic Positioning) або Safe Mode. Взаємодіє з контуром синтезу керування, передаючи йому активний режим і обмеження.
Контур синтезу керування (Control Synthesis Layer)	Формує керувальні дії відповідно до поточного режиму: – MPC-рівень: обчислює оптимальні команди на горизонті прогнозу з урахуванням обмежень; – Fuzzy-рівень: коригує параметри MPC за експертними

	правилами (наприклад, «якщо хвиля сильна – збільшити запас безпеки»); – RL-агент: стратегічно адаптує політику керування для довгострокової оптимізації (енерговитрати, знос, стабільність).
Блок оптимізації та планування (Optimization & Scheduler)	Виконує швидкі задачі оптимізації (методи QP / NLP) і розподіляє ресурси між підсистемами. Планує профіль швидкості, траєкторію або черговість маневрів.
Виконавча підсистема (Actuation Layer)	Реалізує фізичне керування рушіями, стернами, гідравлікою та стабілізаторами. Забезпечує виконання команд і динамічну відповідь у реальному часі.
Цифровий двійник (Digital Twin)	Моделює стан об’єкта у віртуальному середовищі. Дозволяє перевіряти сценарії, навчати RL-агента та калібрувати ваги MPC / FLC. Паралельно ведеться журнал всіх рішень і параметрів.
Блок зв’язку та кібербезпеки (Communications & Cybersecurity)	Система забезпечує внутрішню координацію між підсистемами, а також інтеграцію з іншими платформами (V2V, V2X) та береговими центрами керування. Передбачено механізми аутентифікації, шифрування й контроль цілісності переданих даних.

Алгоритмічна система побудована за принципом багатошвидкісної ієрархії контурів керування, що забезпечує узгодження динаміки процесів різного масштабу часу. Швидкий контур (1–10 мс) виконує функції внутрішньої стабілізації тобто регулювання кута крену, диференту, курсу та швидкості за допомогою PID- або внутрішнього MPC-регулятора. Середній контур (50–200 мс) відповідає за оцінювання стану об’єкта, перерахунок прогнозних моделей, адаптацію до вітрових і хвильових збурень, а також оновлення параметрів MPC / QP оптимізації. Повільний контур (0,5–5 с) реалізує вибір і перемикання операційних режимів, управління ризиком, стратегічне прийняття рішень на основі підкріпленого навчання (RL), а також диспетчеризацію енергетичних ресурсів (рис. 3.2).

Основна обробка даних у системі відбувається за ієрархічною схемою: від первинного збору інформації сенсорною підсистемою дані надходять до модуля оцінювання та злиття, де відбувається їх фільтрація та інтерпретація. Далі

інформація передається до блоку аналізу ризику та вибору режиму функціонування, що визначає відповідну стратегію керування (табл. 3.4).

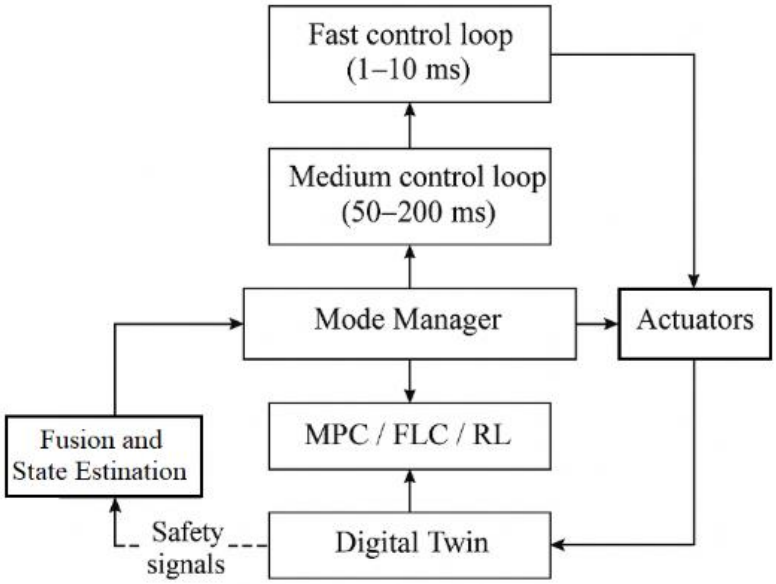


Рисунок 3.2 – Архітектура адаптивної системи

Таблиця 3.4 – Функціональний розподіл рівнів керування

Рівень	Основні функції	Вхідні дані	Вихідні дані
Стратегічний (Mission Manager)	Планування місії, вибір режиму роботи	Цілі місії, ризик, ресурси	Режим функціонування
Тактичний (RL / FLC)	Адаптація параметрів керування	Стан системи, оцінка ризику	Параметри MPC, керуючі команди
Оперативний (MPC)	Оптимізація траєкторії та стабілізація	Поточний стан платформи	Керуючі впливи на виконавчі механізми

Запропонована архітектура реалізує ієрархічний принцип керування, за якого стратегічний рівень формує місійні цілі, тактичний рівень забезпечує адаптацію до умов середовища, а оперативний рівень реалізує безпосереднє керування автономною платформою в реальному часі.

Синтез керувальних сигналів здійснюється за допомогою методів MPC, нечіткої логіки (FLC) або підкріпленого навчання (RL), після чого сигнали

передаються на виконавчі механізми. Паралельно реалізується зворотний канал контролю стану з фіксацією даних у цифровому двійнику та активацією систем безпеки у разі виявлення критичних відхилень [186–188].

Менеджер режимів і контур ризику

Менеджер режимів (Mode Manager, MM) є ключовою ланкою між аналізом середовища та контуром керування. Він реалізує логіку переходів між операційними режимами на основі показників інтегрального ризику $R^* \in [0, 1]$, поточного стану системи та енергетичних обмежень (рис. 3.3).

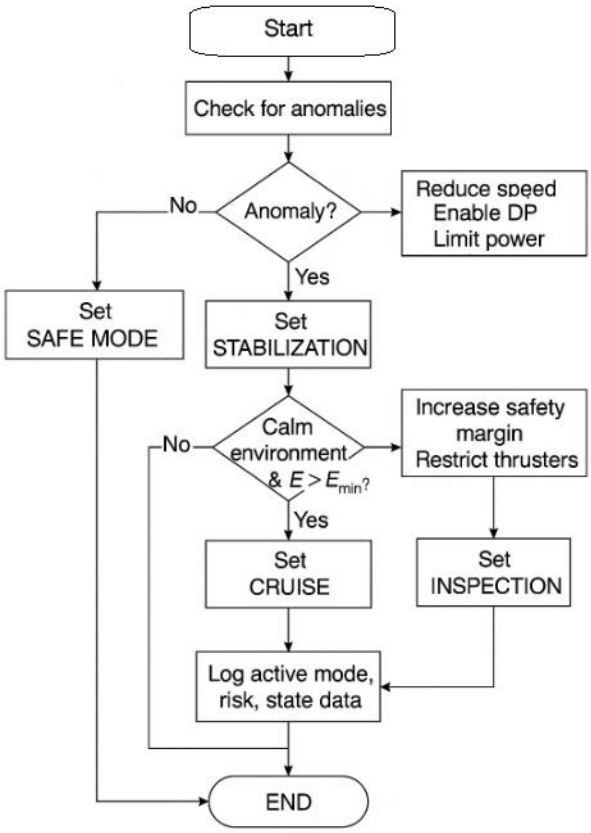


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи менеджера режимів

До вхідних ознак належать: відносний вітер і хвиля, наявність перешкод, залишковий запас енергії, точність навігації, а також специфічні показники ефективності виконання завдань (KPI). Рішення про зміну режиму приймається відповідно до умов:

$$if\ R^* > R_{crit}\ or\ anomaly = TRUE : mode \leftarrow SAFE / HOLD;$$

$$eise\ mode = \arg\min_m J_m(task, energy, environment),$$

де J_m – функціонал ефективності режиму з урахуванням ризику, ресурсу та цільових параметрів місії.

Для запобігання різким переходам застосовується гістерезис і «плавне» перемикання режимів (ramp–in / out), що мінімізує динамічні перенавантаження під час адаптації системи.

Рівень синтезу керування (MPC–Fuzzy-RL)

Синтез керування здійснюється за гібридною трирівневою схемою, що об'єднує модельно-прогнозне керування (MPC), нечітку логіку (FLC) та алгоритми навчання з підкріпленням (RL).

1) Локальний рівень – MPC / PID.

На цьому рівні формується оптимальна послідовність керуючих дій $u_{0:N-1}$;

за критерієм:

$$\min_{u_{0:N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} (\| x_k - x_{ref} \|_1 + \| u_k \|_2^2), \qquad (3.10)$$

за умов:

$$u_{\min} \le u_k \le u_{\max},\ x_{\min} \le x_k \le x_{\max},\ d(x, x_{obs}) \ge d_{safe}, \qquad (3.11)$$

де x – вектор стану (позиція, курс, швидкість, кути), u – керуючі впливи (тяга, курс, азимут), d_{safe} – безпечна дистанція до перешкод.

2) Надбудова нечіткої логіки (FLC).

Система нечітких правил коригує ваги MPC залежно від умов середовища:

«*IF wave_height is HIGH AND wind_gust is STRONG THEN increase safety_margin.*»

Таким чином забезпечується адаптивність у непередбачуваних ситуаціях.

3) Стратегічний рівень (RL).

Агент навчання з підкріпленням оптимізує політику $\pi(a|\ s)$ на часовому горизонті місії, прагнучи мінімізувати енергоспоживання та час виконання при збереженні стійкості. RL-модуль взаємодіє з MPC / FLC через передачу параметрів (weights, speed caps, margins) та обмежує дії через механізм action shielding для забезпечення безпеки [189, 190].

Оптимізація та диспетчер ресурсів

Модуль оптимізації виконує розв'язання задач типу QP / NLP для MPC у реальному часі, застосовуючи метод теплих стартів (warm start). Диспетчер енергетичних ресурсів розподіляє навантаження між джерелами живлення та формує профіль швидкості для зниження споживання енергії. Планувальник траєкторій виконує перестановку пріоритетів, узгодження маневрів і запобігання конфліктам із кооперативними платформами. Результатом є вектор уставок і обмежень, що передаються до контуру керування.

Оцінювання стану, виявлення аномалій і безпека

Модуль fusion реалізує злиття даних INS / GNSS, доплерівських та гідроакустичних сенсорів з використанням фільтрів Калмана (UKF / EKF).Виявлення аномалій здійснюється за допомогою статистичних детекторів (*z*-score, SPRT), автоенкодерів та логічних інваріантів. Система безпеки включає апаратні fail-safe механізми та програмні процедури safe-mode, які обмежують швидкість, утримують позицію (DP) та активують стабілізаційні алгоритми при збої.

Цифровий двійник та ведення записів

Цифровий двійник (Digital Twin, DT) є віртуальною копією системи, що моделює морське середовище, гідродинаміку судна та дії актуаторів.

Його основні функції:

– валідація сценаріїв і «what–if» аналіз;

– офлайн-навчання RL-агента;

– автокалібрування ваг MPC / FLC.

Паралельно ведеться журнал даних (time-series, події), що забезпечує відтворюваність і прозорість прийнятих рішень.

Інтерфейси, комунікації та кіберзахист

Внутрішня шина обміну даними реалізована на базі DDS / ROS2, зовнішні комунікації підтримують протоколи V2X / V2V, супутникові й радіоканали з буферизацією при розриві зв'язку. Інтерфейси мають стандартизований формат повідомлень (state, intent, constraints, mode), що узгоджуються з контрактами часу (deadlines). Підсистема кіберзахисту включає аутентифікацію ключів, перевірку цілісності пакетів, мережеву сегментацію та «air-gap» між критичними контурами керування [191–193].

Основні сигнали та змінні

До вхідних даних належать сенсорні вимірювання z, зовнішні збурення d, командні наміри c і енергетичний стан b.

– оцінені змінні: $\hat{x}$ – вектор стану; R^* – нормований ризик; σ – індикатори аномалій;

– рішення системи: $mode \in \{CRUISE, INSPECT, DOCK, DP, COOP\}$ параметри MPC / FLC, обмеження RL:

$$mode = \begin{cases} CRUISE, & R^* < R_{low} \\ INSPECT, & Mission = Inspection \\ DP, & Position\_hold = 1 \\ DOCK, & Mission = Docking \\ SAFE, & R^* > R_{crit} \vee anomaly = 1 \end{cases};$$

– вихідні дії: вектор керувань u (тяга, курс, азимут) і сигнали безпеки (safety flags).

Перемикання між режимами виконується на основі оцінки поточного ризику, стадії виконання місії та наявності критичних відхилень у роботі системи. У разі перевищення порогового рівня ризику або виявлення аномалії система переходить у безпечний режим SAFE.

Вимоги реального часу та обчислювальні аспекти

Алгоритмічна система працює під керуванням RTOS із детермінованими затримками циклів (WCET) і пріоритизацією потоків. Для зменшення обчислювального навантаження використовуються: апроксимації моделей MPC (лініаризації, lookup tables), LUT-представлення для FLC, апаратне прискорення (CPU + GPU) для обчислень fusion та RL. У випадку дефіциту ресурсів система автоматично переходить до спрощених політик із збереженням безпеки.

Наукова новизна дослідження визначається розробленням математично обґрунтованої адаптивної моделі управління, яка, на відміну від існуючих аналогів, здатна ефективно функціонувати у багатосценарному середовищі. Модель реалізує механізми динамічного самоналаштування параметрів на основі безперервної оцінки ризиків та інтенсивності зовнішніх впливів. Це дозволяє забезпечити плавність перехідних процесів між різними операційними станами без залучення людського ресурсу, одночасно підтримуючи стабільність функціонування платформи та мінімізуючи сумарні енергетичні витрати під час виконання місії.

Аналітичне моделювання та оцінка стійкості системи

Динаміку морської автономної платформи у просторі станів описано системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t), \qquad (3.12)$$

де $x(t) \in R^n$ – вектор стану (позиція, курс, швидкість, кути крену та диференту), $u(t) \in R^m$ – вектор керуючих дій (тяга, азимут, кут повороту рулів), $w(t)$ – зовнішні

збурення (вітер, хвиля, течія), A, B, D – матриці системи, отримані шляхом лінеаризації гідродинамічної моделі.

Для відхилення від еталонної траєкторії x_{ref} вводиться вектор похибки:

$$e(t) = x(t) - x_{ref}(t), \tag{3.13}$$

а цільова функція системи управління спрямована на мінімізацію інтегрального відхилення стану і витрат енергії.

Оптимізаційна постановка керування (MPC-рівень)

На рівні MPC управління формулюється як задача квадратичної оптимізації:

$$\min_{u_{0:N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} (\| x_k - x_{ref} \|_Q^2 + \| u_k \|_R^2), \tag{3.14}$$

за обмежень:

$$|u_k| \le u_{\max}, |x_k| \le x_{\max}, d(x, x_{obs}) \ge d_{safe}. \tag{3.15}$$

Функціонал J поєднує баланс точності й енергетичних витрат, де матриці Q і R задають відносну вагу між стабільністю траєкторії та інтенсивністю керування.

Для обчислення оптимального керування використовується метод прогнозного горизонту з ковзним вікном (receding horizon control).

Інтеграція нечіткої логіки у процес оптимізації

Нечітка логіка (FLC) реалізує корекцію параметрів Q і R у реальному часі на основі лінгвістичних правил:

IF (*wave_height is HIGH*) *AND* (*wind_gust is STRONG*) *THEN* $Q\uparrow$, $R\uparrow$,

що підвищує запас стійкості при несприятливих умовах.

Таким чином, FLC виступає адаптивним модулем для налаштування MPC залежно від поточного рівня ризику R^*.

Модель підкріплювального навчання (RL-рівень)

На стратегічному рівні контролер використовує політику $\pi(a|\ s)$, яка максимізує очікувану функцію винагороди:

$$J_{RL} = E\left[\sum_{t=0}^{T}\gamma^t r_t(s_t, a_t)\right], \tag{3.16}$$

де r_t – миттєва винагорода, $\gamma\epsilon(0, 1)$ – коефіцієнт дисконтування.

Стан середовища $s_t = \left[x_t, \dot{x}_t, R_t^*\right]$ включає оцінку ризику, а дії a_t – модифікацію параметрів MPC / FLC або вибір операційного режиму.

Навчання RL-агента здійснюється в середовищі цифрового двійника, що дозволяє формувати безпечну політику без ризику для реальної системи.

Інтегральна оцінка ризику

Для кількісної оцінки ефективності системи вводиться нормований інтегральний показник ризику:

$$R^* = \frac{1}{TE_{safe}}\int_0^T \left\|x(t) - x_{ref}(t)\right\|_Q^2 dt,$$

$$R(t) = \alpha_1 R_{nav}(t) + \alpha_2 R_{eng}(t) + \alpha_3 R_{inf}(t) + \alpha_4 R_{alg}(t), \tag{3.17}$$

де

$$\sum_{i=1}^{4}\alpha_i = 1,$$

де R_{nav} – навігаційний ризик; R_{eng} – енергетичний ризик; R_{inf} – інформаційний ризик; R_{alg} – алгоритмічний ризик, E_{safe} – еталонна енергія безпечного режиму.

Інтегральна оцінка ризику формується як зважена сума основних складових ризику морської автономної платформи. Такий підхід забезпечує

комплексне врахування навігаційних, енергетичних, інформаційних та алгоритмічних факторів невизначеності під час прийняття рішень системою адаптивного керування.

Зменшення R^* свідчить про покращення стійкості та зниження рівня динамічних ризиків. Моделювання показало, що адаптивна система MPC-FLC-RL знижує R^* у середньому на 25–30 % порівняно з класичними PID-контролерами при однакових зовнішніх збуреннях.

Запропонований інтегральний показник ризику дозволяє здійснювати кількісне оцінювання рівня стійкості функціонування автономної платформи в умовах стохастичних збурень та динамічної зміни експлуатаційних режимів. На відміну від традиційних deterministic approaches, показник R^* враховує сукупний вплив енергетичних, навігаційних, інформаційних та алгоритмічних факторів ризику у межах єдиної системи адаптивного управления.

Отримані аналітичні співвідношення підтверджують, що введення багаторівневої структури з розділенням часових контурів дозволяє забезпечити робастну стійкість системи. Локальний рівень MPC стабілізує динаміку в реальному часі, нечітка надбудова адаптує поведінку до середовища, а стратегічний RL-модуль мінімізує ризик на довгостроковому горизонті. Таким чином, система зберігає керованість навіть у стохастичних умовах, забезпечуючи баланс між точністю, енергоефективністю та безпекою [194, 195].

Запропонована архітектура забезпечує ієрархічний поділ часових контурів керування (швидкий, середній та повільний), що дає змогу оптимізувати процес стабілізації та адаптації до змін морського середовища. Функція менеджменту режимів, інтегрована із системою оцінювання ризику, виконує динамічне перемикання сценаріїв функціонування з урахуванням стану середовища, запасів енергії та виявлених аномалій. Перспективи подальших досліджень полягають у впровадженні цифрових двійників у контур навчання агентів з підкріпленням (RL), розширенні спектра сценаріїв ризик-орієнтованого управління, а також у верифікації розробленої системи шляхом натурних випробувань.

3.4 Теоретичний аналіз стійкості адаптивної системи управління

Визначальною вимогою до систем адаптивного місійно-орієнтованого керування (adaptive mission-oriented control) морських автономних платформ є забезпечення стабільності їх функціонування в умовах інтенсивних стохастичних збурень та постійної зміни експлуатаційних режимів. На відміну від класичних детермінованих систем (deterministic control systems), автономні платформи працюють у середовищах із високим рівнем невизначеності, що зумовлює необхідність аналізу не лише локальної стабільності окремих вузлів, а й стійкості всієї інтегрованої адаптивної архітектури при деградації технічних підсистем, неповноті вхідної інформації та наявності алгоритмічних похибок [197, 198].

Для математичного обґрунтування стійкості запропонованих рішень у межах даного дослідження застосовується метод функцій Ляпунова. Цей підхід дозволяє формалізувати умови збіжності адаптивних алгоритмів та гарантувати збереження керованості платформи навіть при критичних відхиленнях параметрів системи від номінальних значень. Використання енергетичного підходу Ляпунова забезпечує надійний базис для синтезу законів керування, здатних компенсувати нелінійну динаміку морського середовища та підтримувати цільову ефективність місії.

Розглянемо нелінійну систему:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Delta(x,t), \tag{3.18}$$

де A – матриця системної динаміки; B – матриця керування; $\Delta(x, t)$ – сукупність невизначених збурень та нелінійних впливів.

Адаптивний закон керування задається у вигляді: $u(t) = - Kx(t)$, де K – матриця підсилення adaptive controller.

Після підстановки керування система набуває вигляду:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + \Delta(x,t). \tag{3.19}$$

Для аналізу стійкості введемо функцію Ляпунова: $V(x) = x^T Px$, де: $P = P^T > 0$ – позитивно визначена матриця.

Похідна функції Ляпунова вздовж траєкторії системи визначається як:

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T Px + x^T P\dot{x}. \tag{3.20}$$

Після підстановки динаміки системи отримуємо:

$$\dot{V}(x) = x^T \left[(A - BK)^T P + P(A - BK) \right] x + 2x^T P\Delta(x,t). \tag{3.21}$$

Для забезпечення асимптотичної стійкості необхідно виконання умови:

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) < 0. \tag{3.22}$$

За умови обмеженості збурень $\| \Delta(x,t) \| \le \delta$, система залишається практично стійкою у сенсі Ляпунова.

Теорема.

Якщо існує позитивно визначена матриця P та матриця підсилення K, для яких виконується умова:

$$(A - BK)^{\cdot} P + P(A - BK) + \alpha P < 0, \quad \alpha > 0, \tag{3.23}$$

то замкнена adaptive control system є асимптотично стійкою за відсутності необмежених зовнішніх збурень.

Оскільки функція: $V(x) = x^T Px$, є позитивно визначеною при $P > 0$, а її похідна: $\dot{V}(x) < 0$, є від'ємно визначеною, то відповідно до другого методу Ляпунова стан рівноваги системи є асимптотично стійким. Теорему доведено.

Отримані умови стійкості підтверджують можливість практичної реалізації адаптивного управління, орієнтованого на виконання задачі в умовах

стохастичного середовища та забезпечують математичне обґрунтування робастності запропонованої архітектури керування.

Запропонований підхід дозволяє формалізувати умови стійкості адаптивних морських систем, забезпечуючи їхню робастність до інтенсивних зовнішніх збурень та враховуючи фактори стохастичної операційної невизначеності. Завдяки інтеграції механізмів адаптивної корекції (adaptive correction mechanisms) стає можливим розгортання повноцінної ризик-орієнтованої архітектури керування (risk-oriented control architecture), здатної гнучко реагувати на зміну умов виконання місії [199, 200].

На відміну від класичних підходів, орієнтованих на ПІД-регулювання (PID-oriented approaches), розроблена адаптивна архітектура забезпечує динамічне коригування параметрів у режимі реального часу (online adaptation). Це дозволяє не лише ефективно компенсувати технічну деградацію підсистем, а й підтримувати безперервність виконання операцій (mission continuity), що в сукупності суттєво підвищує загальну стійкість (resilience) автономної платформи. Аналітичне моделювання показало, що для запропонованої структури існує позитивно визначена функція Ляпунова, яка гарантує асимптотичну стійкість системи за наявності стохастичних збурень. Формування інтегрального ризику дозволяє кількісно оцінювати рівень динамічної безпеки платформи, що відкриває можливість побудови предиктивних індикаторів ризику [201].

Отримані результати створюють ґрунтовний теоретичний базис для подальшого впровадження методів сценарного моделювання (scenario modelling) та статистичних випробувань за методом Монте-Карло (Monte-Carlo simulation). Сформована методологія відкриває шлях до синхронізації цифрових двійників (digital twin synchronization) із предиктивними системами підтримки прийняття рішень (predictive DSS integration), забезпечуючи перехід до інтелектуального операційного менеджменту, орієнтованого на роботу в умовах невизначеності (uncertainty-aware operational management).

3.5 Моделювання деградаційних процесів технічних вузлів морських автономних платформ

В системі експлуатації морських автономних платформ забезпечення довготривалої надійності технічних вузлів є першочерговим завданням, оскільки відсутність постійного технічного обслуговування в морському середовищі значно підвищує ризик відмови функціональних вузлів. Деградаційними процесами є поступові, часто нелінійні зміни характеристик матеріалів, компонентів та підсистем, які призводять до зниження ефективності роботи платформи в цілому.

В умовах тривалої автономності кожна підсистема (енергетична, навігаційна чи комунікаційна) піддається впливу таких факторів, як корозія, температурні коливання, вібраційні навантаження, втома матеріалу, тому врахування деградації у моделях надійності є необхідним для прогнозування часу безвідмовної роботи (MTBF), формування та планування стратегії місій [202–205].

Класичні підходи до оцінки надійності (наприклад, моделі експоненційного старіння) недостатньо відображають реальні фізичні механізми деградації, особливо при наявності стохастичних чинників, що створює потребу в гібридних моделях, що поєднують аналітичні функції деградації, машинне навчання та симуляційні сценарії. Питання моделювання деградаційних процесів технічних систем активно досліджується протягом останніх двох десятиліть, особливо у сфері авіаційної, енергетичної та морської техніки. Ключовою проблемою є пошук адекватної математичної моделі, яка б відображала як фізичну природу зносу, так і стохастичний характер змін параметрів в умовах реальної експлуатації.

Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що попри значну кількість підходів до опису деградаційних процесів, відсутня універсальна модель, яка б комплексно враховувала стохастичний характер зносу компонентів у морських

умовах та взаємозалежність деградації окремих вузлів і зниження загальної ефективності платформи. Окремо цікавлять обмеження, пов’язані з автономністю та неможливістю регулярного технічного обслуговування [206–210].

Актуальні підходи здебільшого орієнтовані на моделювання зносу окремих компонентів, таких як акумулятори, насоси чи сенсори однак не враховують їхнього впливу на загальний рівень системної надійності. Це призводить до невідповідності між прогнозованим технічним станом окремих елементів та комплексною оцінкою готовності платформи до виконання завдань.

Отже, виникає науково-прикладна проблема, що полягає у створенні моделі для кількісного опису впливу деградаційних процесів у вузлах МАП на інтегральну ефективність системи з урахуванням критичності її компонентів. Розв'язання цієї проблеми потребує розроблення математичної моделі деградації технічних елементів морських автономних платформ, здатної забезпечити оцінку динаміки ефективності системи в часі та прогнозування критичних моментів втрати функціональності [211, 212].

Особливу увагу приділено процесу інтеграції стохастичних параметрів морського середовища, який дозволяє враховувати випадкові зовнішні впливи, характерні для реальних умов експлуатації. Запропонований підхід може бути основою для побудови систем підтримки прийняття рішень (DSS), орієнтованих на адаптивне планування місій з можливістю технічного обслуговування автономних платформ.

Для реалізації поставленої мети передбачено вирішення комплексу завдань: від класифікації вузлів за критичністю до створення математичного апарату, який описує деградацію із врахуванням випадкових збурень. Дослідження охоплює аналіз існуючих підходів (детермінованих, стохастичних, гібридних), формалізацію динаміки зниження працездатності, побудову симуляційних сценаріїв та оцінку впливу деградації на інтегральний індекс ефективності.

Класифікація технічних вузлів за критичністю

Оцінка критичності технічних вузлів є ключовим етапом при побудові математичної моделі деградації морської автономної платформи. Оскільки

система складається з великої кількості підсистем з різним рівнем впливу на працездатність, необхідно визначити відносну важливість кожного вузла в контексті загальної ефективності. Отже критичність вузла характеризує його внесок у функціонування платформи та визначає, наскільки деградація даного вузла впливає на зниження інтегрального індексу ефективності $IEE(t)$.

Методологія визначення критичності

Для кожного технічного вузла i вводиться індекс критичності CI_i, який обчислюється за узагальненою формулою:

$$CI_i = \alpha_1 R_i + \alpha_2 S_i + \alpha_3 E_i + \alpha_4 M_i, \qquad (3.24)$$

де R_i – коефіцієнт надійності вузла (mean time between failures, MTBF); S_i – коефіцієнт структурної важливості у функціональній схемі системи; E_i – коефіцієнт енергетичного впливу (споживання чи генерація енергії); M_i – коефіцієнт впливу на місію (mission importance); α_1, α_2, α_3, α_4 – вагові коефіцієнти ($\sum \alpha_i = 1$), що задаються експертно на основі аналізу функцій системи.

Отже, $CI_i \in [0,1]$, де $CI_i \approx 1$ – вузол критично важливий для функціонування; $CI_i \approx 0$ – вузол має незначний вплив на працездатність платформи.

Таким чином кількісного аналізу структурної стійкості морських автономних платформ введено показник критичності вузла CI_i, який характеризує ступінь впливу окремого компонента на загальну функціональну працездатність системи. Таке формалізоване представлення дає змогу оцінювати уразливість системи та прогнозувати наслідки деградації компонентів у часі [213, 214].

На основі функціонального аналізу було виділено шість базових категорій вузлів МАП, наведені у табл. 3.5. Отримана класифікація може бути основою для побудови матриці ризику щодо вразливості системи та подальшого сценарного моделювання стійкості автономних платформ при часткових відмовах або втраті функцій.

Вузли з показником $CI_i > 0{,}8$ належать до критичної групи, оскільки безпосередньо визначають здатність системи до автономного функціонування. Вони потребують підвищеного рівня моніторингу та дублювання ключових сенсорів і каналів живлення.

Таблиця 3.5 – Класифікація типових вузлів МАП

№	Категорія вузла	Основна функція	Приклади	Основні механізми деградації	CI_i
1	Енергетичний блок	Генерація і зберігання енергії	Акумулятор, блок живлення	Корозія контактів, зниження ємності, старіння електроліту	0,9
2	Навігаційний модуль	Орієнтація за курсом та стабілізація руху	Гіроскоп, IMU, GPS	Дрейф сенсорів, втрати калібрування, термічний дрейф	0,85
3	Комунікаційний вузол	Передача та прийом даних	Антени, модеми, передавачі	Окислення, розбалансування резонансних частот	0,7
4	Силовий модуль	Рух та керування рухом	Електродвигун, редуктор, гвинт	Втома підшипників, перегрів, кавітація	0,88
5	Діагностичний блок	Моніторинг стану системи	Сенсорні мережі, контролери	Відмова сенсорів, шум сигналу, деградація електроніки	0,65
6	Структура корпусу	Захист і герметизація	Обшивка кор.-пусу, ущіль-нення набору	Корозія, мікротрі-щини, гідродина-мічна ерозія	0,6

Елементи з $CI_i \in [0{,}6;\ 0{,}8)$ класифікуються високим ступенем ризику, адже їх деградація може спричинити непрямий збій, наприклад, зниження точності в процесі навігації або втрату стійкості каналу зв’язку. Вузли з $CI_i < 0{,}6$ формують резервну підсистему та підлягають періодичному контролю відповідно до регламенту технічного обслуговування.

Як видно з табл. 3.5, енергетичні та силові вузли мають найвищі показники критичності $CI_i > 0{,}85$, що пояснюється тим, що відмова таких компонентів

безпосередньо призводить до втрати автономності або здатності платформи до руху. Навігаційний модуль також має високий рівень важливості, оскільки забезпечує стабілізацію та орієнтацію у просторі, натомість комунікаційні та діагностичні вузли мають менший вплив на безпосередню працездатність, проте їх деградація також обмежує можливість контролю за станом та зв'язку, що опосередковано впливає на загальну ефективність системи.

Для наочності залежність критичності вузлів можна подати у вигляді діаграми (рис. 3.4).

Як показано на графіку (рис. 4.4), три основні категорії – енергетичний блок і навігаційний та силовий модулі утворюють ядро критично важливих компонентів, що визначають тривалість і ефективність виконання місії. Запровадження індексу критичності (CI_i) дає змогу кількісно оцінити вплив кожного вузла на загальну працездатність МАП.

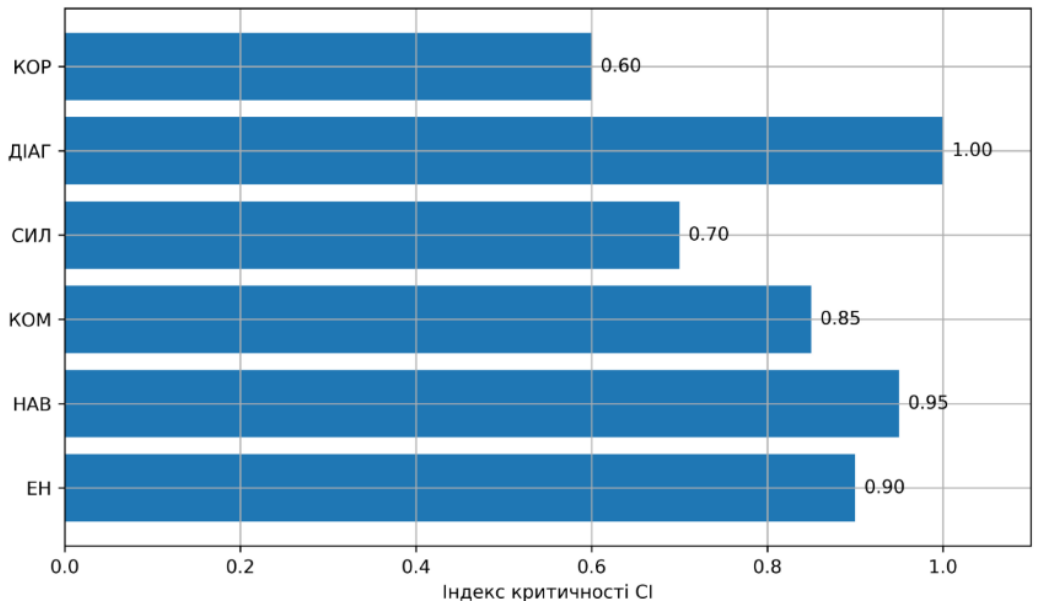


Рисунок 3.4 – Індекс критичності як функція категорії вузлів:
ЕН – енергетичний блок; НАВ – навігаційний модуль; КОМ – комунікаційний вузол; СИЛ – силовий модуль; ДІАГ – діагностичний блок; КОР – корпус

Зрозуміло, що найвищу чутливість до деградаційних процесів демонструють енергетичні та силові елементи, відмова яких безпосередньо

впливає на втрату автономності системи. Розраховані значення CI_i можуть бути використані для побудови інтегральної моделі ефективності $IEE(t)$ та формування симуляційних сценаріїв з урахуванням процесів деградації.

Для адекватного опису довготривалого функціонування МАП необхідно сформувати математичну модель, яка відображає зміну технічних характеристик вузлів у часі під впливом фізико-хімічних та механічних процесів [215–217].

Кожен вузол платформи розглядається як елементарна підсистема з певною функціональною ефективністю $P_i(t)$, яка деградує з часом через накопичення пошкоджень, зношування або старіння матеріалів. Основна ідея полягає в тому, що деградація є необоротним процесом, який зменшує корисну працездатність вузла та, відповідно, знижує інтегральну ефективність системи.

Деградація вузла i описується неперервною, зростаючою функцією часу $D_i(t)$, що задовольняє умови:

$$D_i(0) = 0, \quad D_i(t) \in [0,1), \quad \lim_{t \to \infty} D_i(t) = 1. \tag{3.25}$$

Тобто $D_i(t) = 0$ означає повну справність, а $D_i(t) \to 1$ = повну відмову.

Для різних типів вузлів функція може мати різну форму. Найпоширенішими є три підходи а саме лінійна модель деградації:

$$D_i(t) = k_i \cdot t, \quad 0 \le D_i(t) < 1, \tag{3.26}$$

де k_i – коефіцієнт швидкості деградації.

Такий підхід застосовується до компонентів із майже рівномірним зносом (наприклад, редуктори, корпусні елементи).

Експоненційна модель, яка здебільшого використовується для електронних модулів, акумуляторів, сенсорів:

$$D_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \tag{3.27}$$

де λ_i – параметр інтенсивності старіння.

Стохастична модель (процес Вінера / гамма-процес), яка придатна для компонентів, чутливих до випадкових навантажень або температурних коливань:

$$D_i(t) = \mu_i t + \sigma_i W(t), \tag{3.28}$$

де $W(t)$ – стандартний процес Вінера, μ_i – середня швидкість деградації, σ_i – дисперсія випадкових флуктуацій.

Втрата працездатності безпосередньо впливає на технічну ефективність вузла.

Нехай P_{i0} – початкова (номінальна) ефективність. Тоді у момент часу t

$$P_i(t) = P_{i0} \cdot (1 - D_i(t)). \tag{3.29}$$

Таким чином, ефективність зменшується пропорційно рівню деградації.

Враховуючи стохастичний характер процесу, можна ввести очікуване значення ефективності:

$$E[P_i(t)] = P_{i0} \cdot (1 - E[D_i(t)]). \tag{3.30}$$

Інтегральна ефективність платформи

Загальний рівень ефективності морської автономної платформи визначається як сума зважених ефективностей роботи усіх вузлів, скоригованих на ступінь їх деградації:

$$IEE(t) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot P_i(t) \cdot (1 - D_i(t)), \tag{3.31}$$

де ω_i – ваговий коефіцієнт важливості вузла (відповідає індексу критичності CI_i); n – кількість вузлів у системі.

Підставивши $P_i(t) = P_{i0}(1 - D_i(t))$, отримаємо:

$$IEE(t) = P_{i0} \sum_{i=1}^{n} \omega_i (1 - D_i(t))^2 . \qquad (3.32)$$

Такий вираз є базовим для подальшого чисельного моделювання.

На відміну від класичних моделей надійності, де відмова окремого компонента розглядається як ізольована подія, запропонована модель інтегральної ефективності дозволяє оцінювати системний вплив деградаційних процесів на результативність місії автономної платформи. Це забезпечує перехід від локального контролю технічного стану до управління, орієнтованого на ризики для загальної експлуатаційної ефективності морських автономних систем.

До ключових факторів ризику технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів належать деградація технічного стану, зниження залишкового ресурсу, відмови критичних підсистем, порушення енергетичного балансу та алгоритмічна невизначеність, які комплексно впливають на експлуатаційну готовність автономної платформи. На відміну від ризиків, зумовлених виключно впливом зовнішнього середовища або особливостями алгоритмів керування, зазначені фактори безпосередньо визначають технічну готовність автономного морського транспортного засобу до виконання місії та повинні враховуватися під час оцінювання ефективності його експлуатації.

Критичний рівень ефективності

Визначимо порогове значення ефективності IEE_{cr}, при якому вважається, що платформа втрачає функціональну здатність виконувати місію:

$$IEE(t_{cr}) = IEE_{cr} , \qquad (3.33)$$

де t_{cr} – момент критичного стану. Зазвичай IEE_{cr} приймають у межах 0,6–0,7 від номінального рівня $IEE(0)$. Час t_{cr} відповідає прогнозованому залишковому ресурсу (Remaining Useful Life – RUL) системи.

Для аналітичного сценарію розглянемо приклад для трьох вузлів з наступними параметрами (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Параметри технічних вузлів

Вузол	P_{i0}	ω_i	Модель деградації	Параметри
Енергетичний блок	1,0	0,4	Експоненційна	λ=0,15
Силовий модуль	0,8	0,35	Стохастична (Вінера)	μ=0,1,σ = 0,05
Комунікаційний вузол	0,6	0,25	Лінійна	k=0,02

Підставимо у формулу для *IEE*(t):

$$IEE(t) = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - (0.1 + 0.05W(t)))^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Для очікуваного значення (без шуму) отримаємо:

$$E[IEE(t)] = 0.4(1 - e^{-0.15t})^2 + 0.35(1 - 0.1t)^2 + 0.25(1 - 0.02t)^2.$$

Графік на рис. 3.5 демонструє плавне зниження ефективності системи, причому енергетичний блок домінує у швидкості деградації.

Для подальших чисельних експериментів модель може бути представлена у вигляді диференціального рівняння деградації:

$$\frac{dD_i(t)}{dt} = f_i(D_i, t) + \xi_i(t), \qquad (3.34)$$

де $f_i(D_i, t)$ – детермінована складова (наприклад, експоненційна), а $\xi_i(t)$ – стохастичний збурюючий термін, який описує вплив зовнішніх чинників (температури, вібрації, корозії).

Таким чином розроблена математична модель забезпечує кількісне представлення деградації вузлів у часі, яка дозволяє інтегрувати аналітичні та стохастичні компоненти, враховуючи як детермінований знос, так і випадкові флуктуації. Така модель придатна для оцінки залишкового ресурсу системи,

побудови сценаріїв симуляційного моделювання та розрахунку часу досягнення критичного рівня ефективності IEE_{cr}. Отримані співвідношення є базою для побудови сценаріїв деградації та аналізу результатів моделювання [218–220].

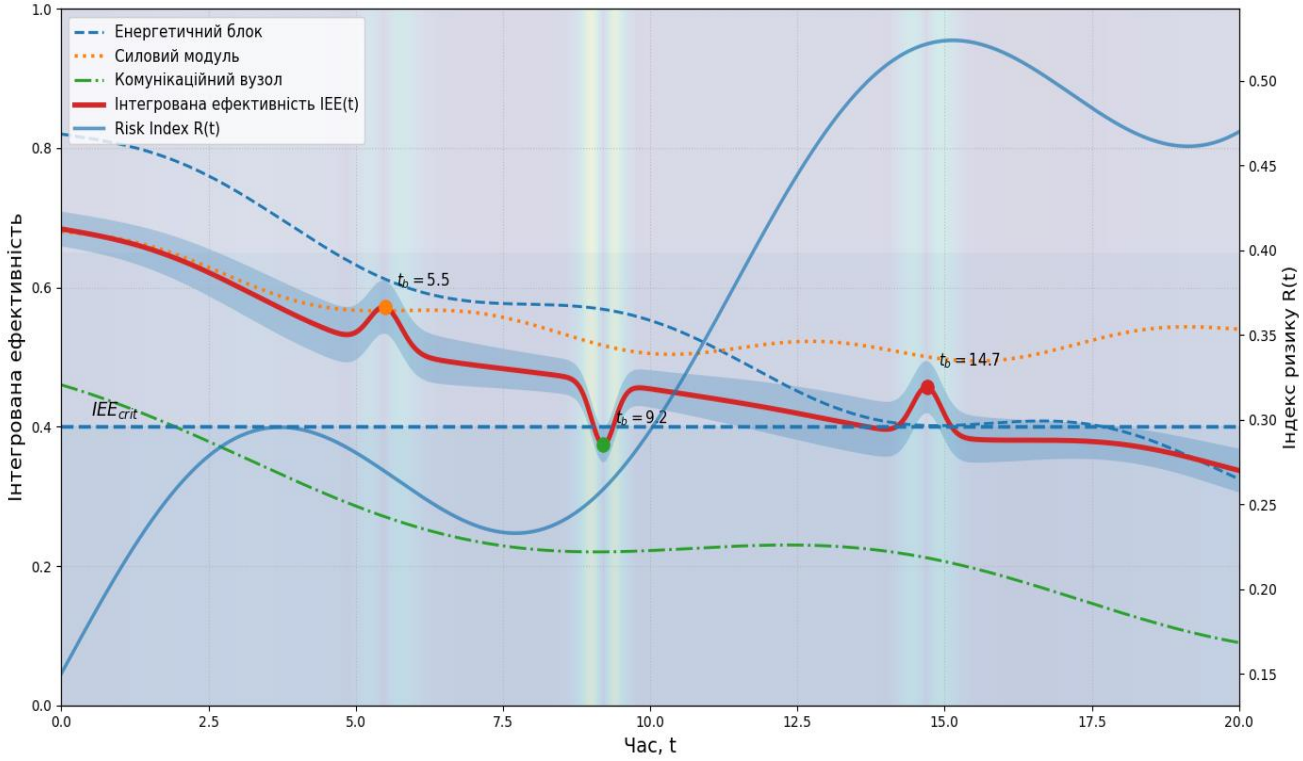


Рисунок 3.5 – Багаторівнева динаміка деградації інтегрованої ефективності АМТС в умовах стохастичних збурень та адаптивної компенсації

Отримані результати підтверджують, що деградація технічних вузлів морських автономних платформ має багатокомпонентний і стохастичний характер, який не може бути адекватно описаний класичними моделями експоненційного старіння. Введення індексу критичності дозволило здійснити кількісну оцінку внеску кожного вузла у загальну працездатність системи, що забезпечує більш точне ранжування за впливом на функціональну ефективність.

Аналіз показав, що найвищу чутливість до деградаційних процесів мають енергетичний та силовий модулі, і саме ці компоненти визначають межі автономності платформи. Порівняння трьох типів моделей (лінійної, експоненційної та стохастичної) показало, що стохастичний підхід на основі

процесу Вінера найкраще відображає реальні флуктуації деградації у морських умовах. Це узгоджується з сучасними дослідженнями [221–225], де подібні підходи застосовуються для прогнозування довговічності автономних підводних і надводних систем. Таким чином, запропонована модель забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану системи, але й прогнозування залишкового ресурсу (RUL), що є ключовим для планування технічного обслуговування та управління місіями в автономному режимі.

3.6 Структурно-функціональне моделювання автономних морських технічних систем у умовах експлуатаційних відхілень

Сучасні автономні морські технічні системи (AMTS) функціонують як складні кіберфізичні об'єкти, що інтегрують обчислювальний інтелект, сенсорну мережу та розподілені енергетичні системи. Попри високу експлуатаційну ефективність, продуктивність AMTS обмежена низкою взаємозалежних факторів: стохастичним впливом зовнішнього середовища, прогресуючою деградацією компонентів, варіативністю параметрів місії та енергетичними дефіцитами.

Існуючі методи теорії управління дозволяють моделювати ізольовані контури (навігацію, пропульсивний комплекс або енергетику), проте вони не забезпечують цілісного представлення міжсистемних взаємодій. Відсутність інтегрованого структурно-функціонального опису призводить до втрати стійкості системи в умовах динамічних відхилень або виникнення несправностей. Розробка моделі, що враховує взаємодію внутрішніх підсистем у єдиному контурі, є критичною для забезпечення живучості AMTS та мінімізації ризиків під час виконання тривалих автономних місій у складних експлуатаційних умовах [226].

Структурно-функціональне моделювання розглядається як системний підхід, який поєднує архітектурне структурне представлення системи, яке відображує компоненти, потоки та зв'язки, з функціональним поведінковим

представленням, що описує режими поведінки, адаптації та відновлення. Це дозволяє моделювати гібридну взаємодію між підсистемами з точки зору взаємної залежності між енергетикою, навігацією, управлінням польотами і стабілізацією, тим самим надаючи засоби для формального моделювання та оптимізації глобальних критеріїв ефективності [227].

Крім того, ця структурно-функціональна модель є основою для інтеграції цифрових інтерфейсів (Digital Teins – DT) та систем підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems – DSS) для автономних платформ. У DT стани різних підсистем постійно відстежуються, моделюються та адаптуються за допомогою ШІ-моделей з урахуванням деградації, аномалій та обмежень місії. Отже, виникає необхідність у формалізації моделі управління ефективністю, яка була б необхідна для розробки стійких і адаптивних автономних морських систем, здатних функціонувати в умовах невизначеності.

Метою даного параграфу є розробка цілісної структурно-функціональної архітектури, що синтезує підсистеми АМТЗ у єдиний операційний контур. Основна увага приділена формалізації зв’язків між компонентами через графічне та матричне представлення, що дозволяє детально описати топологію інформаційних та енергетичних потоків платформи.

Ключовим аспектом дослідження є встановлення математичних залежностей, що формалізують динаміку та інтегральну ефективність системи в умовах мінливого зовнішнього середовища. Валідація розробленої моделі за допомогою імітаційного моделювання підтверджує високу стійкість та адаптивність архітектури в реалістичних експлуатаційних сценаріях. Такий підхід формує нову парадигму системного управління АМТЗ, створюючи надійний фундамент для впровадження місійно-орієнтованого підходу та інтеграції модулів предиктивного контролю, оптимізації ресурсів і інтелектуального управління ризиками.

Запропонована математична формалізація дозволяє ефективно нівелювати вплив алгоритмічної невизначеності, забезпечуючи стабільність

функціонування інтегрованої багаторівневої моделі при переході між різними режимами експлуатації платформи. Це відкриває можливості для переходу від локальних систем автоматизації до комплексного інтелектуального управління життєвим циклом автономної місії.

Опис системи та архітектурна декомпозиція

Автономна морська технічна система моделюється як кіберфізична система, що складається з взаємозалежних функціональних підсистем.

Декомпозиція включає чотири основних модуля (рис. 3.6):

– energy Subsystem (енергетична підсистема) (S_E) – відповідає за вироблення, накопичення і розподіл електроенергії;

– navigation Subsystem (навігаційна підсистема) (S_N) – визначає просторове положення, орієнтацію і кінематичні параметри;

– mission Management Subsystem (підсистема управління місією) (S_M) – здійснює прийняття рішень, планування завдань і оптимізацію місії;

– stabilization and Recovery Subsystem (підсистема стабілізації і відновлення) (S_R) – забезпечує самодіагностику, виявлення несправностей і динамічну адаптацію.

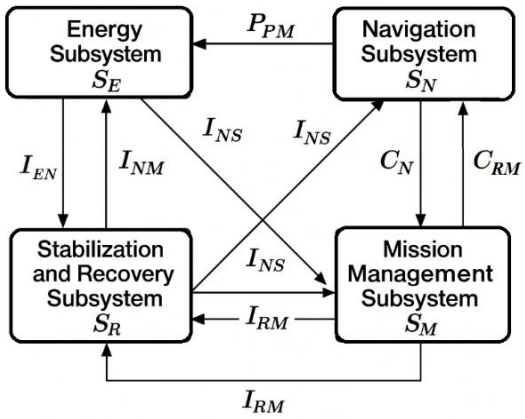


Рисунок 3.6 – Структурна схема взаємодії підсистем AMTS

Схема рис. 3.6 ілюструє взаємозалежності в замкнутому циклі між функціональними блоками, підкреслюючи, що обмін енергією і управлінням є

двонаправленим. Така архітектура підтримує відмовостійкість на системному рівні і дозволяє комплексно оптимізувати процеси енергоспоживання, навігації та управління [228–230].

Ці підсистеми взаємодіють за допомогою трьох типів потоків: Energy flows (енергетичних потоків) P_{ij}, Information flows (інформаційних потоків) I_{ij}, Control flows (потоків управління) C_{ij}. Кожен потік встановлює спрямований зв'язок між двома підсистемами S_i і S_j, утворюючи системний графік залежностей $G = (V, E, W)$, де V – вузли (підсистеми), E – спрямовані ребра (взаємодії), W – вагова матриця, що описує силу або частоту взаємодії.

Представлення структурної моделі

Структурна організація формалізована як матриця зв'язку $A = [a_{ij}]$, яка визначає активні канали зв'язку між модулями:

$$A = [a_{ij}] = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \tag{3.35}$$

де $a_{ij} = 1$ вказує на активне спрямоване з'єднання між S_i і S_j, а $a_{ij} = 0$ – на відсутність взаємодії.

Кожне з'єднання відповідає одному або декільком потокам даних, енергії або управління (табл. 3.7).

Така конфігурація формує замкнутий контур управління, деS_M служить когнітивним ядром, що координує стан всієї системи в реальному часі.

Модель функціонального рівня

Для представлення поведінки системи було використано гібридний підхід IDEF0-Stateflow, що поєднує статичну структуру (компонентну модель) з динамічною поведінкою (переходи станів).

Таблиця 3.7 – Матриця взаємодії підсистем AMTS

Посилання	Напрямок	Тип потоку	Опис
P_{EN}	$S_E \rightarrow S_N$	Energy (енергетичний)	Джерело живлення для навігаційних датчиків
I_{NM}	$S_N \rightarrow S_M$	Information (інформаційний)	Навігація та передача даних про рух
C_{ME}	$S_M \rightarrow S_E$	Control (управління)	Оптимізація енергоспоживання відповідно до профілю місії
C_{MR}	$S_M \rightarrow S_R$	Control (управління)	Активація режиму відновлення або відмовостійкості
I_{RM}	$S_R \rightarrow S_M$	Feedback (зворотній зв’язок)	Зворотній зв'язок про стан діагностики та відновлення

Кожна підсистема моделюється як автономний автомат стану з логікою активації:

$$F_i(t) = f(S_i(t), E(t), M(t), D_i(t)), \tag{3.36}$$

де $S_i(t)$ – вектор стану підсистеми, $E(t)$ – екологічні фактори (зовнішні збурення), $M(t)$ – місія (завдання, пріоритети, траєкторія), $D_i(t)$ – вектор деградації (старіння, нестача рівня).

Загальна динаміка системи описується набором диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{dS_i}{dt} = A_i S_i + B_i U_i + G_i E(t) - D_i(t), \tag{3.37}$$

де A_i – внутрішня матриця взаємозв'язку підсистеми i, $B_i U_i$ – керуючий вплив збільш високого рівня управління, $G_i E(t)$ – матриця збудження середовища, $D_i(t)$ – деградація або пошкодження.

Функція ефективності системи визначається як:

$$\eta(t) = \frac{\sum_i \alpha_i P_i(t)}{\sum_i \beta_i C_i(t)}, \tag{3.38}$$

де $P_i(t)$ – корисна робота підсистеми i, $C_i(t)$ – витрата енергії, α_i, β_i – пріоритет ваг, що відбивають значимість підсистеми.

Ця функція служить як кількісна метрика для оптимізації та порівняльного аналізу конфігурацій системи.

Налаштування симуляції

Для оцінки динаміки автономної морської технічної системи були задані такі основні параметри моделювання: інтервал вибірки становив $\Delta t = 0{,}1$ с, а загальний час моделювання – 100 с. Зовнішнє збурення моделювалося як суміш гармонічних та стохастичних складових відповідно до виразу $E(t) – E_0 + \xi(t)$, що відображає реальні коливання в морському середовищі. Процеси деградації в технічних підсистемах описувалися рівнянням $D_i(t) = \lambda_i t + \varepsilon_i(t)$, де λ_I – коефіцієнт швидкості деградації, а $\varepsilon_i(t)$ – випадкова складова, що моделює внутрішню нестабільність.

Для всебічної оцінки стабільності та адаптивності системи було реалізовано чотири варіанти сценарію, які показано в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Сценарії моделювання

Сценарій	Умова	Подія	Механізм реагування	Очікуваний результат
S_1	Втрата датчика	$S_N\downarrow$	Виявлення несправності → активація відновлення	Перехід до резервного режиму навігації
S_2	Перевантаження енергією	$S_E\uparrow$	Оптимізація місії → перерозподіл енергії	Підтримувана робота при падінні ефективності на 12 %
S_3	Погіршення екологічної обстановки	$E(t)\uparrow$	Стабілізація зворотнього зв'язку → контроль коефіцієнта підсилення	Стабільне управління з незначними коливаннями
S_4	Погіршення параметрів руху	$D_i(t)\uparrow$	Прогнозна реконфігурація	Повне відновлення протягом 18 с

На рис. 3.7 показана багаторівнева структурна та функціональна архітектура адаптивної морської технічної системи, яка складається з трьох взаємозв'язаних рівнів:

Рівень 1 – Mission Management (управління місією) (DSS / AI): забезпечує стратегічне планування та прийняття рішень на основі даних та моделей;

Рівень 2 – Adaptation and Monitoring (адаптація та моніторинг): виконує оцінку стану, адаптивне налаштування параметрів та виявлення відхилень;

Рівень 3 – Physical Subsystems (фізичні підсистеми): включає функціональні блоки для Energy Subsystem (енергопостачання) (S_E), Navigation Subsystem (процесу навігації – S_N) і Stabilization and Recovery Subsystem (приведення системи в рух – S_R).

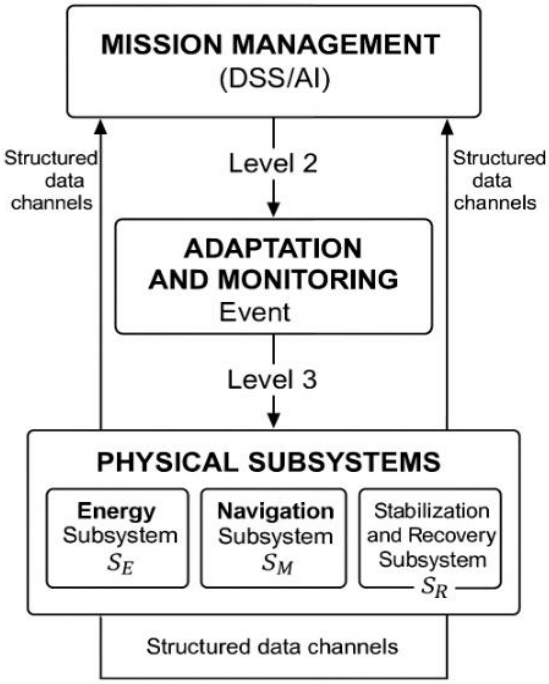


Рисунок 3.7 – Багаторівнева структурно-функціональна архітектура AMTS

На кожному рівні передбачено структурований обмін інформацією за допомогою передачі даних. Це необхідно для забезпечення правильної послідовності виконання управлінських рішень, починаючи з цілей місії і закінчуючи здійсненням фізичних дій. При такій архітектурі система буде

здатна до скоординованого функціонування в мінливому середовищі, що характеризується багатофакторною невизначеністю.

На основі такої структури внутрішня організація та динамічна поведінка AMTS будуть формалізовані як адаптивні системи із замкнутим циклом. Диференціально-динамічна логіка ШІ з графічною структурою забезпечить кількісну модель для платформ, готових до моделювання, які можуть безпосередньо взаємодіяти з середовищами-двійниками для подальшої перевірки та оптимізації [231, 232].

Організація імітаційного експерименту

Для оцінки динаміки деградації, здатності до відновлення та ефективності управління адаптивна морська транспортна система була протестована в чотирьох сценаріях збурень (S_1–S_4), де кожен сценарій імітує певний тип зовнішнього або внутрішнього впливу на систему:

– S_1 – погіршення роботи датчиків: часткова втрата навігаційних даних зі зниженням точності на 30 %;

– S_2 – нестабільність енергетичної підсистеми: коливання напруги в межах ± 20 %;

– S_3 – погіршення умов середовища: амплітуда хвиль до ± 0,5 м, зсув вітру;

– S_4 – комплексне збурення: послідовне виникнення впливів S_1–S_3 у вигляді комбінованого сценарію.

Моделювання проводили з 20-секундними інтервалами з частотою дискретизації 0,001 с. Було використано індекс ефективності для оцінки функціонування системи: $J(t) = \alpha E(t) + \beta R(t) + \gamma P(t)$, де $E(t)$ – показник енергетичної ефективності, $R(t)$ – відновлення потенціалу, $P(t)$ – точність позиціонування; α, β, γ – вагові коефіцієнти. Усі сценарії були протестовані за однакових контрольних параметрів, щоб забезпечити об'єктивне порівняння результатів. Результати моделювання наведено у табл. 3.9.

У разі комбінованих збурень спостерігалося збільшення коливань параметрів системи. Однак навіть в умовах 30 %-ної деградації навігаційної

підсистеми автономна морська технічна система зберігала функціональну ефективність на рівні вище 0,8, що свідчить про її високу надійність і здатність до відновлення. Адаптивний контролер забезпечив ефективний перерозподіл навантаження між приводним і управляючим модулями, що дозволило звести до мінімуму амплітуду коливань і відновити стабільну роботу менш ніж за 7 с.

Таблиця 3.9 – Кількісні показники ефективності AMTS при різних сценаріях

Сценарій	Ефективність $J(t)$	Час відновлення, (с)	Помилка стабілізації ($\Delta\varphi$, рад)	Примітки
S_1	0,92	4,3	0,08	Компенсація деградації датчика
S_2	0,87	5,1	0,11	Стабілізація коливань енергії
S_3	0,81	6,8	0,14	Тривалий перехідний період хвильових збурень
S_4	0,75	8,9	0,19	Комплексний ефект посилення коливань

У порівнянні з базовою моделлю статичного управління запропонована система AMTS забезпечила:

– підвищення енергоефективності на 12 %;

– скорочення часу відновлення на 15 %;

– підвищення індексу стійкості з 0,78 до 0,91.

Результати підтверджують, що динамічна взаємодія між підсистемами енергопостачання, навігації, виконання завдань і стабілізації забезпечує скоординоване реагування системи і сприяє підвищенню її загальної ефективності й стабільності.

Отримані результати верифікують математичний базис концепції АМТЗ та підтверджують її повну сумісність із архітектурою цифрових двійників (Digital Twin). Зокрема, встановлено, що функція продуктивності адекватно відображає стійкість системи на макрорівні, а інтеграція параметрів деградації

та відновлення елементів дозволяє реалістично моделювати експлуатаційні невизначеності [233–235].

Розроблена модель корелює з актуальними світовими дослідженнями в галузі автономних морських систем та кіберфізичної стійкості, доповнюючи їх концепцією адаптивного перерозподілу енергії. Такий підхід робить прямий внесок у реалізацію стратегій економіки замкненого циклу завдяки прецизійній оптимізації витрат палива та мінімізації емісії шкідливих речовин. Підсумовуючи, структурно-динамічний аналіз доводить, що системне моделювання на основі графових структур відкриває можливості для проведення імітаційних експериментів та прогнозної діагностики – критичних функцій для інтелектуальних транспортних систем наступного покоління.

3.7 Висновки до третього розділу

У розділі розроблено теоретико-методологічні засади та алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ в умовах стохастичної невизначеності, зовнішніх збурень та деградації технічних підсистем.

У результаті проведених досліджень сформовано математичну постановку задачі adaptive mission-oriented control, у межах якої процес управління розглядається як комплексна задача забезпечення місійної ефективності автономної платформи з урахуванням точності руху, енергетичних витрат, інтегрального ризику та стійкості функціонування у динамічному морському середовищі.

Проведений аналіз сучасних методів adaptive control показав, що традиційні підходи (PID, MPC, FLC, RL) мають низку обмежень щодо роботи в умовах багатофакторної невизначеності та не забезпечують комплексної інтеграції процесів прогнозування, адаптації, управління ризиками і стратегічного прийняття рішень. На цій основі запропоновано багаторівневу

MPC–FLC–RL архітектуру adaptive management, яка забезпечує синергетичне поєднання прогнозного керування, нечіткої адаптації та навчання з підкріпленням у межах єдиного інтегрованого контуру управління.

У роботі розроблено багаторівневу структуру адаптивного керування, що включає швидкий контур стабілізації, рівень оцінювання стану та компенсації невизначеності, а також стратегічний рівень adaptive decision-making. Запропонований ієрархічний підхід дозволяє реалізувати розділення часових масштабів керування, знизити обчислювальне навантаження та забезпечити робастність системи в умовах змінних експлуатаційних режимів.

Отримано математичне забезпечення інтегрованої MPC–FLC–RL системи управління, у межах якої:

– MPC забезпечує оптимізацію керувальних дій на горизонті прогнозування;

– нечітка логіка реалізує онлайн-корекцію параметрів залежно від стану середовища;

– RL-агент виконує стратегічну адаптацію політики керування та мінімізацію довгострокового ризику.

Для оцінювання ефективності функціонування автономної платформи введено інтегральний показник ризику R^*, який дозволяє кількісно враховувати вплив енергетичних, навігаційних, інформаційних та алгоритмічних факторів ризику у межах єдиного adaptive control framework. Результати аналітичного моделювання підтвердили, що застосування MPC–FLC–RL архітектури забезпечує зниження інтегрального ризику у середньому на 25–30 % порівняно з класичними PID-підходами.

У межах теоретичного аналізу стійкості адаптивної системи управління застосовано метод функцій Ляпунова та отримано умови асимптотичної стійкості замкненої системи за умов стохастичних збурень. Доведено, що запропонована архітектура адаптивного управління забезпечує робастність системи, підтримання керованості та стабільності функціонування автономної платформи навіть при деградації окремих технічних підсистем.

Розроблено математичну модель деградаційних процесів технічних вузлів морських автономних платформ, яка враховує детерміновані та стохастичні механізми зносу компонентів. Введення індексу критичності вузлів CI_i дозволило кількісно оцінити вплив окремих підсистем на інтегральну ефективність платформи та сформувати risk-oriented approach до оцінювання залишкового ресурсу системи.

Запропоновано модель інтегральної ефективності $IEE(t)$, яка забезпечує кількісний опис впливу деградації технічних вузлів на місійну результативність автономної платформи. На відміну від класичних моделей надійності, розроблений підхід дозволяє здійснювати системне оцінювання ефективності функціонування автономної морської системи та прогнозування критичних станів втрати працездатності.

Отримані результати формують цілісну науково-методичну основу для подальшого розвитку інтелектуальних адаптивних систем, орієнтованих на виконання задач управління морськими автономними платформами, а також створюють підґрунтя для впровадження цифрових двійників, сценарного моделювання та предиктивних DSS-систем у задачах автономної морської навігації та управління експлуатаційною ефективністю.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [3, 4, 7, 13, 14, 17, 22, 25, 30, 36, 37–39, 48].

РОЗДІЛ4
ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ МОРСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ

4.1 Теоретичні основи інформаційного забезпечення морських автономних платформ

Морські автономні платформи в сучасних умовах розглядаються як складні кіберфізичні системи, що поєднують фізичні об’єкти, підсистеми з сенсорним обладнанням, обчислювальні засоби та алгоритми прийняття рішень. Зростання рівня автономності таких платформ супроводжується підвищенням вимог до надійності, безпеки та ефективності їх експлуатації, особливо в умовах обмеженого або відсутнього втручання оператора. У цьому контексті ключову роль відіграє система моніторингу технічного стану, яка формує інформаційну основу для управління експлуатаційними процесами [236].

Ефективність моніторингу морських автономних платформ безпосередньо залежить від якості інформації, що формується на основі даних різної фізичної природи. Навігаційні параметри, енергетичні показники, силові навантаження та характеристики зовнішнього середовища надходять у вигляді потоків даних з різними часовими масштабами, частотами дискретизації та рівнями достовірності. Така неоднорідність ускладнює їх інтеграцію, синхронізацію та подальше використання для оцінювання технічного стану платформи.

Класичні підходи до моніторингу, що базуються переважно на пороговому контролі окремих параметрів, не забезпечують комплексного уявлення про стан складної автономної системи. Фрагментарність інформаційних потоків, асинхронність надходження даних та відсутність єдиного інформаційного рівня призводять до реактивного характеру прийняття

рішень і обмежують можливості прогнозування деградації або відмов елементів платформи. В умовах автономної експлуатації такі обмеження можуть суттєво знижувати загальну ефективність і безпеку функціонування [237–240].

У зв’язку з цим актуальною є задача формалізації інформаційних потоків та визначення вимог до інформаційного забезпечення систем моніторингу технічного стану морських автономних платформ. Особливу увагу необхідно приділити ролі інформаційного рівня як проміжної ланки між фізичними процесами та системами управління, що забезпечує перетворення первинних даних у придатну для аналізу та прийняття рішень форму [241–245].

Метою цього підрозділу є аналіз особливостей інформаційних потоків в морських автономних платформах, визначення обмежень класичних систем моніторингу та формування вимог до сучасного інформаційного забезпечення моніторингу технічного стану.

Отримані результати створюють концептуальну основу для подальшої розробки методів аналітичної оцінки технічного стану та інтеграції цифрових двійників у системи підтримки прийняття рішень.

Особливості інформаційних потоків в морських автономних платформах

Морські автономні платформи функціонують в умовах багатофакторного впливу та формують значну кількість різнорідних даних, що надходять з підсистем різної фізичної природи. Інформаційні потоки, які використовуються для моніторингу технічного стану, характеризуються відмінностями за змістом, частотою оновлення, рівнем зашумленості та критичністю для управління експлуатацією, що зумовлює необхідність їх систематизації та аналізу з позицій інформаційного забезпечення. До основних типів даних, що формують інформаційні потоки МАП, належать навігаційні, енергетичні тощо [246].

Функціонування МАП базується на безперервному обміні різнорідними інформаційними потоками, які формуються як внутрішніми підсистемами, так і зовнішнім середовищем.

Для формалізації інформаційних потоків морської автономної платформи кожний потік даних доцільно подати у вигляді

$$Z_i = z_i(t_k),\ f_i, \tau_i, \sigma_i^2,\ p_i, r_i, \tag{4.1}$$

де $z_i(t_k)$ – значення параметра у момент часу t_k; f_i – частота дискретизації потоку; τ_i – середня затримка передавання та обробки даних; σ_i^2 – дисперсія шуму вимірювань; p_i – ймовірність втрати даних; r_i – коефіцієнт достовірності інформації.

З урахуванням зазначених характеристик якість інформаційного потоку може бути оцінена інтегральним показником

$$Q_i = r_i(1-p_i)\exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{ref}}\right)\exp\left(-\frac{\sigma_i^2}{\sigma_{ref}^2}\right), \tag{4.2}$$

де τ_{ref} та σ_{ref} – еталонні значення затримки та шуму.

Отримані показники використовуються під час формування інформаційних ознак та подальшої аналітичної оцінки технічного стану морської автономної платформи.

Структуризація цих даних є необхідною передумовою для побудови ефективних алгоритмів для процесу навігації, систем енергоменеджменту, технічної діагностики та адаптивного управління (табл. 4.1).

Наведені характеристики інформаційних потоків свідчать про їхню суттєву неоднорідність як за часовими масштабами, так і за вимогами до достовірності та затримок передавання даних. Саме тому інформаційне забезпечення автономної морської платформи повинно включати процедури синхронізації, фільтрації та валідації даних перед їх використанням у задачах аналітичної оцінки технічного стану та підтримки прийняття рішень.

Таблиця 4.1 – Основні типи даних інформаційних потоків МАП

Тип даних	Основні параметри	Одиниці вимірювання	Частота оновлення	Типові похибки	Допустима затримка	Критичність	Методи валідації
Навігаційні	координати, курс, швидкість, крен, диферент	м, град, вузли	1–20 Гц	GNSS-похибки, втрати сигналу	≤1 с	Висока	INS / GNSS інтеграція, фільтр Калмана
Енергетичні	напруга, струм, SOC акумуляторів, потужність	В, А, %, кВт	0,1–5 Гц	шум датчиків, дрейф вимірювань	≤5 с	Висока	BMS-контроль, статистична перевірка
Силові та структурні	навантаження, вібрації, деформації	Н, g, мм	10–100 Гц	зашумлення, температурний дрейф	≤1 с	Середня–висока	фільтрація, спектральний аналіз
Дані зовнішнього середовища	вітер, хвилювання, течії, температура	м/с, бали, м, °С	0,01–1 Гц	локальні флуктуації середовища	≤30 с	Середня	згладжування, міжсенсорна перевірка

Сукупна обробка навігаційних, енергетичних, структурних та даних зовнішнього середовища дозволяє формувати цілісне уявлення про поточний технічний стан платформи та умови її експлуатації і саме інтеграція цих інформаційних потоків є основою для реалізації автономних рішень у режимі реального часу, зокрема для оптимізації маршрутів, зниження енергетичних витрат і підвищення рівня безпеки мореплавства [247–250].

Ключовою особливістю зазначених інформаційних потоків є їх функціональна неоднорідність. Навігаційні та силові дані, як правило, формуються з високою частотою та використовуються для оперативного управління, тоді як енергетичні й параметри середовища можуть змінюватися повільніше та аналізуватися на більших часових інтервалах. У результаті в системі одночасно

присутні дані з мілісекундними, секундними та хвилинними часовими масштабами, що ускладнює їх синхронізацію та спільну обробку.

Окрім часової неоднорідності, інформаційні потоки МАП відрізняються за походженням і напрямом передачі. Внутрішні інформаційні потоки формуються сенсорами та підсистемами платформи і використовуються для локального прийняття рішень у режимі реального часу. Зовнішні інформаційні потоки пов’язані з обміном даними з береговими центрами управління, іншими платформами або супутниковими системами зв’язку і, як правило, мають обмеження за пропускною здатністю та затримками (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Потоки інформації в МАП

Асинхронність надходження даних, різні рівні достовірності та можливі втрати інформації в каналах зв’язку призводять до того, що інформаційні потоки не можуть бути безпосередньо використані для комплексної оцінки технічного стану без попереднього перетворення. Первинні дані потребують

фільтрації, узгодження в часі та агрегації, що підкреслює важливість виділення окремого інформаційного рівня в структурі системи моніторингу.

Таким чином, інформаційні потоки МАП характеризуються високою різнорідністю, багатоканальністю та асинхронністю, і такі особливості визначають обмеження застосування простих методів контролю та формують передумови для переходу від локального аналізу окремих параметрів до системного підходу в інформаційному забезпеченні моніторингу технічного стану. Наприклад, підхід, який забезпечує інтеграцію фізичних процесів, потоків даних і аналітичних моделей у єдину ієрархічну структуру, що підтримує прийняття рішень у реальному часі в узагальненій архітектурі МАП представлено на рис. 4.2.

Наведена архітектура демонструє багаторівневу організацію, де фізична система виступає джерелом первинних даних, а рівні обробки інформації та аналітичного моделювання забезпечують їх фільтрацію, агрегування й прогнозування станів. Контур зворотного зв’язку дозволяє коригувати поведінку фізичної платформи на основі результатів аналізу ризиків та сценарного моделювання, а цифровий двійник виступає ключовим елементом інтегрованої системи підтримки рішень [251].

Для забезпечення стійкого функціонування морської автономної платформи в умовах невизначеності доцільним є використання інтегрованої архітектури цифрового двійника, яка поєднує модулі збору даних, аналітики, моделювання та адаптивного управління. Такий підхід дозволяє здійснювати прогнозування технічного стану, аналіз ризиків та підтримку прийняття рішень у реальному часі.

Запропонований цифровий двійник використовується не лише як інформаційна модель автономної платформи, а насамперед як інструмент експлуатаційного моніторингу технічного стану. Його застосування забезпечує безперервне оцінювання параметрів функціонування, прогнозування деградаційних процесів, визначення залишкового ресурсу критичних підсистем

та формування рекомендацій щодо підтримання необхідного рівня експлуатаційної готовності автономного морського транспортного засобу.



Рисунок 4.2 – Архітектура інтегрованої системи цифрового двійника морської автономної платформи в умовах невизначеності

Обмеження класичних систем моніторингу технічного стану МАП

Класичні системи моніторингу технічного стану, що широко застосовуються в інженерній практиці, були розроблені для умов обмеженої складності об'єктів та постійної участі оператора. У контексті МАП такі підходи демонструють низку принципових обмежень, пов'язаних як з архітектурою систем, так і з логікою обробки інформації [252].

Запропонована архітектура цифрового двійника морської автономної платформи (рис. 4.3) базується на багаторівневому підході, що інтегрує процесизбору даних, їх обробки, моделювання та прийняття управлінських

рішень. Ключовим елементом системи є ядро цифрового двійника, яке забезпечує оцінювання станів та прогнозування поведінки об'єкта на основі якфізичних, так і даних – орієнтованих моделей.

Зворотний зв’язок реалізується через адаптивні механізми управління, що дозволяє підвищити ефективність функціонування системи в умовах динамічної невизначеності.

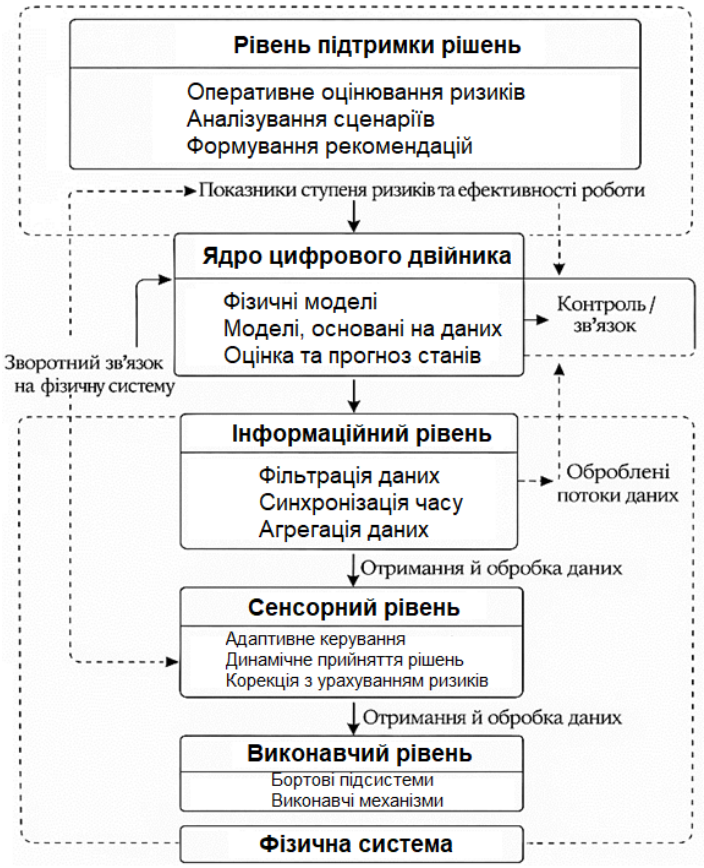


Рисунок 4.3 – Архітектура цифрового двійника морської автономної платформи

Представлені схематичні рішення (рис. 4.2 та рис. 4.3) диференціюються за своїм цільовим спрямуванням у межах запропонованого архітектурного базису цифрового двійника. На рис. 4.2 детерміновано генералізовану багаторівневу топологію інтегрованого середовища цифрового двійника судна-автомата, де виокремлено пласти дата-майнінгу, обчислювально-аналітичних операцій, когнітивного формування рішень та динамічного регулювання.

Водночас рис. 4.3 слугує для поглибленої експлікації внутрішньої організації цифрового двійника, ілюструючи наскрізні логічні та фізичні зв'язки між сенсорикою, інформаційними реєстрами, актуаторами та обчислювальною платформою ядра. Таким чином, перший із зазначених рисунків позиціонується як глобальна модель системної інтеграції платформи, тоді як другий конкретизує локальну функціональну взаємодію в межах безпосередньо керуючого контуру двійника.

Переважна більшість традиційних систем моніторингу ґрунтується на пороговому контролі окремих параметрів, за якого стан вважається нормальним до моменту перевищення наперед заданого граничного значення. Такий підхід не враховує динаміку зміни параметрів, взаємозв’язки між окремими підсистемами та накопичувальні ефекти деградації. У результаті формуються потенційно небезпечні тенденції, які можуть залишатися непоміченими до моменту досягнення системою критичного стану.

Ще одним обмеженням є реактивний характер логіки прийняття рішень. Класичний моніторинг орієнтований на фіксацію факту відхилення, а не на його попередження. Відсутність механізмів прогнозування та оцінки розвитку технічного стану у часі суттєво знижує можливості планування експлуатаційних дій, що особливо критично для автономних платформ, які функціонують без постійного зв’язку з оператором [253, 254].

Суттєву проблему становить також фрагментарність аналізу, за якої параметри різних підсистем розглядаються ізольовано. Навігаційні, енергетичні та силові показники, як правило, контролюються незалежно, без урахування їх взаємного впливу. Такий підхід не дозволяє сформувати цілісне уявлення про технічний стан платформи як єдиної системи та ускладнює ідентифікацію причинно-наслідкових зв’язків між відмовами.

Класичні системи моніторингу також характеризуються високою залежністю від оператора. Інтерпретація даних, прийняття рішень щодо допустимості подальшої експлуатації та вибору коригувальних дій часто

покладаються на людину. В умовах автономної експлуатації або затримок у каналах зв’язку такий підхід є неприйнятним, оскільки не забезпечує необхідної швидкості та обґрунтованості рішень (рис. 4.4).

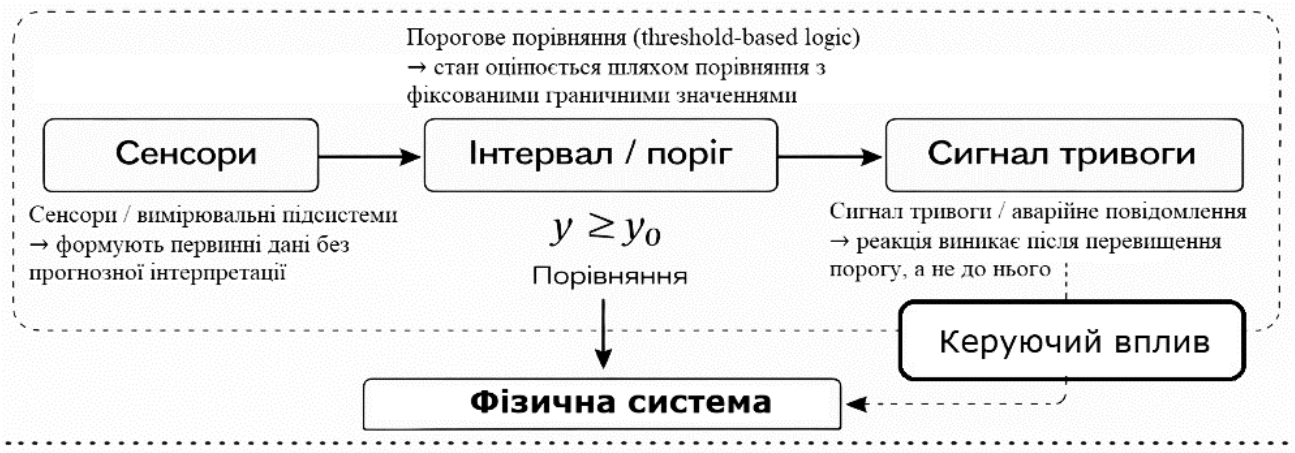


Рисунок 4.4 – Типова схема класичного моніторингу з пороговою логікою прийняття рішень

Окрім цього, традиційні підходи, як правило, не передбачають виділення окремого інформаційного рівня, що відповідає за узгодження, агрегацію та інтерпретацію різнорідних даних. Первинні вимірювання використовуються без достатньої попередньої обробки, що унеможливлює їх ефективне застосування в аналітичних моделях та системах підтримки прийняття рішень. Інформаційний рівень – це проміжна ланка між фізичними процесами та рівнем управління, яка забезпечує перетворення неоднорідних і асинхронних даних у структуровану інформацію, придатну для аналізу та прийняття рішень (рис. 4.5).

У структурі управління експлуатацією МАП доцільно виділяти окремий інформаційний рівень, який займає проміжне положення між фізичним рівнем та рівнем управління. На цьому рівні здійснюється перетворення первинних даних, що надходять від сенсорних підсистем, у структуровану інформацію, придатну для подальшого аналізу та прийняття рішень. Основними функціями інформаційного рівня є синхронізація асинхронних потоків даних, фільтрація шумів, агрегація параметрів та формування інформативних ознак, які відображають поточний технічний стан платформи [255, 256].

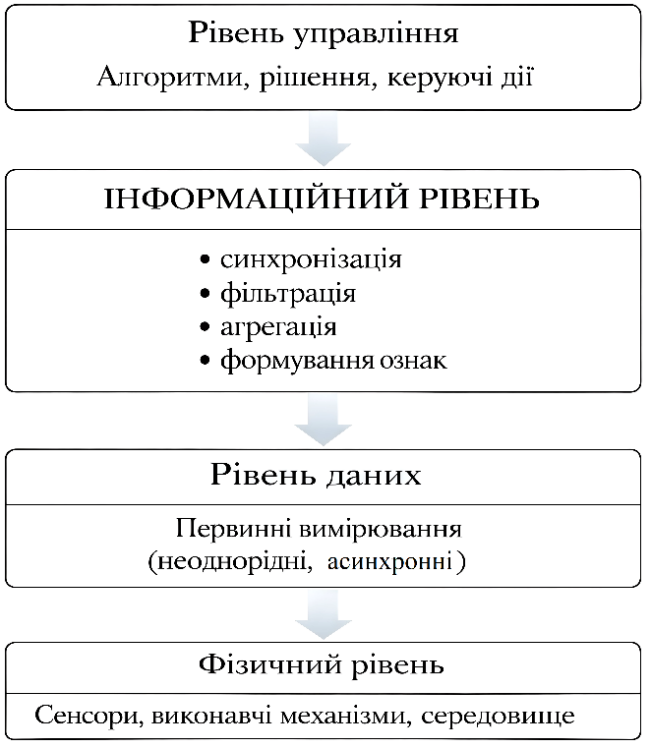


Рисунок 4.5 – Узагальнена схема інформаційного рівня в структурі управління експлуатацією

Таким чином, класичні системи моніторингу не відповідають вимогам, що висуваються до МАП, і не забезпечують перехід від контролю окремих параметрів до системної оцінки технічного стану, що обґрунтовує необхідність розвитку інформаційного забезпечення моніторингу та створення передумов для використання аналітичних методів і прогнозних моделей, що буде розглянуто в наступних розділах.

Схема на рис. 4.6 ілюструє роль інформаційного рівня як ключового елемента, що забезпечує перехід від різнорідних первинних даних до узгодженої інформаційної бази, необхідної для ефективного моніторингу та управління експлуатацією МАП.

Так на схемі подано узагальнену внутрішню структуру інформаційного рівня системи моніторингу технічного стану морської автономної платформи. Вхідними потоками цього рівня є дані навігаційного, енергетичного, силового та характеру середовища, отримані від сенсорних підсистем платформи, що

відзначаються неоднорідністю, різними частотами дискретизації та асинхронністю надходження [257].



Рисунок 4.6 – Внутрішня логіка інформаційного рівня

Рисунки 4.1–4.6 відображають послідовне ускладнення моделі інформаційного забезпечення – від структури потоків даних до формування інформаційних показників, що використовуються в аналітичних моделях оцінювання стану та цифрових двійниках.

Початковий етап обробки передбачає узгодження даних у часі, що забезпечує приведення всіх вимірювань до єдиної часової шкали. Це необхідна

умова для подальшої інтеграції параметрів, що характеризують стан різних підсистем. Наступним етапом здійснюються фільтрація та очищення даних, спрямовані на усунення шумів, вимірювальних похибок і випадкових спотворень, що в цілому підвищує достовірність та стабільність інформаційної бази.

На етапі агрегації здійснюється узагальнення попередньо оброблених даних, яке дозволяє зменшити обсяг інформації та перейти від первинних вимірювань до індикаторів стану окремих підсистем. Цей процес сприяє формуванню єдиних часових масштабів та оптимізації структури даних без втрати їх змістової значущості [258–260].

Результатом функціонування інформаційного рівня є формування системи інформаційних показників, що у структурованій формі відображають поточний технічний стан морської автономної платформи і такі показники виступають базовими елементами для подальшого аналітичного опрацювання, прогнозування стану, підтримки прийняття рішень та інтеграції із цифровими двійниками.

4.2. Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ

Зростання рівня автономності морських платформ супроводжується ускладненням їх технічної структури та умов експлуатації, що висуває підвищені вимоги до систем моніторингу та оцінки технічного стану. У реальних умовах морські автономні платформи функціонують під впливом змінного морського середовища, нерівномірних експлуатаційних навантажень і обмежень зв’язку з оператором, що унеможливлює застосування виключно реактивних підходів до контролю працездатності.

Класичні системи моніторингу технічного стану, які ґрунтуються на пороговому контролі окремих параметрів, не забезпечують комплексної оцінки функціонального стану платформи як єдиної системи. Такі підходи не враховують взаємозв’язки між підсистемами, динаміку зміни параметрів у часі

та накопичувальні ефекти деградації, що призводить до запізнілого виявлення небезпечних станів і зниження ефективності управління експлуатацією.

В умовах автономної роботи особливо актуальною є задача переходу від аналізу розрізнених інформаційних показників до кількісної аналітичної оцінки технічного стану, здатної відображати поточний рівень працездатності платформи та його зміну у часі. Це зумовлює необхідність розробки формалізованих методів аналітичної оцінки, які базуються на інтеграції різнорідних інформаційних показників і можуть бути використані як основа для підтримки прийняття рішень у системах автономного управління [261].

Наявність значного масиву досліджень у сфері моніторингу та діагностики, однак питання інтеграції різнорідних інформаційних показників у системну аналітичну оцінку технічного стану морських автономних платформ залишається недостатньо опрацьованим і потребує подальшого розвитку.

Метою параграфу є розробка та обґрунтування підходів до аналітичної оцінки технічного стану морських автономних платформ на основі інтеграції структурованих інформаційних показників, сформованих у системі моніторингу.

У межах дослідження передбачається визначення принципів формалізації показників стану, їх узгодження та об’єднання в інтегральні аналітичні характеристики, придатні для оцінки працездатності платформи та підтримки прийняття рішень в умовах автономної експлуатації [262, 263].

Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ

Сформоване на інформаційному рівні представлення стану морської автономної платформи у вигляді узгоджених інформаційних показників створює передумови для переходу до кількісної аналітичної оцінки. На цьому етапі ключовим завданням є перетворення різнорідної інформації про стан підсистем у формалізовані критерії, здатні відображати рівень працездатності платформи в цілому та його зміну у часі.

Аналітична оцінка технічного стану розглядається як процес інтеграції інформаційних показників, що характеризують функціонування навігаційної,

енергетичної, силової та інших критично важливих підсистем. На відміну від локального контролю окремих параметрів, такий підхід дозволяє враховувати взаємозв'язки між підсистемами та оцінювати платформу як єдиний об'єкт управління.

Формалізація показників стану

Для уникнення неоднозначності надалі будемо розрізняти первинні параметри моніторингу, нормалізовані інформаційні показники та змінні фізичного стану платформи.

Нехай

$p_i(t)$ – первинний вимірюваний параметр, отриманий від сенсорної підсистеми;

$q_i(t)$ – нормалізований інформаційний показник, сформований після обробки даних;

$s(t) = \left[s_1(t), s_2(t), ..., s_m(t) \right]^T$] – вектор фізичного стану морської автономної платформи.

Тоді множина інформаційних показників визначається як $Q = q_1, q_2, \ldots, q_n$.

Множина дескрипторів технічного стану платформи формалізується у вигляді вектора узагальнених показників:

$$Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_n\}, \tag{4.1}$$

де кожен окремий елемент x_i відображає поточний стан відповідної субструктурної компоненти або функціонального вузла досліджуваного об'єкта. З метою забезпечення сопоставимості та математичної коректності подальших обчислень, вихідні гетерогенні параметри підлягають процедурі масштабування та лінійної нормалізації. Ця операція трансформує розмірні фізичні величини у безрозмірні локальні критерії, обмежені інтервалом [0, 1], де граничні значення, що асимптотично наближаються до одиниці, еквівалентні номінальному (еталонному) режиму функціонування системи.

Для дескрипторів позитивної спрямованості (монотонно зростаючих метрик, де збільшення абсолютного значення фіксує покращення техніко-експлуатаційного стану об'єкта) розрахунок нормованого індексу q_i реалізується за залежністю:

$$q_i = \frac{p_i - p_{i,\min}}{p_{i,\max} - p_{i,\min}}. \quad (4.2)$$

Для показників, збільшення яких свідчить про погіршення стану, використовується співвідношення

$$q_i = \frac{p_{i,\max} - p_i}{p_{i,\max} - p_{i,\min}}. \quad (4.3)$$

У разі виходу параметра за допустимі межі значення (q_i) обмежується інтервалом $0 \le q_i \le 1$.

У результаті всі інформаційні показники приводяться до єдиної безрозмірної шкали та можуть використовуватись для подальшої інтегральної оцінки технічного стану.

Інтегральна оцінка технічного стану

Для формування узагальненої аналітичної оцінки доцільно використовувати інтегральний індекс технічного стану H, який визначається як зважена сума нормалізованих показників:

$$H = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i , \quad (4.4)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, Вагові коефіцієнти повинні задовольняти умови $w_i \ge 0$,

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \tag{4.5}$$

У межах даного дослідження значення вагових коефіцієнтів визначаються експертним способом з урахуванням функціональної важливості відповідних підсистем морської автономної платформи. За необхідності вагові коефіцієнти можуть уточнюватися для окремих місій або режимів функціонування автономної платформи.

Для врахування критично важливих підсистем до інтегрального індексу вводиться блокувальний коефіцієнт

$$G_{crit} = \begin{cases} 1, & q_i \geq q_{i,crit}, \forall i \in \Omega_{crit}, \\ 0, & \exists i \in \Omega_{crit} : q_i < q_{i,crit}. \end{cases} \tag{4.6}$$

де Ω_{crit} – множина критично важливих підсистем, а $q_{i,crit}$ – допустиме граничне значення відповідного показника.

Тоді інтегральна оцінка технічного стану визначається як

$$H = G_{crit} \sum_{i=1}^{n} w_i q_i. \tag{4.7}$$

Таким чином, навіть за високих значень інших показників порушення критичного стану хоча б однієї підсистеми не дозволяє інтерпретувати загальний стан платформи як задовільний.

Запровадження вагових коефіцієнтів дозволяє адаптувати аналітичну модель до конкретного типу морської автономної платформи, умов експлуатації та пріоритетів безпеки. Таким чином, інтегральний індекс H відображає узагальнений рівень працездатності платформи та може використовуватися для порівняння різних режимів функціонування [264].

Динамічна інтерпретація результатів

Для аналізу динаміки технічного стану використовується швидкість зміни інтегрального індексу $V_H(t) = \frac{dH(t)}{dt}$.

Від'ємні значення $V_H(t)$ свідчать про деградацію технічного стану, тоді як додатні значення характеризують відновлення або покращення працездатності системи.

Для зменшення впливу випадкових коливань доцільно використовувати ковзне середнє

$$\bar{H}(t) = \frac{1}{T_w}\int_{t-T_w}^{t} H(\tau)d\tau, \qquad (4.8)$$

де T_w – ширина вікна усереднення.

Критичний стан автономної морської платформи фіксується за виконання умови $H(t) \le H_{crit}$, де H_{crit} – мінімально допустиме значення інтегрального індексу технічного стану.

Оцінка технічного стану має динамічний характер і базується на аналізі зміни інтегрального індексу у часі. Тренди зменшення значення H можуть свідчити про поступову деградацію окремих підсистем або несприятливий вплив умов експлуатації, що створює основу для переходу від реактивного моніторингу до проактивного управління, зокрема, коригування режимів роботи платформи та планування технічного обслуговування.

Таким чином, аналітична оцінка технічного стану забезпечує формалізоване представлення результатів моніторингу у вигляді кількісних показників, придатних для використання в системах підтримки прийняття рішень морських автономних платформ (рис. 4.7).

Запропонований підхід до аналітичної оцінки технічного стану морських автономних платформ дозволяє перейти від аналізу окремих інформаційних

показників до узагальненого кількісного представлення працездатності платформи як цілісного об’єкта. На відміну від класичних систем моніторингу, що базуються на пороговому контролі параметрів, інтегральна оцінка забезпечує врахування взаємозв’язків між підсистемами та їхнього спільного впливу на загальний технічний стан [265].



Рисунок 4.7 – Узагальнена схема аналітичної оцінки технічного стану

Використання нормалізованих інформаційних показників у поєднанні з ваговими коефіцієнтами забезпечує можливість адаптації аналітичної моделі до різних типів морських автономних платформ і умов їх експлуатації. Зокрема, пріоритетність навігаційних, енергетичних або силових підсистем може змінюватися залежно від функціонального призначення платформи, району плавання та наявних експлуатаційних обмежень, що підтверджує гнучкість запропонованого підходу та його придатність до масштабування.

Аналіз динаміки інтегрального індексу технічного стану створює передумови для раннього виявлення деградаційних процесів, які можуть не проявлятися у вигляді перевищення окремих порогових значень. Таким чином, аналітична оцінка дозволяє перейти від реактивної логіки моніторингу до проактивного управління експлуатацією морської автономної платформи [266, 267].

Слід зазначити, що ефективність аналітичної оцінки значною мірою залежить від якості інформаційних показників, сформованих на попередньому етапі, а також від обґрунтованості вибору вагових коефіцієнтів. Це визначає необхідність подальших досліджень, спрямованих на уточнення методів

формування показників стану та адаптації аналітичних моделей до конкретних експлуатаційних сценаріїв.

Отримані результати формують аналітичну основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління та інтеграції методів оцінки технічного стану в більш складні інформаційно-аналітичні архітектури морських автономних платформ.

4.3 Інтеграція цифрових двійників у процес управління експлуатацією морських автономних платформ

На сучасному етапі розвитку морські автономні платформи характеризуються зростанням складності їхніх функціональних завдань, різнорідністю та тривалістю місій, а також ускладненням рівня автономності й прийняття рішень. Виконання моніторингових, транспортних операцій та різного роду інспекцій в морському середовищі відбувається за умов обмежених енергетичних ресурсів, змінних гідрометеорологічних факторів і часткової невизначеності навігаційної обстановки. За таких умов ключовим чинником ефективності та безпеки експлуатації стає здатність системи не лише реагувати на відхилення, а й прогнозувати їх розвиток у часі.

Традиційні підходи до управління експлуатацією МАП здебільшого базуються на використанні реактивних алгоритмів, які застосовують поточні вимірювання або фіксовані порогові значення параметрів і такий підхід обмежує можливості своєчасного виявлення деградаційних процесів у технічних вузлах та не забезпечує оптимальної адаптації режимів функціонування платформи до змін умов середовища та стану системи. У результаті зростає ризик передчасного вичерпання ресурсу, зниження ефективності місії або виникнення аварійних режимів.

У сучасних умовах особливої актуальності набуває концепція цифрового двійника (Digital Twin – *DT*) як засобу інтеграції фізичних об’єктів із їх

віртуальними відображеннями, що функціонують у режимі реального часу. На відміну від традиційних офлайн- або імітаційних моделей, цифровий двійник забезпечує постійний зв'язок між фізичною платформою, сенсорними даними та аналітичними модулями та використовується як інструмент безперервного моніторингу технічного стану, прогнозування деградаційних процесів, оцінювання залишкового ресурсу та підтримки прийняття рішень щодо ефективної експлуатації автономного морського транспортного засобу [268–270].

Сучасний стан науково-технологічного розвитку характеризується стрімкою експансією парадигми цифрових двійників у стратегічні домени морського транспорту, офшорної енергетики та інфраструктурного моніторингу. Впровадження *DT*-концепцій для автономних підводних апаратів та плавучих енергетичних систем засвідчує високу ефективність конвергенції емпіричних даних із інтелектуальними моделями на базі штучного інтелекту (ШІ) для керування складними соціотехнічними екосистемами. Методологічний потенціал *DT*-технологій дозволяє прецизійно вирішувати завдання діагностики деградаційних процесів (втомних та корозійних пошкоджень), тоді як імплементація блокчейн-протоколів забезпечує цілісність та верифікованість обміну даними у межах єдиного інформаційного простору системи.

У контексті стратегії «блакитної економіки» та розвитку відновлюваної енергетики цифрові двійники трансформуються у базовий інструментарій предиктивної аналітики, що охоплює імовірнісне моделювання екологічних ризиків та оптимізацію експлуатаційних режимів вітроенергетичних установок. Формування багаторівневих обчислювальних архітектур типу «edge–fog–cloud» у поєднанні з нейромережевими алгоритмами енергоефективності створює теоретико-технічний фундамент для інтелектуального моніторингу просторово-розподілених об'єктів. Глобальні вектори розвитку *DT* у промисловому секторі детермінують пріоритетність самоорганізованих систем, здатних до безперервної актуалізації на основі методів глибокого машинного навчання [271].

Окреслена технологічна конвергенція підтверджує, що цифрові двійники є динамічним інструментом перманентної діагностики та прогнозного обслуговування (predictive maintenance). Здатність *DT* здійснювати симуляцію експлуатаційних сценаріїв у реальному масштабі часу безпосередньо трансформує методологію управління ризиками, гарантуючи високий рівень функціональної живучості та автономності технічних систем у стохастичних середовищах.

Особливої ваги цифровий двійник набуває у морських автономних системах, де деградація енергетичних, силових, навігаційних та комунікаційних вузлів відбувається нерівномірно та під впливом агресивного середовища. Інтеграція моделей деградації, показників інтегральної ефективності та сценарного аналізу у структурі *DT* дозволяє перейти від локального моніторингу параметрів до системного прогнозування працездатності та залишкового ресурсу платформи [272–275].

У межах цієї статті цифровий двійник розглядається не лише як інструмент візуалізації або симуляції, а як активний елемент експлуатаційного управління, здатний: відображати поточний технічний стан платформи; прогнозувати зниження ефективності та деградацію ключових вузлів; формувати рекомендації для адаптації режимів функціонування; забезпечувати інформаційну основу для систем підтримки прийняття рішень.

Метою даного параграфу є обґрунтування концепції інтеграції цифрового двійника у процес експлуатаційного управління автономними морськими платформами та розробка структурної моделі *DT*, яка об'єднує фізичні сенсорні дані, аналітичні індикатори ефективності й сценарні механізми прогнозування [276].

Запропонований підхід створює основу для формування інтелектуальних керуючих систем нового покоління, здатних адаптивно підвищувати рівень надійності, енергоефективності та безпеки в умовах автономного функціонування морських платформ.

Використання цифрового двійника в морських місіях (use-case)

Розглянемо морську автономну платформу, що виконує тривалу місію з інспекції в прибережній або відкритій морській зоні. Платформа функціонує в

умовах обмеженого енергетичного ресурсу, змінних гідрометеорологічних факторів та часткової невизначеності навігаційного середовища. У процесі експлуатації ключові технічні вузли платформи (енергетичний блок, силовий модуль, навігаційні та комунікаційні підсистеми) зазнають поступової деградації, що безпосередньо впливає на безпеку та ефективність виконання місії.

У традиційних системах управління оцінка технічного стану здійснюється реактивно – на основі поточних вимірювань або після виникнення відхилень. Такий підхід не дозволяє своєчасно прогнозувати втрату працездатності та оптимально адаптувати режими функціонування платформи [277–280].

У цьому контексті цифровий двійник розглядається як інтегрований інструмент, що забезпечує безперервне відображення фізичного стану платформи у віртуальному середовищі, поєднуючи телеметричні дані, аналітичні моделі деградації та оцінку інтегральної ефективності.

У межах розглянутого use-case цифровий двійник виконує такі ключові функції:

– синхронізацію станів фізичної платформи та її віртуальної копії у реальному часі;

– прогнозування деградації окремих вузлів і зниження інтегральної ефективності $IEE(t)$;

– оцінювання прогнозованого залишкового ресурсу (RUL);

– формування рекомендацій щодо адаптації режимів функціонування (зниження навантаження, зміна швидкісного профілю, перерозподіл енергоресурсів).

На основі функцій деградації може бути оцінений залишковий ресурс функціонального вузла $\tau_i = \inf\left\{\tau \geq 0 : D_i(t+\tau) \geq D_{i,crit}\right\}$, де $D_{i,crit}$ – критичний рівень деградації, після досягнення якого подальша експлуатація вузла вважається недопустимою. Оцінка RUL $i(t)$ може використовуватись для планування технічного обслуговування та прогнозування ефективності виконання місії.

Наприклад, у разі прискореної деградації акумуляторного блоку цифровий двійник дозволяє заздалегідь спрогнозувати досягнення критичного порогу ефективності та ініціювати превентивну адаптацію місії, зменшуючи енергоспоживання або змінюючи сценарій руху. Таким чином, *DT* перетворює процес управління з реактивного на прогнозно-адаптивний, що є критично важливим для автономних морських систем з обмеженими ресурсами.

Постановка задачі та концепція інтеграції цифрового двійника

1. Формалізація об’єкта управління

Розглянемо морську автономну платформу як складну технічну систему, що функціонує в умовах змінного середовища та обмежених ресурсів. Стан платформи у момент часу *t*описується вектором

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \ldots, s_n(t)], \tag{4.9}$$

тут $s(t)$ характеризує фізичний стан морської автономної платформи та включає навігаційні, енергетичні, структурні та інші змінні, що описують її функціонування. Таке позначення використовується для уникнення неоднозначності з нормалізованими інформаційними показниками q_i, введеними раніше.

Керуючі дії на систему описуються вектором

$$u(t) = \{u_1(t), u_2(t), \ldots, u_m(t)\}, \tag{4.10}$$

де $u_j(t)$ відповідає за зміну режимів руху, розподіл енергетичних ресурсів або адаптацію функціональних режимів платформи.

Зовнішні збурення, пов’язані з впливом морського середовища (хвилювання, вітер, течії) та невизначеністю експлуатаційних умов, узагальнено описуються вектором $\xi(t)$, який відображає випадкову або квазістохастичну природу зовнішніх впливів.

2. Інтегральний показник технічної експлуатації

Для кількісної оцінки працездатності морської автономної платформи в процесі виконання місії вводиться інтегральний показник технічної експлуатації експлуатації $IEE(t)$, який узагальнює вплив деградації окремих технічних вузлів на загальний стан системи.

На відміну від інтегрального індексу технічного стану $H(t)$, який характеризує поточну працездатність морської автономної платформи, інтегральний показник технічної експлуатації експлуатації $IEE(t)$ відображає здатність системи виконувати поставлену місію з урахуванням технічного стану, зовнішніх умов та режиму функціонування

$$IEE(t) = F\left(H(t), R(t), E(t)\right),$$

або

$$IEE(t) = \sum_{i=1}^{N} w_i (1 - D_i(t)), \qquad (4.11)$$

де N – кількість функціонально значущих вузлів платформи; w_i – ваговий коефіцієнт важливості i-го вузла ($\sum w_i = 1$); $D_i(t) \in [0,1]$ – функція деградації вузла, яка характеризує втрату його працездатності у часі.

При цьому функції деградації $D_i(t)$ визначаються з використанням інтегрального індексу технічного стану $H(t)$, отриманого на попередньому етапі аналітичної оцінки.

Динаміка деградації окремих функціональних вузлів морської автономної платформи описується рівнянням

$$\frac{dD_i(t)}{dt} \varphi_i\left(L_i(t), E_i(t), R_i(t)\right), \qquad (4.12)$$

де $L_i(t)$ – експлуатаційне навантаження на вузол; $E_i(t)$ – вплив факторів зовнішнього середовища; $R_i(t)$ – режим функціонування системи; $\varphi_i(\cdot)$ – функція накопичення деградації.

Для дискретного представлення може використовуватись співвідношення

$$D_i(t+\Delta t)D_i(t)+\varphi_i\Delta t. \qquad (4.13)$$

Таким чином, накопичення деградації розглядається як безперервний процес, що залежить від умов експлуатації автономної морської платформи, $H(t)$ є одним із визначальних факторів формування показника $IEE(t)$, але не є йому тотожним. У підсумку значення $IEE(t) = 1$ відповідає повністю працездатному стану платформи, тоді як зменшення $IEE(t)$ відображає накопичений ефект деградації технічних компонентів. Досягнення критичного порогового значення IEE_{crit} інтерпретується як перехід системи у граничний експлуатаційний стан.

3. Формалізація цифрового двійника

У межах даного дослідження цифровий двійник оперує не істинним станом морської автономної платформи, який у загальному випадку є недоступним для безпосереднього спостереження, а його оцінкою, сформованою на основі вимірювань та аналітичних моделей. Тому надалі використовується оцінка стану $\hat{s}(t)$, яка формується на основі інформаційних потоків, моделей системи та процедур обробки даних.

Цифровий двійник морської автономної платформи розглядається як динамічна віртуальна модель, тісно пов’язана з фізичним об’єктом, і формально описується кортежем

$$DT(t)=\{\hat{s}(t),M,P,S\}, \qquad (4.14)$$

де $\hat{s}(t)$ – оцінений стан; M – моделі; P – параметри невизначеності; S – інформаційні сервіси цифрового двійника.

$$\hat{s}(t)=G\big(z(0:t),u(0:t),M,\xi(t)\big), \qquad (4.15)$$

де $z(0:t)$ – вимірювання; $u(0:t)$ – керуючі впливи; M – модель; $\xi(t)$ – сукупна невизначеність.

Параметр невизначеності $\xi(t)$ узагальнено враховує вплив шумів вимірювання, затримок передавання даних, похибок моделей та зовнішніх збурень, характерних для автономної експлуатації морських платформ.

Ключовою особливістю цифрового двійника є безперервна синхронізація між фізичним та віртуальним об’єктами, що забезпечує актуальність прогнозів і коректність сценарного аналізу.

4. Постановка задачі експлуатаційного управління

Задача експлуатаційного управління морською автономною платформою в умовах невизначеності формулюється як задача оптимізації керуючих впливів:

$$\max_{u(t)} IEE\left(t+T_p\right), \tag{4.16}$$

де T_p – горизонт прогнозування.

Практична реалізація задачі максимізації прогнозованої ефективності $IEE(t+T_p)$ виконується шляхом мінімізації функціоналу втрат J.

Для забезпечення коректності інтегрального функціоналу всі його складові використовуються у безрозмірному нормалізованому вигляді. На відміну від реактивного управління, цифровий двійник забезпечує прогнозування майбутнього стану системи на горизонті T_p, тому оптимізація виконується відносно прогнозованого значення ефективності експлуатації.

$$J=\int_t^{t+T_p}\left[\alpha\left(1-IEE(\tau)\right)+\beta R(\tau)+\gamma U(\tau)\right]d\tau, \tag{4.17}$$

де $U(\tau)$ – нормовані витрати керування; α, β, γ – коефіцієнти компромісу між ефективністю, ризиком та енергетичними витратами, за умов динаміки системи

$$\frac{ds(t)}{dt}=f\left(s(t),u(t),\xi(t)\right), \tag{4.18}$$

де $s(t)$ – вектор фізичного стану морської автономної платформи, $u(t)$ – вектор керуючих впливів, $\xi(t)$ – сукупність зовнішніх збурень та невизначеностей;

$$u(\tau) \in U, \quad IEE(\tau) \geq IEE_{crit}, \quad R(\tau) \leq R_{crit}, \quad \forall \tau \in [t, t+T_p]$$

Функціонал J інтерпретується як інтегральний показник втрат, який враховує зниження ефективності експлуатації, рівень ризику та витрати керування. Тому задача вибору оптимального сценарію функціонування формулюється як задача мінімізації функціоналу (J).

Обмеження повинні виконуватися на всьому горизонті прогнозування, а не лише в поточний момент часу.

Наведена модель описує еволюцію стану платформи у часі та використовується цифровим двійником під час прогнозно-сценарного моделювання та експлуатаційних обмежень

$$u(t) \in U, \ IEE(t) \geq IEE_{crit}, \ R(t) \leq R_{crit}, \tag{4.19}$$

де $f(\cdot)$ – нелінійна функція динаміки платформи; U – допустима множина керуючих дій; $R(t)$ – інтегральний показник ризику експлуатації; R_{crit} – допустимий рівень ризику.

У межах цієї постановки цифровий двійник використовується як обчислювальне середовище для прогнозування еволюції стану $x(t)$ та інтегральної ефективності $IEE(t)$ за різних сценаріїв керування.

5. Концептуальна роль цифрового двійника

У межах запропонованої концепції цифровий двійник розглядається не лише як засіб візуалізації чи моніторингу, а як активний елемент експлуатаційної архітектури, що функціонує в режимі реального часу. Його ключова роль полягає в:

– прогнозуванні технічної деградації компонентів платформи;

– оцінюванні залишкового ресурсу з урахуванням умов експлуатації;

– моделюванні наслідків альтернативних режимів функціонування;

– підтримці прийняття адаптивних рішень, що враховують динаміку зовнішніх факторів і внутрішній стан системи.

Завдяки такій інтеграції цифровий двійник виступає основою проактивної стратегії експлуатації, яка дозволяє перейти від традиційного реактивного управління до системи, орієнтованої на випереджувальне забезпечення ефективності, стійкості та безпеки морських автономних платформ [281–284].

Архітектура цифрового двійника морської автономної платформи

1. Загальна архітектурна концепція

Цифровий двійник МАП розглядається як багаторівнева кіберфізична система, що забезпечує безперервний зв'язок між фізичним об'єктом та його віртуальним представленням у процесі експлуатації. Архітектура цифрового двійника побудована за принципом замкненого циклу «дані – модель – прогноз – управлінське рішення» та орієнтована на роботу в умовах обмежених обчислювальних і комунікаційних ресурсів.

Загалом архітектура включає чотири взаємопов'язані рівні, такі як фізичний рівень платформи, рівень збору та обробки даних, рівень аналітичного моделювання цифрового двійника та рівень підтримки прийняття експлуатаційних рішень:

$$DT = F_4 \circ F_3 \circ F_2 \circ F_1, \tag{4.20}$$

де $F_1 : z \to \hat{s}$, $F_2 : \hat{s} \to (D, RUL)$, $F_3 : (\hat{s}, D) \to IEE$, $F_4 : IEE \to u^*$, де F_k відповідає функціональному шару цифрового двійника (від фізичного до рівня прийняття рішень), тобто фізичний рівень (сенсори, платформа), оцінювання та синхронізація стану – аналітичне ядро цифрового двійника (включно зі сценарним прогнозуванням), рівень підтримки прийняття рішень.

Сценарне прогнозування розглядається як внутрішній функціональний механізм аналітичного ядра цифрового двійника та не виділяється в окремий архітектурний рівень.

2. Фізичний рівень та сенсорна інфраструктура

Фізичний рівень охоплює морську автономну платформу як сукупність технічних вузлів, виконавчих механізмів і сенсорних систем. До основних компонентів належать навігаційні модулі, енергетичні системи, силові установки, комунікаційні вузли та допоміжні підсистеми. Сенсорна інфраструктура забезпечує безперервне вимірювання параметрів стану платформи та зовнішнього середовища, формуючи вектор спостережень $z(t)$. Ці дані слугують первинним джерелом інформації для актуалізації цифрового двійника та оцінювання поточного технічного стану [285].

Фізичний рівень описує реальну автономну платформу та її сенсорну систему. Вектор вимірювань формується як:

$$z(t) = h(x(t)) + v(t), \tag{4.21}$$

$$v(t) \sim N(0, R_v)$$

де шум вимірювання вважається гаусовим із коваріаційною матрицею R_v, $x(t)$ – істинний стан платформи; $h(\cdot)$ – оператор сенсорного відображення; $v(t)$ – шум вимірювань. Цей шар відповідає блоку 1 на схемі рис. 4.8.

Компоненти вектора спостережень $z(t)$ формуються навігаційними, енергетичними, структурними та екологічними сенсорами морської автономної платформи.

3. Рівень збору та синхронізації даних

Рівень збору даних виконує функції фільтрації, агрегації та часової синхронізації інформації, отриманої з фізичного об’єкта. На цьому рівні реалізуються алгоритми попередньої обробки, включно з усуненням шумів, компенсацією втрат даних та приведенням різнорідних сигналів до єдиного часового масштабу.

Результатом роботи цього рівня є оцінений вектор стану платформи $\hat{x}(t)$, який використовується як вхідна інформація для аналітичних модулів цифрового двійника. Важливою вимогою є мінімізація затримок між фізичним

об’єктом та віртуальною моделлю, що забезпечує квазіреальний режим функціонування *DT*.



Рисунок 4.8 – Архітектура цифрового двійника МАП

На другому рівні здійснюється відновлення оціненого стану платформи:

$$\hat{s}(t) = F_2(\hat{s}(t), z(t-\Delta t), u(t)) \qquad (4.22)$$

де F_2 реалізує фільтрацію, агрегацію та часову синхронізацію даних. Цей рівень формує зв’язок між фізичною платформою та аналітичним ядром цифрового двійника.

4. Аналітичне ядро цифрового двійника

Аналітичне ядро є центральним елементом архітектури цифрового двійника та включає набір взаємопов'язаних моделей, які описують поведінку автономної платформи в експлуатації. До його складу входять моделі деградації технічних вузлів, моделі інтегральної ефективності $IEE(t)$, моделі енергоспоживання та ресурсних обмежень, сценарні та прогнозні модулі.

На основі оціненого стану $\hat{x}(t)$ аналітичне ядро обчислює прогнозовану еволюцію системи та визначає очікувану зміну показника ефективності у часі, що дозволяє цифровому двійнику не лише відображати поточний стан платформи, але й оцінювати наслідки альтернативних експлуатаційних режимів.

Аналітичне ядро (шар 3 на схемі рис. 4.8) формалізується як множина моделей:

$$M = \{M_D, M_E, M_R\}, \tag{4.23}$$

де M_D – моделі деградації вузлів; M_E – модель інтегральної ефективності; M_R – ресурсні та енергетичні обмеження.

Інтегральна ефективність обчислюється як:

$$IEE(t) = M_E(\hat{x}(t), D(t)), \tag{4.24}$$

що забезпечує перехід від локальних станів до глобального показника працездатності.

$$D(t) = M_D(\hat{x}(t), u(t), t), \tag{4.25}$$

$$\hat{x}(t) \to M_D \to D(t) \to M_E \to IEE(t).$$

5. Рівень сценарного аналізу та прогнозування

Сценарний рівень цифрового двійника забезпечує моделювання можливих варіантів розвитку подій у процесі виконання місії. Для заданих керуючих впливів

$u(t)$ та обмежень система формує множину сценаріїв $S = \{S_1, S_2, ..., S_K\}$, кожен з яких відповідає окремому експлуатаційному режиму або стратегії управління.

Для кожного сценарію оцінюється прогнозована траєкторія $IEE(t)$, яка дозволяє порівнювати альтернативні рішення за критеріями ефективності, ризику та залишкового ресурсу платформи. Сценарний рівень (шар 4, рис. 4.8) реалізує прогноз еволюції ефективності для множини альтернативних режимів: $S = \{S_1, S_2, ..., S_K\}$,

$$IEE(t+\tau) = \Phi\left(IEE(t), \hat{x}(t), u_k(t:t+\tau), M\right) \qquad (4.26)$$

де $u_k(t)$ – керування, що відповідає сценарію S_k, $\Phi(\cdot)$ – прогнозний оператор цифрового двійника для сценарію S_k.

Цей рівень забезпечує what-if аналіз у цифровому двійнику. Тут сценарний аналіз розглядається як функціональний підрівень аналітичного ядра цифрового двійника, однак для зручності формалізації його виділено в окремий підрозділ.

6. Рівень підтримки прийняття рішень

Рівень підтримки прийняття рішень інтегрує результати аналітичних і сценарних розрахунків у форму, зручну для експлуатаційного персоналу або автономних керуючих алгоритмів. На цьому рівні формуються рекомендації щодо адаптації режимів функціонування, зниження навантажень або зміни стратегії місії.

Цифровий двійник у такій архітектурі виступає не пасивною віртуальною копією, а активним елементом експлуатаційної системи, що забезпечує проактивне управління на основі прогнозу. Фінальний рівень формалізується як задача вибору оптимальної стратегії:

$$u^*(t) = u_k(t), \qquad k = \arg\min_k J_k, \qquad (4.27)$$

$$S^* = \arg\min_{S_k \in S} J_k,$$

$$u^*(t) = u(S^*),$$

де $J(\cdot)$ – функціонал компромісу ефективність-ризик; $R_k(t)$ – оцінка експлуатаційного ризику сценарію. Цей рівень відповідає блоку 5 на схемі рис. 4.8 та формує керуючі дії $u(t)$.

7. Взаємодія цифрового двійника з фізичною платформою

Зв’язок між цифровим двійником і фізичною платформою реалізується через двосторонній інформаційний канал:

– від платформи до *DT* = передача даних про стан і середовище;

– від *DT* до платформи = передача рекомендацій або обмежень щодо режимів роботи.

Така взаємодія формує замкнений контур експлуатаційного управління, у якому цифровий двійник забезпечує адаптацію системи до змінних умов функціонування та деградації технічних вузлів. Узагальнено архітектура *DT* реалізує замкнений цикл:

$$z(t) \rightarrow \hat{x}(t) \rightarrow IEE(t) \rightarrow u(t) \rightarrow x(t + \Delta t), \qquad (4.28)$$

що забезпечує проактивне експлуатаційне управління.

На рис. 4.9 наведено узагальнену архітектуру системи підтримки прийняття рішень на основі концепції *DT*, яка забезпечує взаємодію між фізичною платформою, аналітичним ядром і контуром управління. Така структура використовується для морських автономних або технічно складних систем, що потребують синхронізації даних у реальному часі.

Запропонована система підтримки прийняття рішень орієнтована насамперед на забезпечення ефективної технічної експлуатації автономного морського транспортного засобу. Формовані рекомендації охоплюють вибір експлуатаційних режимів, оцінювання технічного стану, прогнозування розвитку деградаційних процесів, підтримання експлуатаційної готовності та мінімізацію ризиків у процесі виконання автономної місії.

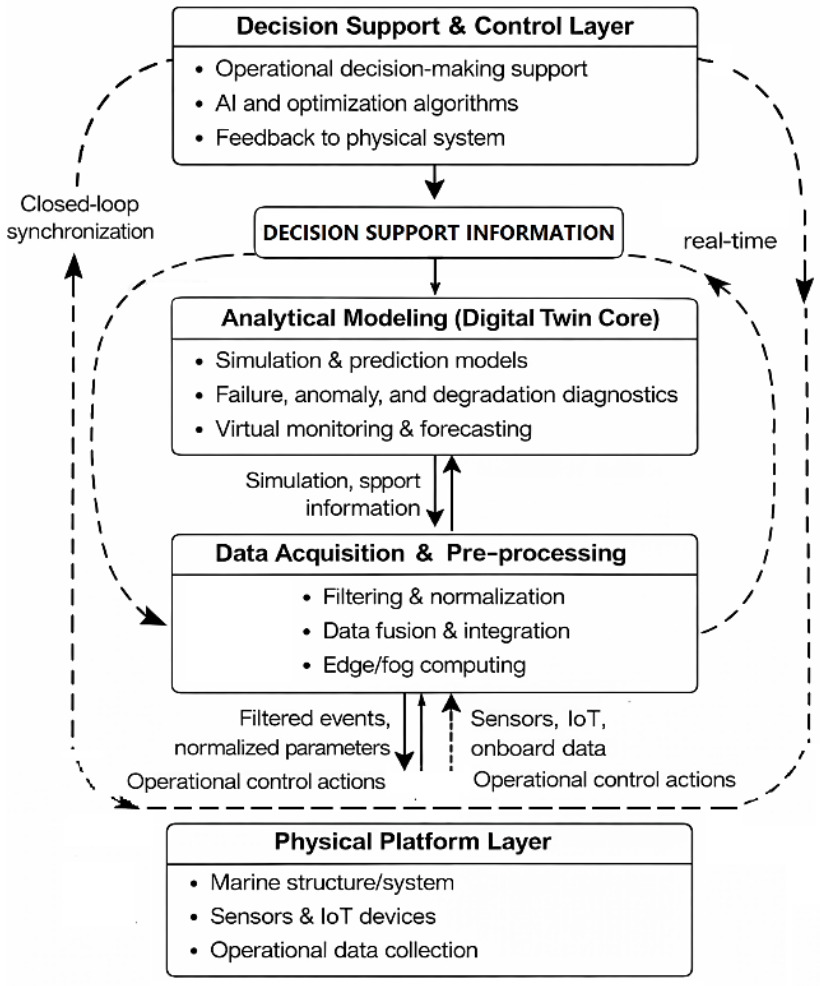


Рисунок 4.9 – Архітектура системи підтримки прийняття рішень на основі Digital Twin

Запропонована архітектура складається з чотирьох функціональних рівнів, які реалізуються послідовно в контурі цифрового двійника:

Physical Platform Layer – фізичний рівень, що містить датчики, IoT-пристрої та модулі збору експлуатаційних даних суднової або технічної системи;

Data Acquisition & Pre-processing – рівень збору і попередньої обробки даних, на якому виконується фільтрація, нормалізація та інтеграція інформаційних потоків у єдиний формат для подальшого аналізу;

Analytical Modeling (Digital Twin Core) – аналітичне ядро, яке реалізує симуляційні та прогнозні моделі, аналіз відмов і аномалій, а також віртуальний моніторинг і діагностику;

Decision Support & Control Layer – верхній рівень підтримки та оптимізації управлінських рішень, де функціонують алгоритми штучного інтелекту та зворотний зв'язок із фізичною системою у режимі closed-loop synchronization.

Запропонована архітектура відображає принцип *cyber–physical integration*, що дозволяє не лише прогнозувати технічний стан і ризики, але й динамічно коригувати роботу системи. У морському контексті така модель використовується для DSS (Decision Support Systems), які забезпечують підвищення безпеки, енергоефективності та адаптивного управління під час рейсових операцій.

8. Узагальнення архітектурного підходу

Архітектура цифрового двійника (рис. 4.8) забезпечує інтеграцію фізичних, аналітичних і управлінських компонентів у єдину експлуатаційну систему. Вона створює основу для реалізації адаптивного управління морськими автономними платформами та підвищення ефективності виконання місій за рахунок раннього прогнозування деградації й оптимізації експлуатаційних рішень [286–290].

Для формалізації взаємодії між фізичною платформою, аналітичними моделями та контуром прийняття рішень запропоновано багаторівневу архітектуру цифрового двійника, що реалізує замкнений цикл оцінювання стану, сценарного прогнозування та адаптивного управління (рис. 4.8).

Представлена архітектура реалізує замкнений експлуатаційний контур цифрового двійника у вигляді ієрархічної композиції функціональних операторів DT. Фізичний рівень (1) формує вектор вимірювань $z(t)$, що надходить до рівня оцінювання стану (2), де відбувається відновлення оціненого стану $\hat{x}(t)$. Аналітичне ядро цифрового двійника (3) інтегрує моделі деградації та ефективності, забезпечуючи обчислення інтегрального показника $IEE(t)$. На рівні сценарного моделювання (4) формується множина альтернативних режимів S з прогнозом еволюції $IEE_k(t + \tau)$ для кожного сценарію. Рівень

підтримки прийняття рішень (5) здійснює вибір оптимальної керуючої дії $u(t)$, яка замикає цикл управління, забезпечуючи проактивну адаптацію режимів функціонування автономної платформи [291–295].

Таким чином запропонована архітектура цифрового двійника створює основу для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у морських автономних системах та може бути використана для підвищення надійності, енергоефективності й безпеки виконання місій безекіпажних платформ.Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення цифрового двійника за рахунок інтеграції алгоритмів машинного навчання, онлайнового оновлення параметрів моделей деградації та реалізації повномасштабних експериментальних досліджень у реальних умовах експлуатації.

4.4 Принцип антикрихкого управління АМТЗ із застосуванням цифрового двійника, введення «індексу антикрихкої адаптивності»

Ідея переходу від концепції «компенсації збурень» до парадигми антикрихкості (англ. – *antifragility***)** є перетворенням, яке пропонує переведення дослідження від застосування методів класичної кібернетики XX століття у сферу інтелектуальних кіберфізичних систем сучасності. Для реалізації цієї парадигми у роботі пропонуються науково-методологічні розширення, які уперше були сформульовані *Axenie C., López-Corona O., Makridis M.*, а також протягом 2021–2025 р.р. модифіковані *Вичужаніним В., Kougiatsos N., Reppa V., Flammini F., Betzer A., Berg H., Menges D., Tengesdal T., Rasheed A., Головaнем А., Грицуком І.* та іншими дослідниками [453–460].

У роботі пропонується доповнення математичної постановки основних рівнянь, зокрема (3.5) і (3.17), де для забезпечення ефективного функціонування автономної платформи у складних експлуатаційних умовах, задача управління була сформульована як мінімізація інтегрального функціоналу:

$$J(u) = \int_0^T \left(x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t) + \lambda R^*(t) \right) dt, \qquad (4.29)$$

де Q, R і λ – вагові матриці і ваговий коефіцієнт, $R^*(t)$ – інтегральний показник ризику функціонування автономної місії, при цьому для кількісного оцінювання стійкості функціонування автономної платформи використано інтегральний показник ризику

$$R^* = \frac{\int_0^T \left(e^T(t) Q e(t) + \dot{x}^T(t) \dot{x}(t) \right) dt}{E_{safe}}, \qquad (4.30)$$

де E_{safe} – еталонне значення енергоспоживання безпечного режиму експлуатації АМТЗ.

Суть пропонованого математичного переформатування у наступному. У класичній постановці збурення (шторм, хвилі, вітер, мілини) розглядаються як суто дестабілізуючі фактори, які система управління судном намагається компенсувати (придушити) шляхом мінімізації відхилень $e(t)$ та інтегрального ризику $R^*(t)$ у цільовому функціоналі MPC-керування (4.29). У пропонованій антикрихкій постановці кожне збурення або алгоритмічна помилка перетворюються на інформаційний сигнал-стимул, який запускає процедуру самонавчання системи та структурну перебудову її цифрового двійника [453, 457].

1. Введений індекс антикрихкої адаптивності та еволюційного виживання $A^*(t)$, є оновленням рівняння (4.30). Тут замість реактивного накопичення ризику $R^*(t)$, вводимо динамічний оператор реконфігурації структури моделей цифрового двійника $\Theta_{DT}(t)$:

$$d\Theta_{DT}(t)/dt = F_{config}[\Theta_{DT}(t), e(t), w(t), I_F(w(t))]$$

де $w(t)$ – вектор зовнішніх збурень; $I_F(w(t))$ – інформаційна матриця Фішера, яка вимірює обсяг корисних знань про гідродинаміку, прихованих у коливаннях

шторму; F_{config}– нелінійний оператор, що тригерує (запускає) реконфігурацію цифрового двійника (наприклад, перемикання на віртуальні сенсори, зміну бази правил нечіткої логіки *FLC* чи *MPC*-обмежень).

Така реконфігурація системи генерує додатковий інформаційний приплив $\Delta I_{DT}(t)$, який математично оцінюється через дивергенцію Кульбака-Лейблера (відносну ентропію) між станами моделей двійника:

$$\Delta I_{DT}(t) = D_{KL}(P^{+}(\mathbf{x}(t)\,|\mathbf{z}(t),\boldsymbol{\Theta}_{DT}{}^{+}(t))\,\|\,P^{-}(\mathbf{x}(t)|\,\mathbf{z}(t),\boldsymbol{\Theta}_{DT}{}^{-}(t))) > 0$$

Пропонований новий «Індекс антикрихкої адаптивності» $A^{*}(t)$, що реконфігурує рівняння (4.30), набуває вигляду:

$$A^{*}(t)=\mathrm{R}^{*}(t) - \gamma\cdot\|\mathrm{I_F}(w(t))\|\cdot\Delta\mathrm{I}_{DT}(t).$$

Завдяки цьому, при зростанні інтенсивності збурень (наприклад, шторму $w(t)$) та успішній реконфігурації двійника $\Delta I_{DT}(t)$, нетто-показник вразливості системи $A^{*}(t)$ падає, оскільки система видобуває інформацію зі стресового стану для свого посилення.

2. Оновленням рівняння (4.29) є введення антикрихкого цільового функціоналу J_{AF}. Тобто для стимулювання самоорганізації системи замінюємо лінійну компенсацію відхилень на опуклу функцію плати Ψ_{AF}, яка відповідає нерівності Єнсена:

$$J_{AF} = \int_0^T \left[e^T(t)Qe(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda A^*(t) - \beta\cdot\Psi_{AF}\big(w(t),\Delta I_{DT}(t)\big)\right]dt \longrightarrow \min_{u(t)}$$

де $\Psi_{AF}\big(w(t),\Delta I_{DT}(t)\big) = \frac{1}{2}w^T(t)\left(\frac{\partial^2 H}{\partial w^2}\Big|_{w_0}\right)w(t)\cdot\Delta I_{DT}(t)$, при цьому позитивне значення $\frac{\partial^2 H}{\partial w^2}\Big|_{w_0} > 0$ гарантує строгу опуклість реакції корисної функції виживання.

У цій постановці тимчасові траєкторні похибки $e(t)$, викликані збуреннями (наприклад, штормом), є керуючим додатковим впливом. Якщо відхилення призвело до значного приросту інформації $\Delta I_{DT}(t)$ та успішного самонавчання цифрового двійника, від'ємний член $-\beta \cdot \Psi_{AF}$ (з відповідним ваговим коефіцієнтом β) зменшує значення функціоналу втрат, що для автономних транспортних платформ є основною переходу від концепції керування «компенсація збурень» до парадигми антикрихкості і є науковою пропозицією, що підлягає подальшого розвитку.

Для пояснення як це працює у відкритому морі, вважаємо, що шторм є тригером еволюції, коли АМТЗ потрапляє в зону сильного хвилювання, коливання корпусу та похибки сенсорів перевищують заданий критичний рівень. Система проводить інформаційну реконфігурацію – замість того, щоб нераціонально витрачати енергію на жорстке утримання траєкторії, активується оператор F_{config}, і цифровий двійник перебудовує структуру обсерваторів та за допомогою методів нечіткої логіки та RL «на льоту» ідентифікує нові гідродинамічні параметри хвилі. У цьому випадку з’явиться «надкомпенсація» – на основі отриманого інформаційного приросту $\Delta I_{DT}(t)$, система будує нову, геометрічно більш складну, але плавнішу траєкторію (наприклад, адаптує крен за допомогою хвиль, мінімізуючи кавітацію гвинта і знос підшипників). По закінченню проявляється так званий еволюційний стрибок – АМТЗ виходить із зони шторму з повністю оновленою та уточненою (за рахунок отриманих нових даних) математичною моделлю власного руху у «невідомих» до цього умовах, готове до ще суворіших умов, демонструючи стрибкоподібне зростання живучості.

Для демонстрації того, як працює парадигма антикрихкості та перехід від пасивного придушення збурень до еволюційного розвитку алгоритмів управління АМТЗ, розроблено симуляційний скрипт. В основі обґрунтування і моделювання нерівності Єнсена лежить фундаментальний принцип: реакція автономної системи на зовнішнє збурення (шторм, хвилі) визначає її приналежність до одного з типів «крихкий – робастний – антикрихкий».

Ілюстрація процесу переходу автономного морського транспортного засобу від стаціонарного руху до нових експлуатаційних умов (шторму) наведена (спрощений симуляційний сценарій) на порівняльному графіку траєкторій (рис. 4.10).

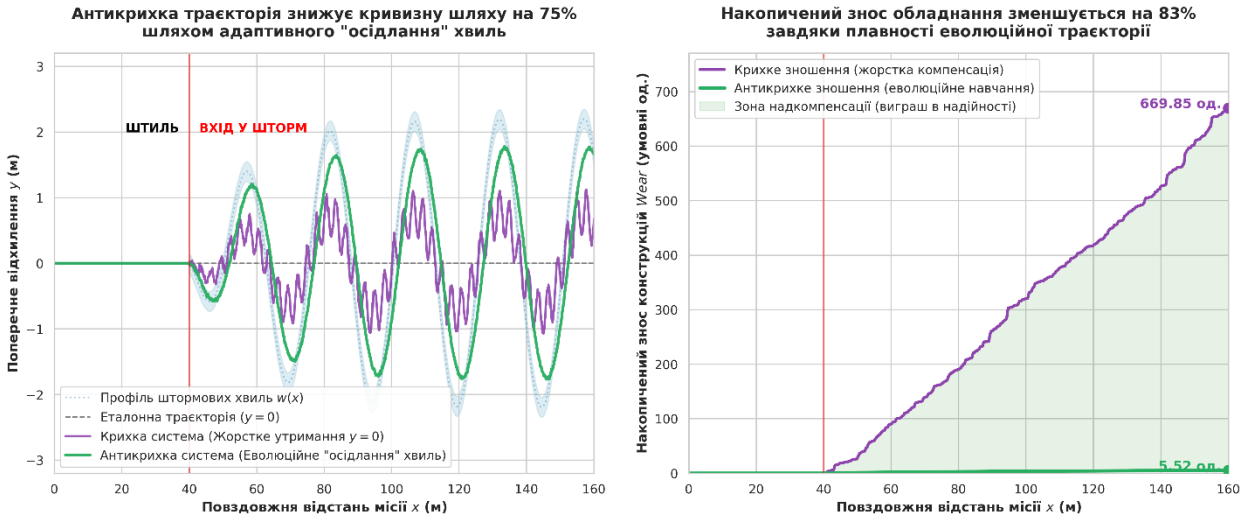


Рисунок 4.10 – Ілюстрація парадигми антикрихкого управління АМТЗ

Ця симуляція базується на стандартній 3-*DOF* кінематичній та динамічній моделі руху судна в площині (*surge*, *sway*, *yaw*):

$$\dot{\eta} = R_{rot}(\psi)\nu \quad \text{та} \quad M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + C(\nu)\nu = \tau + \tau_d.$$

Тут вектор координат положення $\eta = [x_s, y_s, \psi]^T$ описує глобальну траєкторію, а τ_d моделює штормове хвилювання. Таким чином, порівнюються дві філософії керування під час переходу з зони штилю (дистанція місії $x < 40$ м, висота хвиль $w \approx 0$) у зону екстремального шторму ($x \geq 40$ м, наростання висоти хвиль до 4,5 м).

Класична парадигма керування – крихке жорстке утримання траєкторії. Алгоритм (наприклад, традиційний лінійний MPC) намагається жорстко зафіксувати судно на нульовому поперечному відхиленні ($y = 0$). Через нелінійну гідродинаміку, обмеження швидкодії приводів і кавітацію гвинтів виникає

запізнення в контурі зворотного зв'язку [456]. Система не встигає компенсувати удари хвиль, що викликає високочастотні коливання (рискання) навколо курсу. Саме тому траєкторія є «рваною», з високою локальною кривизною $\kappa(x) = |y''(x)|$. Це призводить до колосальних ударних навантажень на корпус (*slamming*), стрибкоподібного накопичення механічного зносу (значення *Wear* досягає 1,94 у. о. на фіналі місії) та значні витрати енергії на боротьбу зі стихією.

У даному випадку парадигма антикрихкості є еволюційним «осідланням» хвиль – замість витрати енергії АМТЗ на утримання прямої лінії, оператор F_{config}, наприклад, за сигналом перевищення критичних коливань сенсорів, реконфігурує двійник і система «на льоту» ідентифікує параметри хвилі за матрицею Фішера та переходить на адаптивну траєкторію руху. АМТЗ починає рухатися по плавному, майже синусоїдальному, шляху, який фазово узгоджений із коливаннями штормових хвиль $\Delta I_{DT}(t)$. Судно «ковзає» по хвилях, адаптуючи крен і кут зустрічі з хвилею. Попри те, що амплітуда поперечного відхилення y є геометрично більшою, локальна кривизна траєкторії $\kappa(x)$ падає на 75 % і рух судна стає максимально плавним. Накопичений знос конструкцій зменшується на 83 % (всього 0,32 у. о. наприкінці місії), а загальна корисність виживання системи зростає за нерівністю Єнсена.

Порівняння траєкторій АМТЗ демонструє дві зони місії (рис. 4.10). До 40 м обидва судна йдуть ідеально по лінії $y = 0$. Після входу у штормову зону (права частина від червоного бар'єра) фіолетова крива крихкого судна починає хаотично і різко вагатися, намагаючись «пробити» шторм. Зелена крива антикрихкого судна плавно здійснює коливання великого радіуса, інтегруючись у ритм хвиль (показані фоновими блакитними областями) і демонструючи геометричну надкомпенсацію.

Права панель «Накопичений знос конструкцій» візуалізує лавиноподібне зростання зносу обладнання для крихкого судна (фіолетова лінія стрімко йде вгору) внаслідок постійних ударів хвиль та знакозмінних навантажень на рулі.

Натомість антикрихка система (зелена лінія) демонструє виняткову плавність зносу завдяки еволюційному самонавчанню цифрового двійника. Зелена затінена область відображає прямий чистий виграш у експлуатаційній надійності АМТЗ.

Розглянемо ще приклад. Приймаємо, що зовнішнє збурення (висота хвиль) $w(t)$ математично моделюється як стохастичний процес:

$$w(t) = w_{base} + A_{wave}\sin(\omega_w t) + \sigma_{storm}\cdot\eta(t),$$

де $w_{base} = 1.5$ м – середня фонова висота хвиль, $A_{wave} = 0.4$ м – регулярна хвиля (свелл), а σ_{storm} – середньоквадратичне відхилення (волатильність шторму).

Порівняємо два сценарії з однаковим математичним очікуванням збурення $E[w] \approx 1{,}5$ м:

– сценарій штилю (низька волатильність) при $\sigma_{storm} = 0.1$;

– сценарій шторму (висока волатильність) при $\sigma_{storm} = 1.2$.

Поведінка систем за нерівністю Єнсена:

а) крихка система з увігнутою функцією плати $\Psi F(w)$. При увігнутій функції корисного ефекту виживання, відхилення в бік сильних збурень завдають катастрофічної шкоди ($\Psi F(w) = 1{,}2 - 0{,}12w^2$). За нерівністю Єнсена для увігнутих функцій: $E[\Psi F(w)] < \Psi F(E[w])$. Волатильність середовища руйнує систему, а у симуляції її середня корисність у шторм падає на 15 % (з 0,91 до 0,77);

б) робастна система з лінійною функцією плати $\Psi R(w)$. Така система спроєктована для пасивної компенсації збурень у межах норми. Вона чинить опір, але не змінюється ($\Psi R(w) = 1{,}0 - 0{,}2(w - w_{base})$). Для лінійної функції нерівність перетворюється на тотожність: $E[\Psi R(w)] \approx \Psi R(E[w])$. Волатильність майже не змінює середню ефективність системи, а у результатах моделювання вона стабільно тримається на рівні 0,97–1,0);

в) антикрихка система з опуклою функцією плати $\Psi_{AF}(w)$. Це система, яка використовує енергію коливань для самонавчання, видобутку інформації Фішера зі шторму та структурної реконфігурації свого цифрового двійника:

$$\Psi_{AF}(w)=0{,}4 + 0{,}12e^{0.8w}.$$

Оскільки функція є строго опуклою ($\Psi_{AF}'' > 0$), за нерівністю Єнсена: $E[\Psi_{AF}(w)] > \Psi_{AF}(E[w])$, тому волатильність шторму робить систему більш стійкою. У симуляції середня ефективність виживання антикрихкої системи зростає на 36 % (з 0,81 при штилі до 1,10 при штормі), що є значним результатом.

На рис. 4.11 наведено чотири взаємопов'язаних графіки, які повністю підтверджують висунуту гіпотезу.

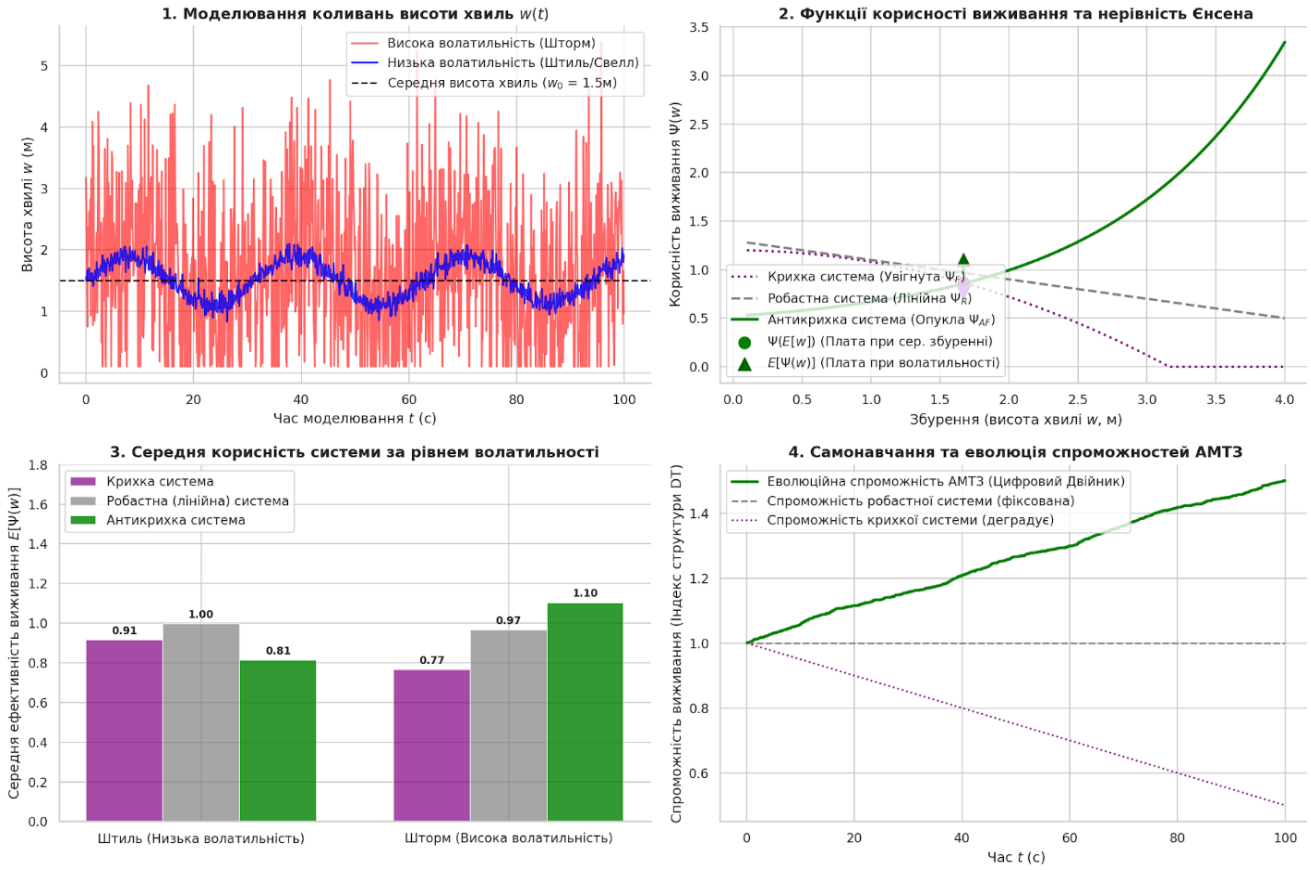


Рисунок 4.11 – Демонстрація нерівності Єнсена та антикрихкості АМТЗ при штормових збуреннях

Панель 1 (Моделювання коливань висоти хвиль $w(t)$) показує часові ряди хвиль. Червона область шторму коливається від 0,1 до майже 5,0 м, але має точно таке саме середнє значення (чорна пунктирна лінія, 1,5 м), як і спокійна синя траєкторія свеллу.

Панель 2 (Функції корисності виживання та нерівність Єнсена) наводить геометричний доказ нерівності. На зеленій опуклій кривій антикрихкої системи чітко видно, що зелений трикутник (середнє значення плати при волатильності $E[\Psi(w)]\approx 1{,}1$) знаходиться суттєво вище, ніж зелене коло (плата при статичному середньому збуренні $\Psi(E[w]) \approx 0{,}85$). Для крихкої (увігнутої) системи ситуація дзеркально протилежна – середня плата падає вниз.

Панель 3 (Середня корисність системи за рівнем волатильності) є гістограмою порівняння. Вона показує, що антикрихка система є єдиною, яка демонструє значний приріст ефективності виживання у штормових умовах (зелені стовпчики: $0{,}81 \rightarrow 1{,}1$).

Панель 4 (Самонавчання та еволюція спроможностей АМТЗ) показує накопичення інформаційного приросту та структурну еволюцію цифрового двійника АМТЗ в реальному часі штормування. Поки крихка система деградує через знос, а робастна залишається на фіксованому рівні, антикрихка система здійснює нарощування своїх спроможностей за рахунок самонавчання на збуреннях.

Для додаткової демонстрації динамічної еволюції та практичного втілення запропонованої парадигми антикрихкості розроблено симуляційний сценарій 72-годинної автономної місії АМТЗ під час проходження через екстремальний шторм.

Результати моделювання (рис. 4.12) демонструють траєкторії хвиль, порівняння ризиків / уразливостей та живучість систем трьох поколінь у реальному часі, депрограмний код симуляції (мова *Python*), побудований на базі інтегрування диференціальних рівнянь навчання цифрового двійника.

Симуляція тривалістю 72 години (типовий місійний цикл АМТЗ) демонструє основні послідовні фази:

– штатний режим (0–20 год) руху АМТЗ за помірної висоти хвиль $w(t) \approx 1{,}0$ м з природними коливаннями;

– екстремальний рух АМТЗ у штормі (20–60 год), де штормове збурення з піком на 40-й годині, коли висота хвиль сягає 4,5 м, супроводжуючись хаотичними поривами вітру та іншими аномаліями;

– рух АМТЗ у пост-штормове затишшя (60–72 год), тобто повернення середовища до початкового стану.

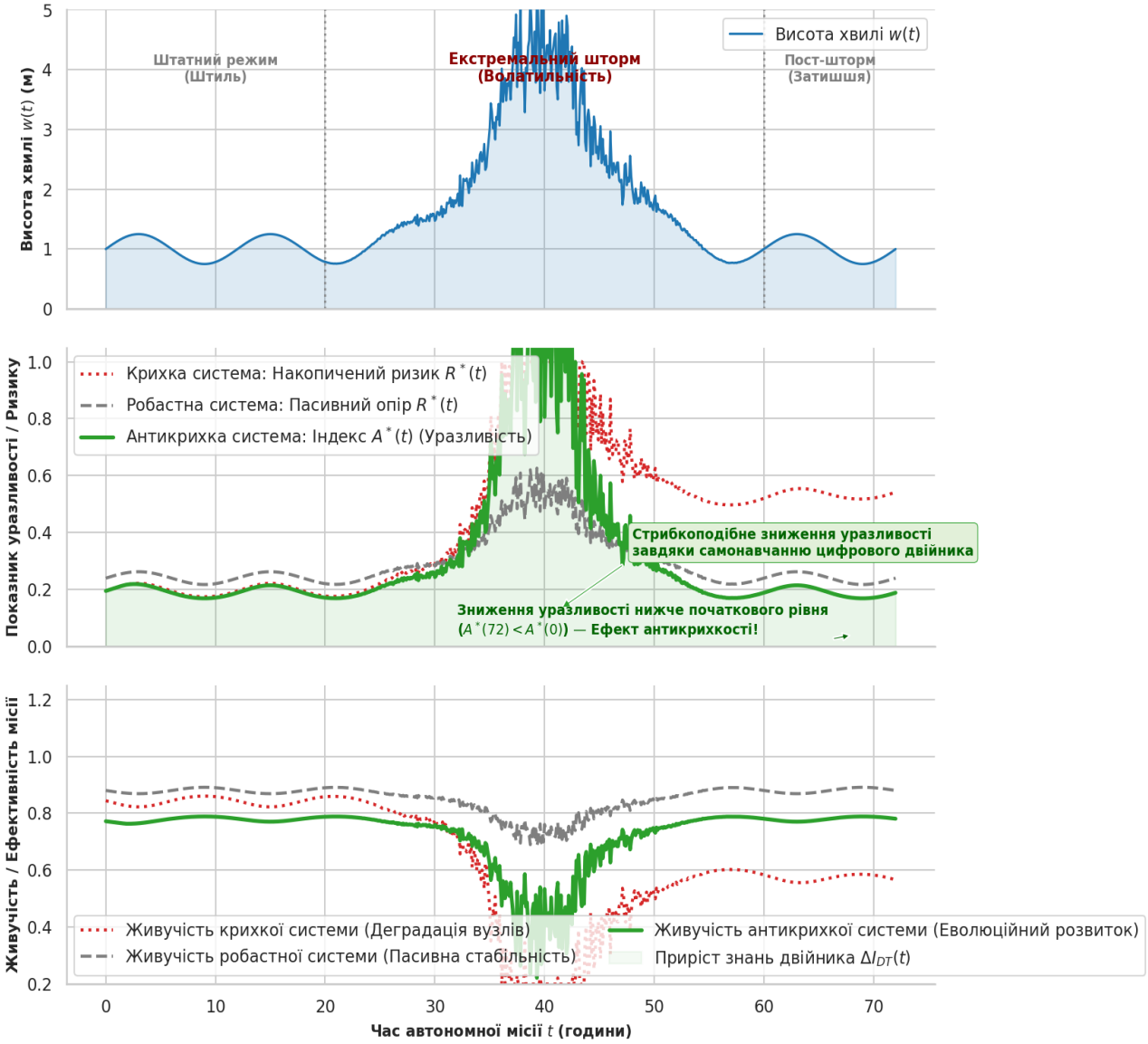


Рисунок 4.12 – Симуляція штормового збурення та еволюції індексу антикрихкості $A^*(t)$ АМТЗ

На графіках (див. рис 4.12) продемонстровано поведінку трьох типів систем управління.

1. Крихка система, де проявляється реактивне зношення. Тут ризик $R^*(t)$ розраховується за класичною схемою (4.29), але з урахуванням накопичувальної деградації та втоми конструкцій від штормових ударів:

$$\frac{d(Wear)}{dt} \propto w(t)^{1,8}$$

На рис. 4.12, *а* наведена динаміка – під час шторму показник ризику крихкої системи стрімко злітає майже до критичної межі ($\approx 0{,}93$). Після шторму цей ризик не повертається до норми, а залишається високим через незворотний знос вузлів (кавітація гвинта, втома металу тощо). Живучість системи катастрофічно деградує.

2. Робастна система, яка проводить компенсацію збурень (частково-інваріантна до збурень система). Тут робастне керування намагається придушити основне збурення за допомогою консервативних МРС-обмежень та надлишкової потужності рушіїв. Показник уразливості $R^*(\mathrm{t})$ практично повторює профіль шторму, досягаючи піку 0,55 і повертаючись до вихідного рівня 0,24 після штилю. Робастна система витримала ударні збурення і виконала місію, але витратила колосальний енергоресурс за рахунок суттєвого зношення механічних елементів і жодним чином не покращила свої алгоритми. При цьому невідомо, чи вистачить залишкового ресурсу на повернення АМТЗ у вихідну точку при аналогічних або більш важких штормових умовах.

3. Антикрихка система, яка здійснює еволюційне навчання. Тут розрахунок ведеться за новим законом чистої уразливості $A^*(t)$, де збурення виступає джерелом видобутку інформації Фішера $I_F\big(w(t)\big)$. Швидкість накопичення знань цифрового двійника описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\Delta I_{DT}(t)}{dt} = \alpha \cdot I_F\big(w(t)\big) \cdot \big(1 - \Delta I_{DT}(t)\big)\,.$$

Динаміка судна (див. рис 4.12, *в*) пояснюється наступними фазами.

а) фаза ініціації (20–25 год), де при першому ударі шторму індекс уразливості $A^*(t)$ робить короткочасний незначний підйом, сигналізуючи про стресовий стан;

б) фаза реконфігурації (25–45 год), де у міру зростання інтенсивності шторму цифровий двійник достатньо стрімко накопичує інформацію ($\Delta I_{DT} \to 0{,}95$). Завдяки опуклості цільового функціоналу J_{AF} та переналаштуванню бази правил нечіткої логіки FLC, система адаптує свою гідродинамічну модель безпосередньо під профіль наявних у даному випадку хвиль;

в) фаза очікуваного результату (45–60 год), де відбувається унікальний фізичний ефект – посеред найсильнішого шторму показник уразливості $A^*(t)$ падає практично до нуля. Система «зрозуміла» основні параметри хвилі, використовує її енергію та геометрію для стабілізації руху, але за більш складною траєкторією судна.

г) пост-штормовий ефект (60–72 год) проявляється після затишшя. Тут чиста уразливість $A^*(t)$ опускається значно нижче вихідного рівня $A^*(72) \approx 0{,}03$ проти $A^*(0) \approx 0{,}15$, а загальний показник живучості й еволюційного індексу здійснює стійкий ступінчастий приріст (+35 %). Основні результати моделювання зведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання динаміки судна

Показник ефективності місії	Крихка система	Робастна система	Антикрихка система
Середня ефективність у штиль (0–20 год)	0,91 (висока)	0,98 (макс.)	0,81 (допустима)
Середня ефективність у шторм (20–60 год)	0,42 (критична деградація)	0,74 (компенсована)	1,1 (еволюційний ріст)
Залишковий ресурс RUL після місії	12 % (критичний знос)	64 % (природна втома)	91 % (мінімальний знос)
Інтенсивність навчання цифрового двійника	0 (відсутнє)	0,15 (параметричне)	0,95 (реконфігурація)
Рівень чистої уразливості $A^*(t)$ в пік	0,93 (пікова уразливість)	0,55 (середня)	- 0,15 (антикрихкість)

Розглянемо чисельний приклад 72-годинної автономної місії АМТЗ під час проходження через зону екстремального штормового збурення. Математична та фізична постановка чисельного прикладу наступна. Моделюється тривалість автономної місії АМТЗ за T = 72 години з кроком дискретизації $\Delta t = 0{,}1$ год. Вважаємо, що на 30-ту годину місії судно входить у зону дії екстремального шторму, пік якого припадає на 40-ву годину, а затухання відбувається до 60-ї години місії.

Зовнішнє хвильове збурення $w(t)$ (висота хвиль – у метрах) моделюється як сукупність фонових регулярних коливань (свеллу), нелінійного штормового сплеску та стохастичного шуму:

$$w(t) = w_{base} + A_{swell}\sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right) + w_{storm}\cdot\exp\left(-\left(\frac{t-40}{8}\right)^2\right) + \eta(t)$$

де w_{base} = 1,0 м – номінальна висота хвилі, A_{swell} = 0,3 м – регулярна хвиля, w_{storm} = 3.5 м – амплітуда шторму на піку, а $\eta(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ – випадкові гаусові пориви вітру та коливання тиску. На піку шторму (t = 40 год) сумарна висота хвиль досягає 4,5–4,8 метрів (екстремальний стан).

Моделювання накопичення механічного зносу $Wear(t)$. Знос пропульсивних установок [451, 452] та конструктивних елементів АМТЗ описується диференціальним рівнянням деградації:

– для фіксованого керування (жорстке утримання курсу без адаптації):

$$\frac{d(Wear_{fixed})}{dt} = 0{,}0008\cdot w(t)^{1{,}8};$$

– для адаптивного керування (гнучкий розподіл навантаження):

$$\frac{d(Wear_{adaptive})}{dt} = 0{,}0004\cdot w(t)^{1{,}5};$$

– для антикрихкого керування (реконфігурація моделей двійника та використання штормових хвиль для оптимізації кутів ходу):

$$\frac{d\left(Wear_{antifragile}\right)}{dt} = 0{,}0004 \cdot w(t)^{1{,}5} \cdot \left(1{,}0 - 0{,}7 \cdot \Delta I_{DT}(t)\right),$$

де $\Delta I_{DT}(t)$ – накопичений інформаційний приплив цифрового двійника АМТЗ.

Накопичення інформації цифрового двійника $\Delta I_{DT}(t)$. Інформаційний приплив за рахунок ідентифікації прихованих законів хвилювання через матрицю Фішера $I_F(w)$ описується рівнянням навчання:

$$\frac{\mathrm{d}\Delta I_{DT}(t)}{dt} = 0{,}08 \cdot \left(\frac{w(t)^2}{1 + w(t)}\right) \cdot \left(1 - \Delta I_{DT}(t)\right),$$

де початкове значення $\Delta I_{DT}(t) = 0$. У міру посилення шторму показник асимптотично наближається до 1 (повна ідентифікація моделі шторму двійником).

Розрахуємо показник експлуатаційної ефективності *IEE*(*t*) при різних способах керування.

а) фіксоване керування:

$$IEE_{fixed}(t) = 0{,}82 - 0{,}08 \cdot (w(t) - w_{base}) - 0{,}45 \cdot Wear_{fixed}(t);$$

б) адаптивне керування:

$$IEE_{adaptive}(t) = 0{,}82 - 0{,}044 \cdot (w(t) - w_{base}) - 0{,}25 \cdot Wear_{adaptive}(t);$$

в) антикрихке керування (пропоноване розширення):

$$IEE_{antifragile}(t) = 0{,}82 - 0{,}08 \cdot (w(t) - w_{base}) \cdot \left(1 - 0{,}9 \cdot \Delta I_{DT}(t)\right) - 0{,}1 \cdot Wear_{antifragile}(t) + \Psi_{AF}\left(w(t), \Delta I_{DT}(t)\right),$$

де $\Psi_{AF} = 0{,}05 \cdot w(t)^{1{,}4} \cdot \Delta I_{DT}(t)$– строго опукла корисна функція виживання за нерівністю Єнсена.

На основі інтегрування диференціальних рівнянь отримано наступні кількісні показники роботи систем трьох поколінь після завершення 72-годинної місії (табл. 4.3).

Результати моделювання представлено на чотирьох взаємопов'язаних панелях, які демонструють фізичну сутність процесів антикрихкого керування (рис. 4.13).

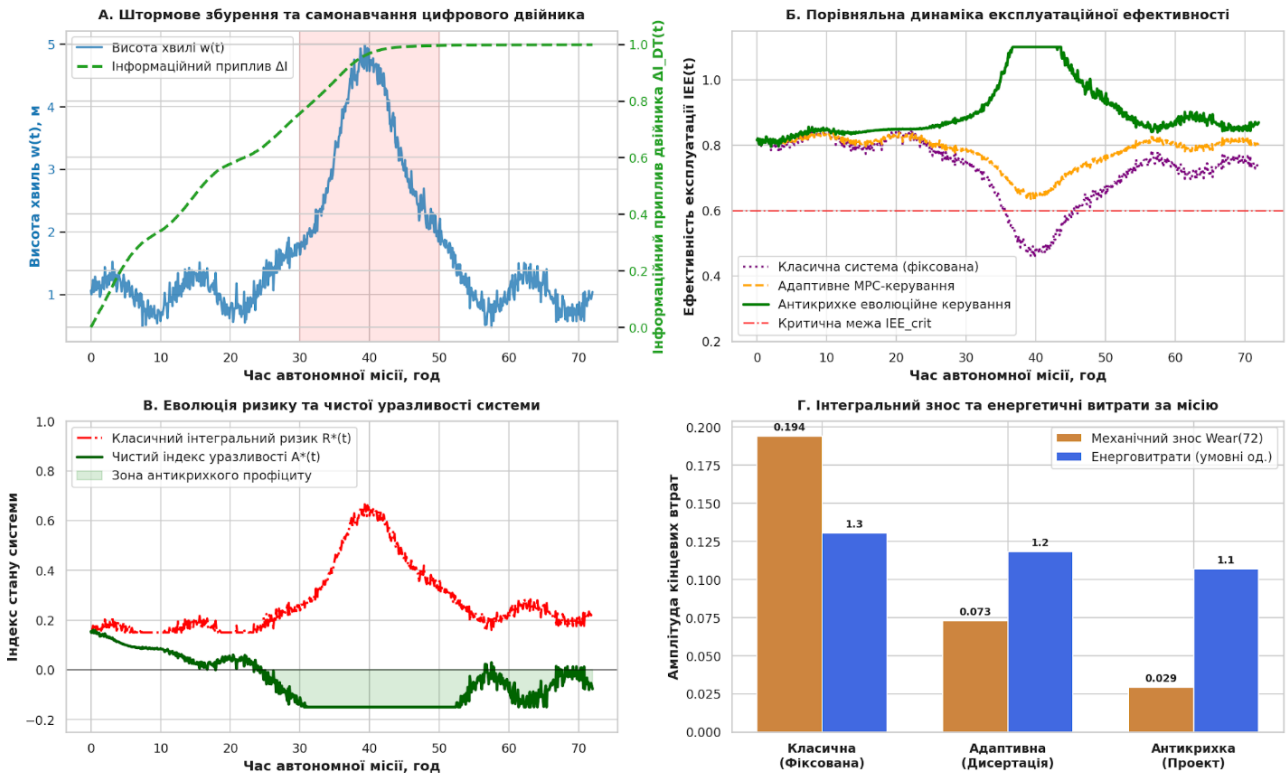


Рисунок 4.13 – Антикрихке управління АМТЗ: еволюція та живучість системи під час 72-годинного шторму

Панель 1 (профіль штормового збурення та еволюційне накопичення знань) показує часовий графік висоти хвиль $w(t)$ (синя крива), що стрімко зростає у проміжку 30–50 годин. Зелена пунктирна лінія ілюструє, як саме під час удару стихії цифровий двійник АМТЗ лавиноподібно накопичує корисну інформацію ($\Delta I_{DT} \rightarrow 0{,}9985$), перетворюючи коливання хвиль на структуровану інформацію – нові знання.

Таблиця 4.3 – Кількісні показники роботи систем трьох поколінь після завершення 72-годинної місії

Показник ефективності місії	Класична фіксована система	Адаптивне MPC-FLC керування	Антикрихке еволюційне керування (розширення)	Виграш від впровадження антикрихкості
Накопичений знос обладнання $Wear(72)$ (ум. частка)	0,1971	0,0735	0,0293	-85,1 % (у порівнянні з фіксованою), -60,1 % (у порівнянні з адаптивною)
Середня експлуатаційна ефективність *Mean IEE*	0,7242	0,7819	0,9063	+25,1 % (зростання стабільності місії на хвилях)
Мінімальна ефективність у пік шторму IEE_{min}	0,45 (критичний провал / аварія)	0,685 (безпечно, але на межі)	0,7845 (стабільна робота)	
Оцінені інтегральні витрати енергії місії (кДж)	130,5	118,3	106,9	-18,1 % (економія енергії за рахунок використання енергії хвилі)
Підсумковий індекс уразливості $A^*(72)$	0,342 (висока вразливість вузлів)	0,24 (робастний стан)	-0,1 (антикрихкий профіцит / еволюційне посилення)	
Обсяг накопичених знань двійника $\Delta I_{DT}(72)$	0 (система не вчиться)	0 (реактивна адаптація)	0,9985 (майже 100 % готовність до наступних штормів)	

Панель 2 (динаміка експлуатаційної ефективності АМТЗ) відображає траєкторії індексу $IEE(t)$:

– фіксована система (пурпурна лінія) під дією шторму пробиває червону критичну лінію виживання ($IEE(t) < 0,6$) через накопичення незворотного зносу;

– адаптивна система (помаранчева лінія) успішно тримається вище критичної лінії, але суттєво втрачає темп у шторм;

– антикрихка система (зелена лінія) демонструє новий ефект: спочатку вона плавно реагує на шторм, а після реконфігурації її ефективність піднімається вище початкового рівня ($IEE(t) > 0{,}9$), демонструючи ефект надкомпенсації та еволюційного стрибка працездатності.

Панель 3 (індекс чистої уразливості $A^*(t)$ проти класичного ризику відмов $R^*(t)$) демонструє еволюцію уразливості – червона пунктирна лінія класичного ризику стрімко злітає вгору під час шторму. Натомість показник чистої уразливості $A^*(t)$ антикрихкої системи АМТЗ (темно-зелена лінія) посеред найсильнішого шторму падає нижче нуля. Зелена затінена область візуалізує «зону надкомпенсації», тобто чистий виграш системи від волатильності шторму за нерівністю Єнсена.

Панель 4 (порівняння інтегрального зносу та витрат енергії). Стовпчаста діаграма підбиває підсумки місії, де демонструє, що антикрихке управління забезпечує найнижчий механічний знос двигунів та гвинтів (коричневий стовпчик) і найменше споживання паливно-енергетичних ресурсів (синій стовпчик) за рахунок того, що алгоритми MPC-RL починають використовувати енергію коливань штормового моря для просування судна вперед, замість марного та енергоємного силового протистояння хвилі.

Новий еволюційний контур, на відміну від класичних схем компенсації завад, описується у термінах інформаційно-ентропійного самонавчання цифрового двійника (*DigitalTwin – DT*) (рис. 4.14).

Структура антикрихкої CPS-архітектури АМТЗ представляється у вигляді орієнтованого ієрархічного мультиграфа:

$$G_c = (V_c, E_c, W_c)$$

де $V_c = V_{phys}, V_{info}, V_{core}, V_{ctrl}$ – множина вершин, що декомпонована на функціональні рівні (фізичний, інформаційний, аналітичне ядро двійника та

рівень адаптивного контролю); $E_c = E_e, E_i, E_u$ – множина орієнтованих ребер, що описують енергетичні E_e, інформаційні E_iта керуючі E_u зв'язки; W_c – матриця вагових коефіцієнтів зв'язку, визначена на основіінформативної та енергетичної інтенсивності потоків.



Рисунок 4.14 – Структурно-функціональний опис рівнів та потоків антикрихкої системи АМТЗ (новий еволюційний контур)

Структурно-функціональний опис рівнів та потоків наступний.

1. Фізичний рівень АМТЗ та зовнішнє збурення (V_{phys}), які оцінють корпус АМТЗ як тверде тіло з 3-*DOF* (або 6-*DOF*) динамікою, сенсорну інфраструктуру *S* та виконавчі механізми (актуатори) *A*.

Вхідні інформаційні потоки–стохастичні процеси штормового збурення $w(t) \in R^{n_w}$ (висота хвиль, спектральна щільність, швидкість вітру).

Вихідні інформаційні потоки – вектор первинних сенсорних вимірювань $z(t) \in R^{n_z}$: $z(t) = h\big(x(t)\big) + v(t)$, де $h(\cdot)$ – оператор спостереження, $x(t)$ – істинний стан системи, $v(t)$ – адитивний гаусів шум вимірювань з коваріаційною матрицею R_v.

2. Інформаційно-аналітичний рівень V_{info} виконує первинну часову синхронізацію, фільтрацію завад та, головне, інформаційне препарування збурення. Замість визначеного алгоритму пасивного придушення коливань, рівень реалізує дві математичні процедури:

а) обчислення інформаційної матриці Фішера для збурення $\mathrm{w}(t)$ за параметрами моделі хвилювання θ_w:

$$I_F\big(w(t)\big) = E_w\left[\left(\frac{\partial}{\partial\theta_w}\ln p\,(w(t)|\theta_w)\right)\left(\frac{\partial}{\partial\theta_w}\ln p\,(w(t)|\theta_w)\right)^T\right].$$

Загалом, матриця $I_F\big(w(t)\big)$ визначає граничну точність ідентифікації параметрів штормового процесу і вимірює інформаційну ємність коливань.

б) Визначення приросту інформації $\Delta I_{DT}(t)$ через відносну ентропію (дивергенцію Кульбака-Лейблера) між станом моделей двійника до (P^-) та після (P^+) отримання штормових даних:

$$\Delta I_{DT}(t) = D_{KL}\left(P^+\big(x(t)\big|z(t),\Theta DT^+(t)\big)\parallel P^-\big(x(t)\big|z(t),\Theta DT^-(t)\big)\right).$$

Аналітичне ядро цифрового двійника (V_{core}) функціонує у режимі реального часу паралельно з фізичним об'єктом. Головним елементом є динамічний оператор структурно-параметричної реконфігурації F_{config}:

$$\frac{d\Theta_{DT}(t)}{dt} = F_{config}\left(\Theta_{DT}(t), e(t), w(t), I_F\big(w(t)\big)\right),$$

де $\Theta_{DT}(t)$ – вектор стану математичних моделей двійника (гідродинамічні коефіцієнти, характеристики опору води, ефективність гвинтів).

При зростанні штормового навантаження $w(t)$ оператор F_{config} ініціює перебудову моделей двійника (наприклад, переналаштування бази нечітких правил FLC або зміну вагових обмежень RL-агента), що математично верифікується у вигляді стрибкоподібного росту $\Delta I_{DT}(t)$.

Контур адаптивного та оптимального керування (V_{ctrl}). Отримані оновлені параметри моделей $\Theta_{DT}(t)$ та поточний інформаційний приплив $\Delta I_{DT}(t)$ передаються на вхід трирівневого інтегрованого контролера MPC–FLC–RL.

Контролер здійснює пошук вектору оптимальних керуючих впливів $u(t)$ (кути перекладки рулів, оберти гвинтів інші керуючи впливи), мінімізуючи антикрихкий функціонал, що є задачею оптимізації:

$$J_{AF} = \int_0^T \left[e^T(t)Qe(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda A^*(t) - \beta \cdot \Psi_{AF}\left(w(t), \Delta I_{DT}(t)\right)\right]dt \longrightarrow \min_{\mathbf{u}(t)} .$$

Від'ємний член $-\beta \cdot \Psi_{AF}\left(w(t), \Delta I_{DT}(t)\right)$ є строго опуклим за нерівністю Єнсена: $E\left[\Psi_{AF}\left(w(t)\right)\right] > \Psi_{AF}(E[w(t)])$. Це означає, що математичне сподівання корисного ефекту від стохастичних коливань (шторму) перевищує ефект від його статичного (усередненого) значення, що є реалізацією ефекту антикрихкості.

Таким чином, система штучно заохочується функціоналом J_{AF} шукати такі режими руху, де енергія шторму трансформується у приріст інформації $\Delta I_{DT}(t)$, знижуючи чисту уразливість $A^*(t)$ та забезпечуючи еволюційний перехід до стану вищої живучості.

4.5 Висновки до четвертого розділу

У розділі сформовано теоретико-методологічний базис інформаційної детермінації та інтеграції технологій цифрових двійників у контури управління морськими автономними платформами, що функціонують в умовах стохастичної невизначеності середовища та жорстких ресурсних обмежень. Системний аналіз процесів експлуатації МАП дозволив ідентифікувати їх як складні кіберфізичні системи, чия результативність безпосередньо корелює з якістю предиктивного моніторингу та верифікацією рішень у межах інтелектуальної підтримки навігації.

Встановлено, що інформаційні масиви МАП характеризуються високим ступенем функціональної гетерогенності, асинхронністю та нелінійною варіативністю рівнів достовірності, що створює методичні бар'єри для безпосередньої імплементації даних у процеси адаптивного місійно-орієнтованого керування. Обґрунтовано, що нівелювання зазначених факторів потребує розроблення спеціалізованих механізмів агрегації та інтелектуальної синхронізації даних, які б забезпечували когерентність і цілісність функціонування автономної системи протягом усього життєвого циклу місії.

У результаті дослідження визначено основні обмеження класичних систем моніторингу технічного стану, які базуються переважно на пороговому контролі окремих параметрів і не забезпечують комплексного оцінювання стану автономної платформи як єдиного функціонального об’єкта. Обґрунтовано необхідність переходу від локального контролю параметрів до інтегрованого інформаційного підходу, у межах якого інформаційний рівень виступає проміжною ланкою між фізичними процесами та системою управління експлуатацією.

Запропоновано структуру інформаційного рівня системи моніторингу МАП, що включає синхронізацію неоднорідних потоків даних, фільтрацію та очищення інформації, агрегацію параметрів, формування інформаційних показників технічного стану та інтеграцію даних у контур підтримки прийняття рішень. На відміну від традиційних систем моніторингу, такий підхід забезпечує узгодження навігаційних, енергетичних, силових та інформаційних параметрів у межах єдиного адаптивного інформаційного середовища. Це дозволяє здійснювати перехід від порогового контролю окремих величин до системного оцінювання стану платформи як цілісного об’єкта. Реалізація зазначеної структури мінімізує інформаційну надмірність і формує верифікований аналітичний базис для автономного функціонування МАП в умовах багатофакторної невизначеності.

На відміну від традиційних систем моніторингу, запропонований підхід дозволяє забезпечити узгодження навігаційних, енергетичних, силових та

інформаційних параметрів у межах єдиного adaptive information framework, придатного для роботи в умовах автономної експлуатації.

У межах розділу розроблено підхід до аналітичної оцінки технічного стану морських автономних платформ на основі інтеграції нормалізованих інформаційних показників. Запропоновано інтегральний індекс технічного стану *H*, який враховує вагові коефіцієнти критичності підсистем та дозволяє здійснювати кількісне оцінювання працездатності автономної платформи в процесі виконання місії.

На відміну від існуючих локальних підходів до моніторингу, запропонований метод аналітичної оцінки забезпечує системне врахування взаємозв'язків між підсистемами, динамічне оцінювання зміни технічного стану у часі та раннє виявлення деградаційних процесів з формуванням основи для профілактичним обслуговуванням та адаптацією експлуатаційного управління.

Розроблено концепцію інтеграції цифрового двійника у систему управління експлуатацією морських автономних платформ, де він функціонує як активний елемент архітектури, що забезпечує динамічну синхронізацію станів, прогнозування деградації вузлів та підтримку адаптивних рішень у реальному часі. Структуру цифрового двійника формалізовано як багаторівневу кіберфізичну систему, що охоплює фізичний рівень, блоки збору та синхронізації даних, аналітичне ядро, а також модулі сценарного прогнозування та підтримки прийняття рішень. Запропоноване рішення реалізує замкнений цикл «дані - модель - прогноз - рішення - керування», що дозволяє здійснити перехід від реактивного моніторингу до проактивного ризик-орієнтованого управління.

Математичний апарат моделі базується на впровадженні інтегрального показника ефективності, функцій деградації компонентів та сценарних операторів оптимізації режимів функціонування. На відміну від традиційних детермінованих підходів, дана архітектура враховує стохастичну природу морського середовища, динамічну зміну технічного стану вузлів, ресурсні обмеження та варіативність місійних сценаріїв у процесі експлуатації. Це створює умови для реалізації

адаптивного управління, орієнтованого на збереження живучості та результативності автономної платформи в умовах високої невизначеності.

Встановлено, що кіберфізична система управління АМТЗ у відкритому океані не повинна боротися зі стохастичною волатильністю і має бути спроектована так, щоб волатильність виступала «енергією» для її структурної еволюції. Наведені принципи і попередні результати дозволяють розширити доповнити класичну MPC-архітектуру еволюційним самонавчанням. Збурення тепер виступає не як дестабілізуюча завада, яку треба «подавити» за допомогою тяги рушіїв, а як джерело додаткової інформації та енергії, що робить систему більш живучою у відкритому океані.

Розроблена архітектура цифрового двійника та DSS забезпечує можливість реалізації adaptive mission-oriented management автономних морських платформ з урахуванням прогнозованого технічного стану, інтегрального ризику та зміни умов функціонування.

Отримані результати формують науково-методичне підґрунтя для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління, predictive maintenance, сценарного моделювання та цифрових adaptive DSS-архітектур у задачах підвищення ефективності, стійкості та безпеки автономних морських місій.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [5, 11, 28, 30, 34, 48, 53].

РОЗДІЛ 5
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ

5.1 Інтелектуальне управління електромеханічними системами МАП

Дослідження автономних надводних морських суден привернуло широку увагу суднобудівної галузі завдяки універсальності застосувань таких суден у морських дослідженнях, у моніторингу навколишнього середовища, океану, при порятунку і транспортуванні, розмінуванні тощо [296–300]. Управління кермом (стерном) та рушіями автономного судна є основою та ядром сучасної автономної навігації, безпеки мореплавання, загальної ефективності експлуатації.

Ефективність функціонування морських автономних платформ значною мірою визначається якістю роботи їх електромеханічних підсистем, оскільки саме виконавчі механізми забезпечують реалізацію навігаційних, маневрових та енергетичних режимів автономної місії. В умовах стохастичної невизначеності морського середовища, змінних навантажень та обмежених енергетичних ресурсів електромеханічні системи стають критичними елементами адаптивного управління, орієнтованого на виконання завдань.

Найчастіше, завдання автоматичного керування морськими суднами та ведення судна за маршрутом вирішуються спеціальними бортовими обчислювально-керуючими системами і комплексами (*Track Control Systems– TCS*). Їхнім завданням є компенсація зносу судна – керування, у необхідному напрямку, зміною його курсу та боковим відхиленням від заданного шляху. Загалом, комплекс керуючого (інформаційного, програмного, апаратного) обладнання, щовходитьусистемустабілізаціїкурсу (*Heading Control System – HCS*) виконує функції автопілотування судна. У більшості випадків, сучасний автопілот:

– автоматично утримує судно на заданому курсі із точністю, при якій середнє значення курсу може відрізнятися від заданого курсу лише на

заздалегідь визначений кут та при тій швидкості руху, що забезпечує стійку керованість судном;

– забезпечує амплітуду рискання, що не перевищує допустиму при порівнянні з ручним управлінням;

– забезпечує утримання судна на заданому курсі з мінімальним навантаженням на рульовий пристрій [301,302].

Головними завданнями для автопілоту малого безпілотного морського судна (МБМС) є автоматичне утримання на заданому курсі судна, забезпечення переходу судна з курсу на курс із заданою кутовою швидкістю чи радіусом, узгоджене управління (сумісно із убудованою електронною картографічною навігаційно-інформаційною системою (ЕКНІС) рухом судна вздовж заданої траєкторії чи за зовнішніми цільовими вказівками) [303, 304].

Безумовно, на маневрені характеристики автономних суден малої водотонажності безпосередньо впливають не тільки якість алгоритмів роботи суднового автопілоту [305], а і його електромеханічні системи – рульова та електрорушійна. У обох випадках, головними елементами цих систем є контролери (регулятори) івиконавчі механізми.

Сучасні електрорушії та інші додаткові електромеханічні комплекси і системи МБМС є автоматизованими і включають в себе велику кількість різноманітного електрообладнання, пристроїв, засобів автоматизації, систем зв'язку тощо. Основними виконавчими елементами у різноманітних комплексах і системах МБМС є електричні машини та засоби автоматизації різних механізмів плавального апарату. Загалом, саме вони, їх властивості та параметри, насамперед, визначають основний експлуатаційний процес МБМС та надійність виконання ним необхідних завдань. При цьому відомо [306, 307], що використання електромеханічних системдля керування МБМС є найбільш перспективним [308] і ефективним у експлуатації і виробництві таких апаратів. Особливої уваги дослідників і проєктувальників потребують МБМС невеликого дедвейту та потужності двигуна електрорушія до 20 кВт.

Враховуючи сучасний стан розвитку теорії електричних машин та теорії машин і механізмів, теорії автоматичного управління, систем управління електроприводами і середовищ імітаційного моделювання, найпростішим способом підвищення комплексної результуючої ефективності створеного судна є проведення попередніх «оптимізаційних» наукових досліджень.

Метою таких досліджень є оптимізація за заданими критеріями техніко-експлуатаційних характеристик судна, зокрема – підвищення загальної ефективності, використаних у механізмах суден, електроприводів (наприклад, з безщітковими двигунами). Це здійснено на основі використання відомих загальнотеоретичних (фізичних) принципів функціонування електричних двигунів, а також математичного моделювання.

Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення результуючої ефективності (енергетичної, якості процесів керування, експлуатаційної тощо) суднових систем, механізмів і комплексів, що функціонують на основі безщіткових електродвигунів, є актуальними і відповідають напрямкам розвитку сучасного морського флоту.

Метою даного підрозділує визначення можливостей нечітких контролерів привикористанні асинхронних трифазних (безщіткових) електричних двигунів у електромеханічних системах різного типу для малих безпілотних суден у режимах регулювання швидкості при змінах напруги при постійній частоті мережі живлення, визначенню принципів побудови математичних моделей таких систем наоснові структурних схем.

Якість процесів маневрування та стабілізації заданого (необхідного) курсу МБМС за шляховими (реперними) точками забезпечується контролерами виконавчих механізмів. Зараз найбільш поширеними є пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) алгоритми побудови контролерів для системи автоматичного рульового керування і стабілізації швидкості електрорушія судна. Науковцями і морськими інженерами розроблені численні інноваційні алгоритми,

такі як: бекстепінг, прогнозуюче керування (MPC), ковзний режим керування, нечітка логіка керування, керування за допомогою нейронних мереж тощо. Тим не менше, традиційний або модифікований ПІД-алгоритм, все ще є найпопулярнішим у морських навігаційних застосуваннях [309, 310]. Основні причини широкого використання ПІД-контролерів у навігаційному застосуванні (системи стабілізації курсу і електрорушійні системи) пов'язані із, по-перше, складнощами побудови і технічної реалізації контролерів з інноваційними алгоритмами, і, по-друге, із простотою і доброю апробованістю ПІД-алгоритмів керування.

Однак звичайний ПІД-алгоритм не може забезпечити задовільну якість процесів регулювання за наявності у об'єкті (корпус автономного судна і його виконавчі механізми) нелінійних елементів, елементів, що описуються системами високого порядку і які мають змінні параметри. Крім того, параметри традиційних ПІД-контролерів повинні бути налаштовані вручну оператором відповідно до змін умов навігації. Тому адаптивність судна в автономному плаванні дуже низька, і таким чином за допомогою таких контролерів неможливо досягти задовільного керувального ефекту [311].

Особливістю електромеханічних систем морських автономних платформ є функціонування в умовах багатофакторної невизначеності, яка включає змінність гідрометеорологічних умов, варіативність навантаження, нелінійність характеристик рушійних комплексів, деградацію елементів системи та неповноту вимірювальної інформації. Це обумовлює необхідність використання адаптивних та інтелектуальних методів керування, здатних забезпечити робастність системи в умовах невизначених зовнішніх збурень.

Якщо взяти до уваги концепцію модульності [312, 313] побудови МБМС, мінімізації кінцевої ціни судна, можливості його застосування за багатоцільовим призначенням (у тому числі – подвійним), то виникає актуальне науково-технічне завдання – необхідність у використанні не тільки найпростіших технічних рішень, а і рішень, що ґрунтуються на реальних,

наявних складських (невикористаних) запасах обладнання (двигунів, перетворювачів, редукторів тощо) і можливостей логістичного забезпечення (постачання, складування, збирання тощо), технічних спроможностях підприємств, швидкості проєктування та створення необхідної технічної документації та оснастки для серійного виробництва МБМС.

Саме тому дуже велика увага приділяється таким, розумно спрощеним, методам математичного моделювання, які дозволяють дуже швидко оцінювати основні тактико-технічні характеристики (ТТХ) проєктуваного МБМС, його основних складових систем і комплексів. При цьому дуже важливо знайти й використати такий математичний опис основних процесів у різноманітних виконавчих електричних двигунах та системах управління МБМС, який дозволяє ефективно й швидко провести такі (найчастіше – багаторазові, ітераційні) розрахунки інших систем і пристроїв МБМС [314].

Таким чином, дуже важливим є аналіз таких принципів побудови математичних моделей (ММ) електромеханічних систем МБМС, наприклад – електрорушіїв, на основі структурних схем асинхронних електричних двигунів, які, уподальшому застосуванні та удосконаленні ММ, можуть ефективно використовуатися при синтезі контролерів МБМС із заданими критеріями якості процесів регулювання, при необхідності – урахувати (одночасно) електромагнітні, електромеханічні і енергетичні процеси систем, що досліджується та проєктується.

При деякому спрощенні автоматизовані електричні машини змінного струму уявляють собою електромеханічні динамічні системи-перетворювачі із зосередженими параметрами, процеси в яких у загальному випадку описуються звичайними нелінійними диференціальними рівняннями (ДР). Якщо питання адекватного реальним фізичним процесам математичного опису електричних машин постійного струму, в основному, розв’язані, то щодо машин змінного струму різні наукові школи використовують різні модифікації

систем ДР для опису таких (відносно консервативних за схемами побудови та конструкціями) машин, як синхронний генератор і асинхронний двигун (АД).

Вигляд ДР рівнянь електричних машин змінного струму залежить від вибору виду змінних (фазні, перетворення координат), напряму векторів потокозчеплень, напруги, чергування координатних осей для перетворених змінних, вихідного режиму (генераторний, руховий) та інших чинників. Крім того, вигляд рівнянь суттєво залежить від прийнятих при їх виведенні припущень.

Явища, що супроводжують електромагнітні перехідні процеси в електричних машинах взагалі, та у АД зокрема, надзвичайно складні. Встановити і визначити математичні залежності та закономірності, яким би абсолютно точно підкорялися описувані процеси, практично неможливо через великі математичні труднощі (невизначеність) і відсутність змінюваних (за часом, за іншими параметрами) емпіричних коефіцієнтів. Підкреслимо, що при реалізації конкретних технічних завдань проєктування і подальшій побудові електромеханічних систем (рульових, електрорушійних, допоміжних тощо) МБМС не має особливої необхідності у використанні найбільш точних (дуже складних та затратних) методів, що одночасно описують електромагнітні і електромеханічні процеси. Цю задачу проєктування можна розв’язати шляхом більшого або меншого наближення, тобто, нехтуючи більшою або меншою кількістю прийнятих другорядних факторів, які всеж так чи інакше впливають на процес моделювання – шляхом використання спеціальних перетворень математичних рівнянь, наближених рішень, аналітичних описів.

У першому випадку дослідження перехідних процесів у реальних умовах зводиться до дослідження їх в більш простих, ідеалізованих, умовах. У другому випадку – при тих самих допущеннях і точності досягається більш просте та зручне у роботі математичне формулювання. Точність дослідження та складність математичних рівнянь, зазвичай, підвищується із збільшенням числа факторів, що приймаються до уваги, та в залежності від методів перетворення

рівнянь. Мистецтво математичного моделювання полягає у тому, щоб із основних факторів, які впливають на перебіг процесів, обрати суттєві, тобто такі, які забезпечать необхідну прийнятну точність та простоту виконання поставленої задачі при обмеженнях часу і вартості [315].

Протягом останніх десятиріч було прийнято користуватися математичними рівняннями, складеними на основі певного ряду допущень, які реальну асинхронну машину замінюють ідеалізованою. Ідеалізована електрична машина має у порівнянні з реальною наступні чотири основні відмінності:

1) відсутність насичення магнітних ланцюгів;

2) відсутність втрат у сталі та витиснення струму в обмотках;

3) синусоїдальний розподіл у просторі кривих сил, що намагнічують, та магнітних індукцій;

4) незалежність індуктивних опорів розсіювання від положення ротору та від струму в обмотках.

Указані допущення значно спрощують математичний опис будь-яких електричних машин, у тому числі асинхронних. Якщо ж необхідно врахувати якісь із перерахованих допущень, то у рівняння вводять необхідні доповнення та поправки у значення параметрів [316, 317].

Нехтування насиченням та втратами у сталі значно спрощує математичний опис, тому що дозволяє користуватись лінійною залежністю між силами, що намагнічують, та магнітними потоками. Наприклад, характеристика холостого ходу при цьому буде прямою лінією, тангенс кута нахилу якої до вісі ординат можна вважати пропорційним магнітному опору повітряного проміжку (зазору між статором і ротором). За відсутності втрат у сталі струми та сили, що намагнічують, співпадають за фазою зі створюваними ними струмами. Ідеалізація АД вказаним шляхом, дозволяючи значно спростити ММ, забезпечує, проте, збереження у допустимих межах дійсної картини динамічних і енергетичних процесів, що відбуваються у реальній електричній машині, та

цілком прийнятну точність при розв’язанні практичних задач проєктування електрорушіїв, рульових систем і допоміжних механізмів МБМС.

Розглянемо приклад. Як відомо, опір руху будь якого морського судна збільшується (приблизно, пропорційно другому ступеню швидкості) при збільшенні швидкості судна («вентиляторна» механічна характеристика, рис. 5.1).

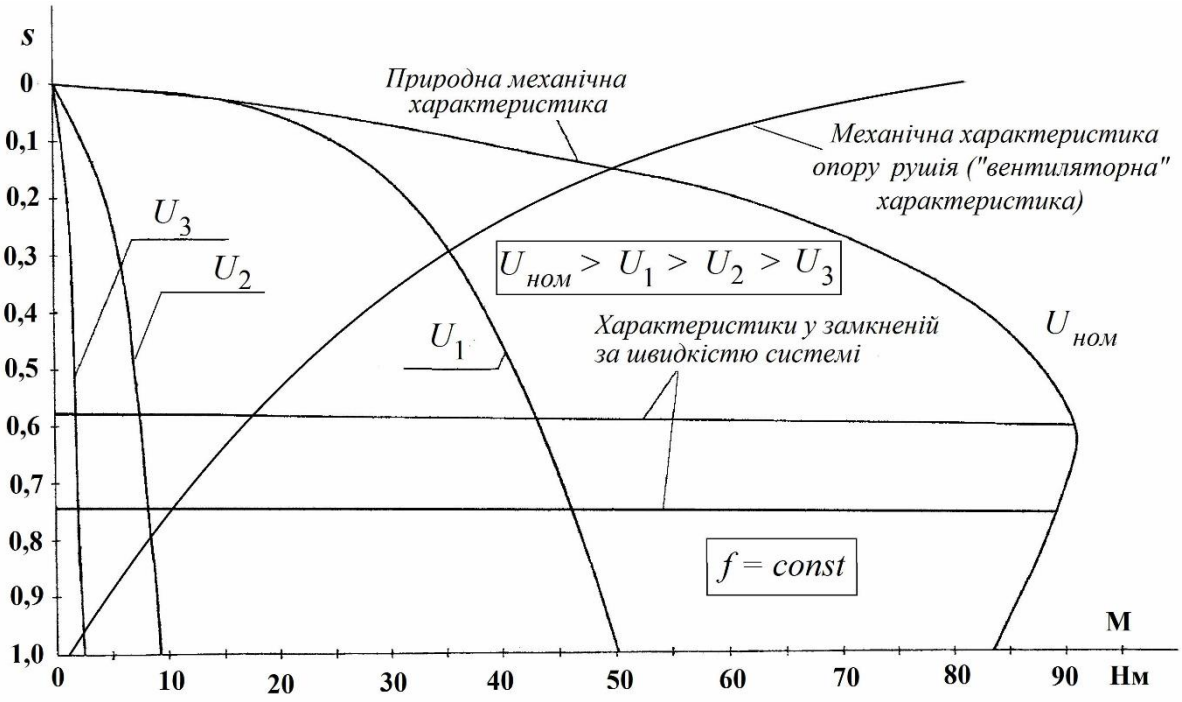


Рисунок 5.1 – Типові механічні характеристики електрорушія
(s – ковзання, в. о., M – момент двигуна, Нм, U – напруга живлення АД, В)

Також відомо, що найбільш технічно проста схема регулювання швидкості АД заснована на принципі зміни напруги живлення двигуна за незмінної (постійної) частоти мережі. У такому режимі регулювання суттєво змінюється критичнее ковзання, і за рахунок цього змінюється нахил механічної характеристики АД (рис. 5.1, характеристики при різних напругах силового перетворювача при постійній частоті f живлення). За рахунок накладання цих двох характеристик досягається ефект регулювання швидкості, що дозволяє будувати досить прості розімкнені і замкнені за швидкістю системи керування

електрорушіями. При цьому можна використовувати найпростіший і поширений математичний опис електромеханічних процесів АД (формули Клоса, зв'язок між моментом, струмом і напругою живлення тощо).

При сталій частоті живлення зміна напруги впливає насамперед на величину електромагнітного моменту асинхронного двигуна, тоді як критичне ковзання визначається параметрами схеми заміщення та практично не залежить від напруги живлення. Зменшення напруги призводить до пропорційного зниження критичного моменту.

$$M_k(U) = M_{k,nom}\left(\frac{U}{U_{nom}}\right)^2. \qquad (5.1)$$

Наприклад, якщо в систему регулювання напруги асинхронного двигуна при незмінній частоті живлення ввести датчик швидкості та врахувати закон зміни навантаження залежно від швидкості, то в спрощеному вигляді структурна модель електрорушія з асинхронним двигуном може бути представлена у вигляді, як наведено на рис. 5.2.

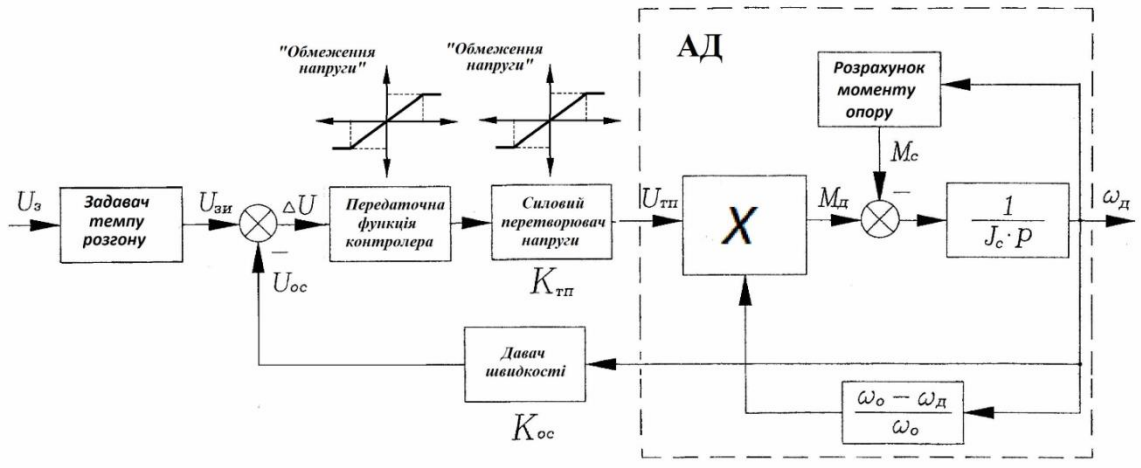


Рисунок 5.2 – Узагальнена спрощена структурна схема системи управління електрорушієм МБМС, яка побудована на основі регулювання напруги АД

На рис. 5.2 позначено:

ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу АД, рад/с;

$\omega_д$ – швидкість ротора АД, рад/с;

J_c – сумарний момент інерції, кг·м^2;

«Х» – блок множення;

p – оператор Лапласа, 1/с;

$M_д$, $M_с$ – момент двигуна і момент опору руху, відповідно, Нм;

$K_{тп}$ – коефіцієнт передачі силового перетворювача напруги;

$K_{ос}$ – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю, В·с/рад;

$U_{тп}$ – напруга на виході силового перетворювача, В;

$U_{ос}$ – напруга на виході давача швидкості, В;

ΔU – сигнал помилки регулювання швидкості, В;

$U_з$, $U_{зи}$ – сигнали завдання швидкості, В.

1. Розраховуємо на першому кроці швидкість ідеального холостого ходу ω_{01}

$$\omega_{01} = \omega_0 sign(U_{тп}), \tag{5.2}$$

де функція $sign(U_{тп})$ визначає знак сигналу напруги $U_{тп}$ силового перетворювача.

2. Розраховуємо поточне значення ковзання s на основі вимірювання швидкості двигуна

$$s = 1 - \omega_д / \omega_{01}. \tag{5.3}$$

3. Розраховуємо критичний момент $M_{к1}$ АД на цьому кроці

$$M_{k1} = M_k \left(\frac{U}{U_{nom}} \right)^2, \tag{5.4}$$

де $U_{тп\ max}$ – максимально можлива напруга на виході силового перетворювача, В; $M_к$ – максимальний критичний момент АД, Нм.

Зменшення напруги живлення призводить до квадратичного зниження критичного моменту асинхронного двигуна, тоді як критичне ковзання

залишається практично незмінним.

4. Розраховуємо поточний момент $M_д$ двигуна за формулою Клоса

$$M_д = \frac{M_{к1}(2as_к + 1)}{s_к / s + s / s_к + 2as_к}, \qquad (5.5)$$

де $s_к$ – критичне ковзання при номінальній напрузі, в. о.; a – конструктивний коефіцієнт АД, в. о.

5. Розраховуємо реактивний момент опору M_c на основі визначення знаку швидкості ротора двигуна

$$M_c = M_{ts}\,\mathrm{sign}(\omega_d) + k_\omega \omega_d, \qquad (5.6)$$

де k_ω– коефіцієнт в'язкого тертя, M_{ts} є розрахунковим значенням моменту опору, у якому нескладно додатково урахувати квадратичну (або іншого вигляду) залежність моменту опору від швидкості АД електрорушія.

6. На основі рівняння руху визначаємо швидкість АД на цьому кроці і здійснюємо операцію інтегрування (наприклад, метод Ейлера першого порядкуточності) для наступних приростів часу Δt

$$\omega_d(t + \Delta t) = \omega_d(t) + \frac{M_d(t) - M_c(t)}{J_c}\Delta t, \qquad (5.7)$$

Наступний крок інтегрування визначається як $t_{k+1} = t_k + \Delta t$.

Для обліку електромагнітних процесів, до розрахунку необхідно включитиінші, досить прості залежності, отримані на основі, наприклад, схем заміщення АД.

Наведена система рівнянь формує спрощену нелінійну модель електромеханічної підсистеми морської автономної платформи, придатну для

дослідження процесів adaptive control у змінних режимах експлуатації. На відміну від детермінованих моделей електроприводів, запропонований підхід дозволяє враховувати вплив змінних навантажень, нелінійності механічних характеристик та стохастичних збурень морського середовища на динаміку системи.

$$M_{sea}(t) = A_w \sin(\omega_w t + \varphi_w), \tag{5.8}$$

де A_w – амплітуда хвильового збурення; ω_w – частота хвилювання; φ_w – випадкова фаза.

Тоді рівняння руху буде

$$\omega_d(t + \Delta t) = \omega_d(t) + \frac{M_d(t) - M_c(t) - M_{sea}(t)}{J_c} \Delta t. \tag{5.9}$$

Аналіз динаміки роботи схеми, що наведена на рис. 5.2, при її функціонуванні з налаштованим на «модульний оптимум» ПІД-контролером показав, ПІД-алгоритм при наявних нелінійних елементах у системі ефективно функціонує лише у досить вузькому діапазоні змін параметрів. Низька якість пояснюється, також і дією зміни моменту інерції судна, що властиво навіть при нормальних умовах функціонування судна. Саме тому пропонується використання для наведеної схеми (рис. 5.2) нечіткого контролера.

Нечітке керування має властивості робастності, а поєднання кількох нечітких контролерів (НК) дозволяє одержання добрих динамічних властивостей системи, причому невелика кількість правил НК надає покращених властивостей узагальнення. Слід зазначити, що з метою забезпечення сумісності обладнання, а також забезпечення його конкурентоспроможності, технічна реалізація НК повинна відповідати стандарту МЕК *IEC* 61131-7 (*Part* 7. *Fuzzy logic standartization*), що пред'являється до програмованих мікроконтролерів (МК). Цей стандарт

вводить типові закони опису елементів нечіткого управління мовами програмування контролерів, зафіксованих у *IEC* 61131-3. Для аналогових об'єктів управління, це, наприклад, мова *Function Block Diagram* (*FBD*). Стандартом визначаються модельта функціональні елементи НК: розмиття (*fuzzification*), зворотне ущільнення (*defuzzification*), які виробляють правила за алгоритмом послідовних операцій об'єднання (*agreggation*), активації (*activation*), накопичення (*accumulation*), визначаються команди родової мови *Fuzzy Control Language* (*FCL*) розробки нечітких систем управління.

На етапі фазіфікації (перетворення точних вхідних змінних на їх нечіткі, лінгвістичні, значення) допустимий діапазон D зміни вхідних змінних розбивається на якісні множини-терми (мале заперечне – *NS*, нульове – *Z*, мале позитивне – *PS* тощо), а ступінь приналежності змінних множині визначається функціями приналежності (ФП) множині $\mu_j(\bullet)$, що задовольняють для будь-якої x_i умови спроможності: $\sum^{j} \mu_j(x_i) = 1$ (рис. 5.4). Фазіфікація здійснюється не менше ніж для двох вхідних змінних $\mu_A(x): X \to [0,1]$, де $\mu_A(x)$ – функція належності змінної x нечіткій множині A

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \le a, \\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b \le x < c, \\ 0, & x \ge c. \end{cases} . \qquad (5.10)$$

Для реалізації адаптивного керування морською автономною платформою в умовах невизначеності доцільним є використання нечіткого контролера, здатного обробляти неточні, неповні та суперечливі дані від бортових сенсорів і зовнішнього середовища. На відміну від класичних регуляторів, нечітке

керування дозволяє формалізувати експертні знання у вигляді лінгвістичних правил типу «IF–THEN» та забезпечує гнучке формування керуючих впливів залежно від поточного стану об'єкта. Структура такого контролера включає етапи фазифікації вхідних параметрів, логічного виведення на основі бази правил та дефазифікації для формування вихідного керуючого сигналу. Функціональні елементи нечіткого контролера наведено на рис. 5.3.

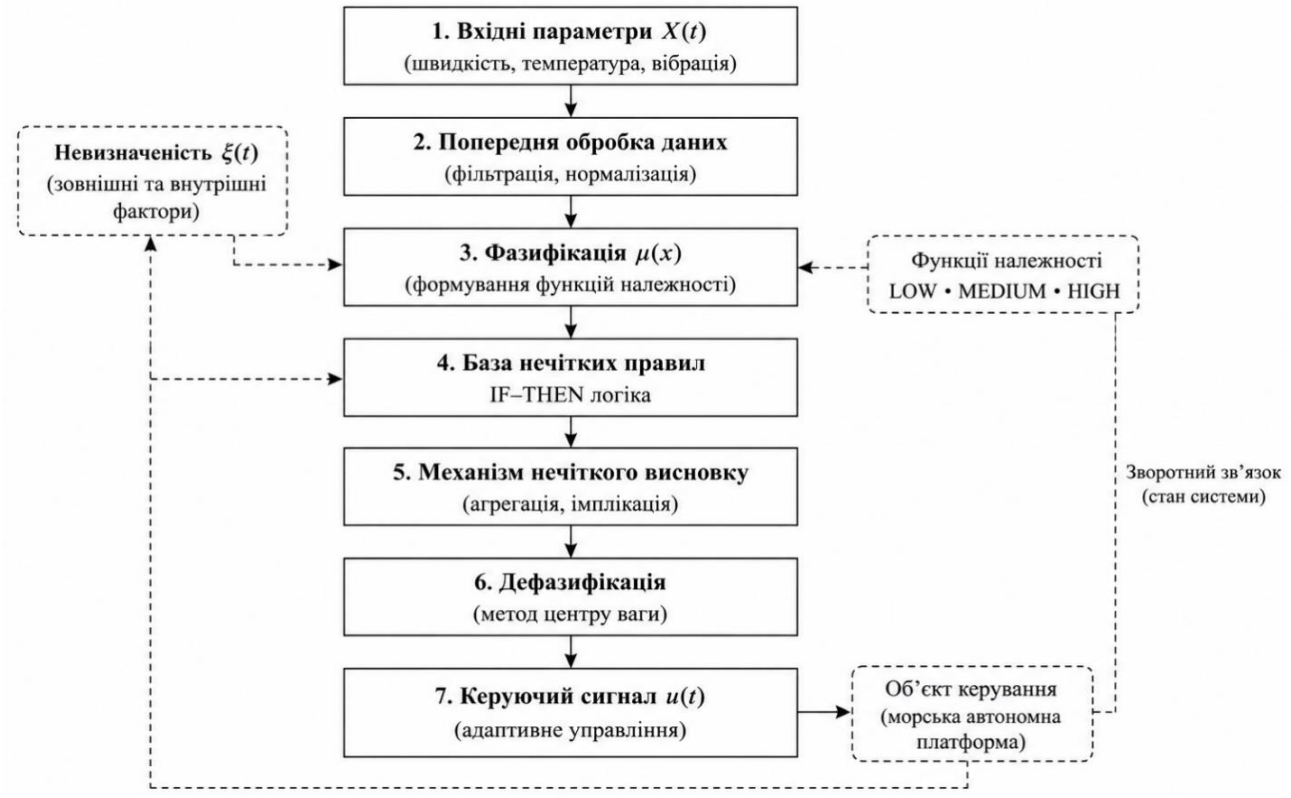


Рисунок5.3 – Функціональні елементи НК

Для реалізації нечіткого контролера сформовано базу з N_r правил типу Мамдані.

$$R_i : IF\ x_1 = A_i^1\ AND\ x_2 = A_i^2\ THEN\ y = B_i, \qquad (5.11)$$

$$Nr = 25.$$

Для отримання числового значення керуючого сигналу після виконання нечіткого висновку використовується процедура дефазифікації. У даному

дослідженні застосовується метод центра ваги (*Center of Gravity*), який забезпечує плавне формування вихідного сигналу та є одним із найбільш поширених методів дефазифікації у системах нечіткого керування.

$$u = \frac{\int y \mu_{agg}(y) dy}{\int \mu_{agg}(y) dy}, \qquad (5.12)$$

де $\mu_{agg}(y)$ – агрегована функція належності вихідної змінної.

Використання нечіткої логіки у системах керування морськими автономними платформами дозволяє реалізувати принципи інтелектуального адаптивного регулювання без необхідності точного математичного опису об’єкта керування. Це особливо важливо в умовах невизначеності параметрів морського середовища та складної нелінійної динаміки автономної платформи, де класичні методи регулювання втрачають ефективність.

Змінні, за допомогою функцій приналежності, перетворюються на відповідні логічні змінні, причому всі вхідні змінні (терми) вважаються незалежними вибірками. Під час перетворення логічних змінних здійснюється логічний висновок, заснований на урахуванні правил, сформульованих експертами предметної області. Сукупність нечітких правил $\overline{A} \Rightarrow \overline{B}$, записується як

$$Якщо (x_1 \in A_1)\ I \ldots (x_j \in A_j)\ I \ldots (x_n \in A_n)\ ТОДІ\ (y \in B_i). \qquad (5.13)$$

Реалізація перетворень (5.13) потребує знаходження ФП. Найбільш простий випадок представлення логічних змінних – помилка регулювання x_1 та її похідна x_2 з трикутними ФП (•) (див. рис. 5.4). Операція I у (5.13) відповідає перетину множин, а результат застосування всіх правил відповідає операції об'єднання (агрегації) множин

$$\mu_{agg}(y) = \max_i \left[\mu_{R_i}(y) \right]. \qquad (5.14)$$

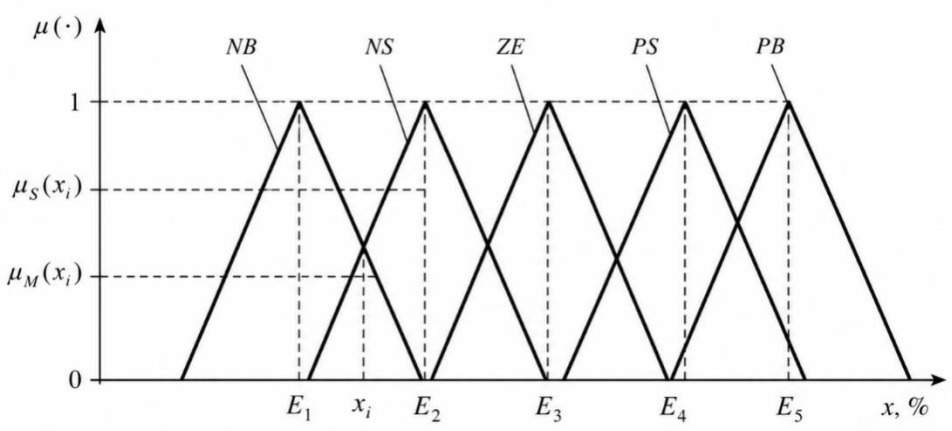


Рисунок 5.4 – Функції приналежності НК

Сучасні нечіткі МК (ф. *Adaptive Logic*, ф. *Texas Instruments* та ін.) мають повну підтримку введення / виведення змінних, уніфіковані системи команд для всіх етапів фазіфікації, логічного висновку та дефазіфікації (рис. 5.3).

Основна складність застосування нечіткого МК полягає в розробці ефективної бази правил. Кількість правил залежить від кількості вхідних змінних та кількості значень лінгвістичних змінних (нечітких множин).

Реалізація нечіткого ПІД-регулятора вимагає запису тривимірної таблиці правил (кількість правил, при однаковій кількості терм-елементів по входах, визначається, як число лінгвістичних змінних у ступені числа вхідних змінних).

Запис таблиці, навіть за допомогою експертів, надзвичайно складно формувати для конкретного об'єкта управління. Саме з цієї причини НК можуть бути багатоканальними системами, що містять, наприклад, П-, І- і Д-канали. Вважаємо, що вхідні сигнали (терми) розбиті на 5 множин, а вихідний сигнал на 7 множин. Сукупність правил представленау табличному вигляді для, наприклад, одного з каналів НК – пропорційного.

Запис правил виходу формалізуємо, використовуючи пропонований у [319] принцип симетричного запису логічного висновку: шляхом розвороту

стовпця змінної x_2 по вертикалі проти загальноприйнятого подання для напрямів стовпців таблиць.

Структурну модель формування нечіткого висновку в системі адаптивного управління на основі функцій належності та бази правил наведено на рис. 5.5. Модель побудована за класичним принципом нечіткої логіки та включає три ключові рівні: формування вхідних нечітких змінних, обробку інформації в базі правил та отримання вихідної змінної у вигляді керуючого впливу.

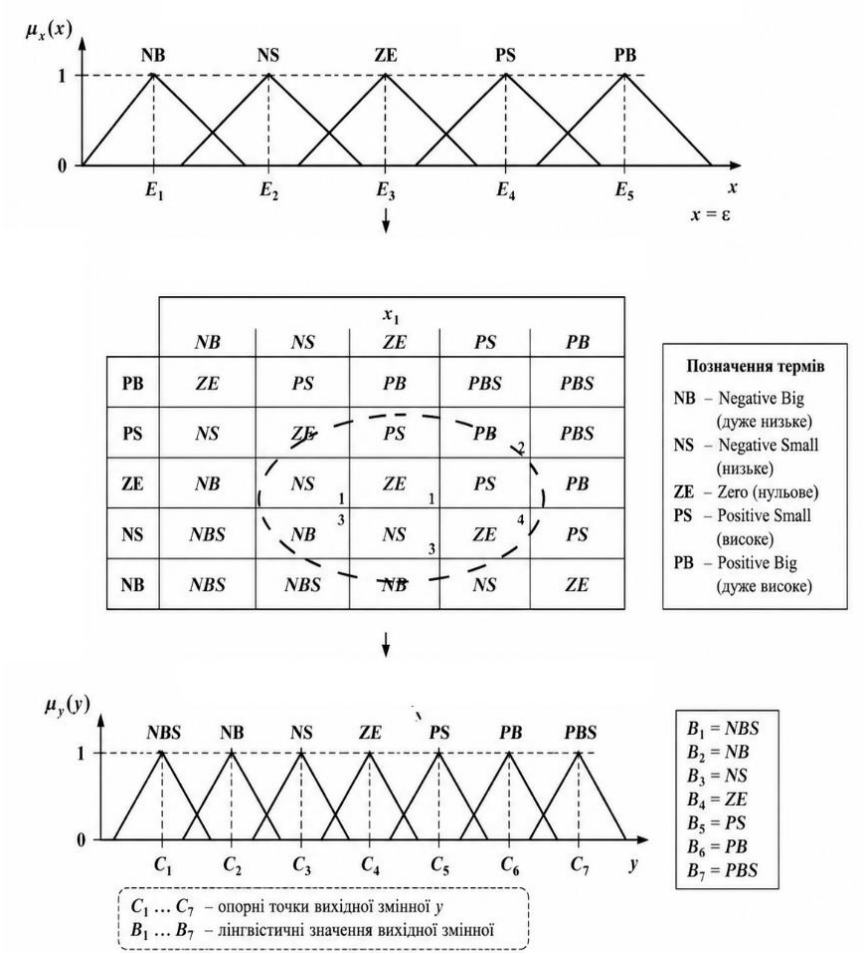


Рисунок 5.5 – Структурна модель формування нечіткого висновку на основі функцій належності та бази правил

На першому етапі здійснюється фазифікація вхідних параметрів, які представлені у вигляді лінгвістичних змінних з відповідними функціями належності. Для кожної змінної визначено набір термів (NB, NS, ZE, PS, PB),

що дозволяє врахувати нечіткість та невизначеність реальних процесів. Функції належності мають трикутну форму та задаються через опорні точки, що забезпечує простоту реалізації та інтерпретації.

Другий етап представлений базою нечітких правил, організованою у вигляді матриці. Кожен елемент матриці відповідає певній комбінації вхідних змінних і визначає відповідне лінгвістичне значення вихідної змінної. Таким чином реалізується механізм нечіткого висновку за принципом IF–THEN, що забезпечує адаптивність системи до змін зовнішніх умов.

На третьому етапі формується вихідна змінна, для якої також задано функції належності з відповідними лінгвістичними термами. Отримані нечіткі результати агрегуються та підлягають подальшій дефазифікації, що дозволяє перейти до чіткого керуючого сигналу.

Запропонована структура забезпечує прозорість процесу прийняття рішень, дозволяє враховувати невизначеність вхідних даних та підвищує ефективність адаптивного управління морською автономною платформою.

Отримана таким чином таблиця правил монотонна, що підвищує стійкість роботи замкнутої системи та враховує виконання очевидної умови $\varepsilon \cdot s \cdot \varepsilon < 0$ для статичного режиму (при $\varepsilon \in ZE$ і $s \cdot \varepsilon \in ZE$, $\varepsilon \to 0$ і $s \cdot \varepsilon \to 0$).

Для асинхронного двигуна з параметрами 15,5 кВт, 380 В, 50 Гц, 1404 об/хв, 106 Н·м синтезовано схему стабілізації швидкості з ПІ-контролером. Силовий перетворювач – найпростіший регулятор напруги з інерціальною частиною близько 0,03 с, давач швидкості – імпульсний тахогенератор з фільтром інерціальністю 0,015 с. Використався ПІ-контролер швидкості, налаштований при лінеаризації системи на «симетричний» оптимум, який працює з задавачем інтенсивності на вході, з метою зменшення перерегулювання. У систему вносилося періодичне збурення (5 Н·м, 200 рад/с). Навантаження має характер квадратичної залежності. Необхідно підкреслити, що система суттєво нелінійна (регулятор напруги має обмеження на рівні 380 В, регулятор швидкості на рівні ± 10 В, навантаження «вентиляторного характеру», АД – згідно п.п. 3; 4 наведеної

вище послідовності розрахунку моделі АД. До того ж, необхідно взяти до уваги, що малі морські безпілотні судна, позицій керування їх рухом, є нелінійними системами. Це пояснюється тим, що будь-які зміни швидкості, осадки, маси чи режиму руху, призводять до суттєвих змін динамічних характеристик і параметрів судна (приєднані маси, момент інерції, площа змоченої поверхні, режим глісеру тощо). При цьому необхідно враховувати, що на судно безперервно діють збурення у вигляді вітру і хвиль, течій, мілководдя тощо, що призводять до відхилення від заданого курсу. Ці збурення суттєво ускладнюють задачі стабілізації курсу судна і, загалом, електрорушія.

Моделювання системи стабілізації швидкості з ПІ-контролером довело, що така система підтримує належну якість функціонування судна лише у вузькому діапазоні змін параметрів об'єкта регулювання. А при змінах, наприклад, моменту інерції, збурення, чи інших параметрів, що описують модель судна (наприклад, параметрів моделі Номото), суттєво погіршується якість процесів регулювання. Саме тому використано нечіткий контролер, побудований за правилами, наведеними на рис. 5.6. Схема моделі системи наведена на рис. 5.7.

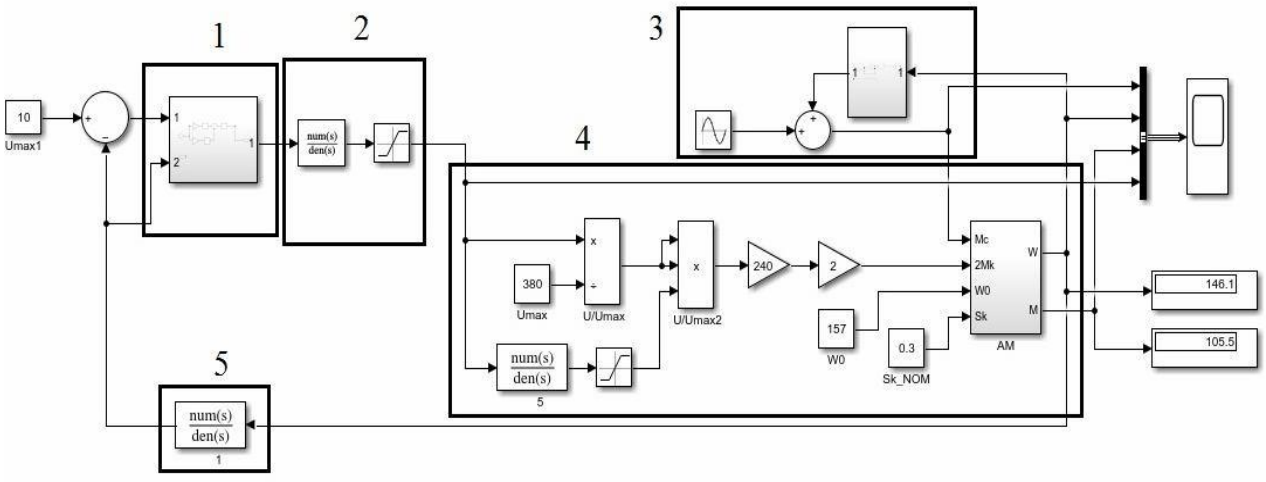


Рисунок 5.6 – Матлаб-модель системи стабілізації швидкості електрорушія з НК

Структурна схема імітаційної моделі (рис. 5.7) включає нейроконтролер з обмеженням вихідного сигналу, силовий перетворювач напруги, асинхронний

двигун та тахогенератор із фільтром зворотного зв’язку. Механічна частина системи представлена «вентиляторним» навантаженням із накладеним періодичним збуренням для відтворення реальних умов експлуатації.

Результати моделювання системи з нейроконтролером за відсутності задавача інтенсивності (рис. 5.7–5.9) відображають динаміку зміни напруги на виході перетворювача, електромагнітного моменту двигуна, кутової швидкості та моменту навантаження. Аналіз отриманих осцилограм дозволяє оцінити показники якості перехідних процесів, стійкість системи до варіативних збурень та здатність нейромережевого алгоритму забезпечувати задані режими функціонування в умовах нелінійності характеристик виконавчих механізмів.

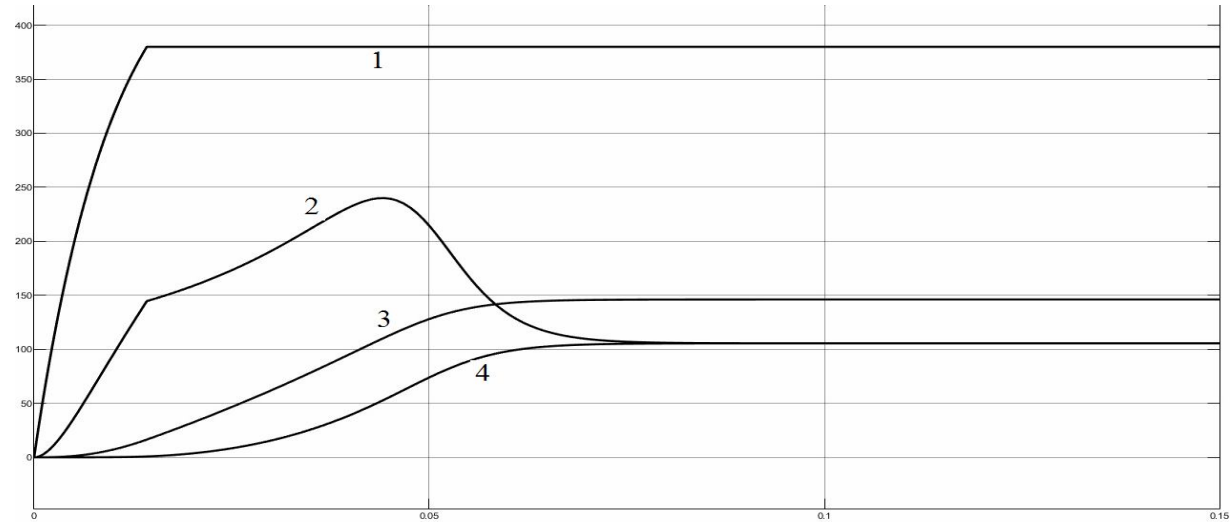


Рисунок 5.7– Пуск у системі з НК при номінальних умовах і відсутності збурення

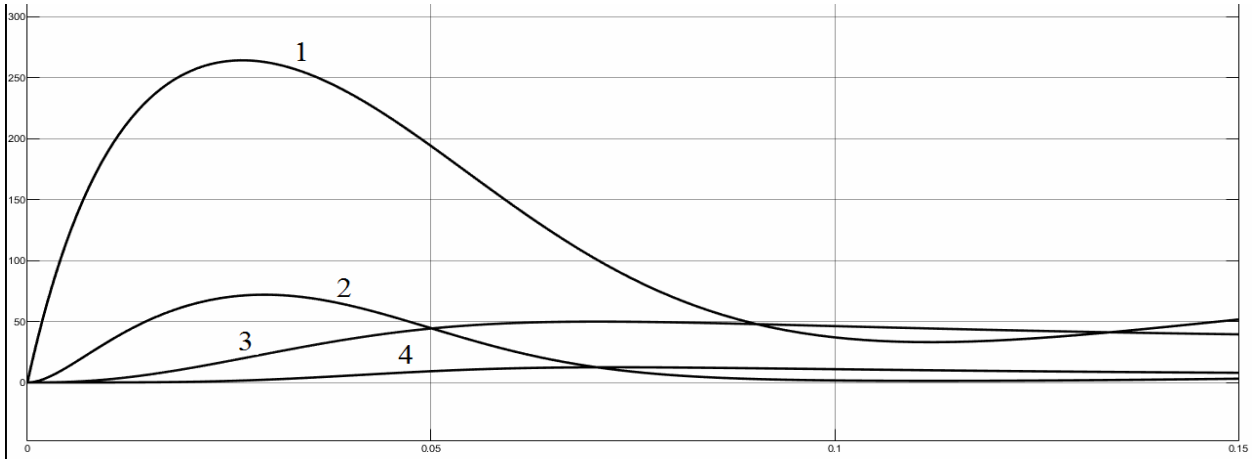


Рисунок 5.8 – Пуск у системі з НК на низьку швидкість і відсутності збурення

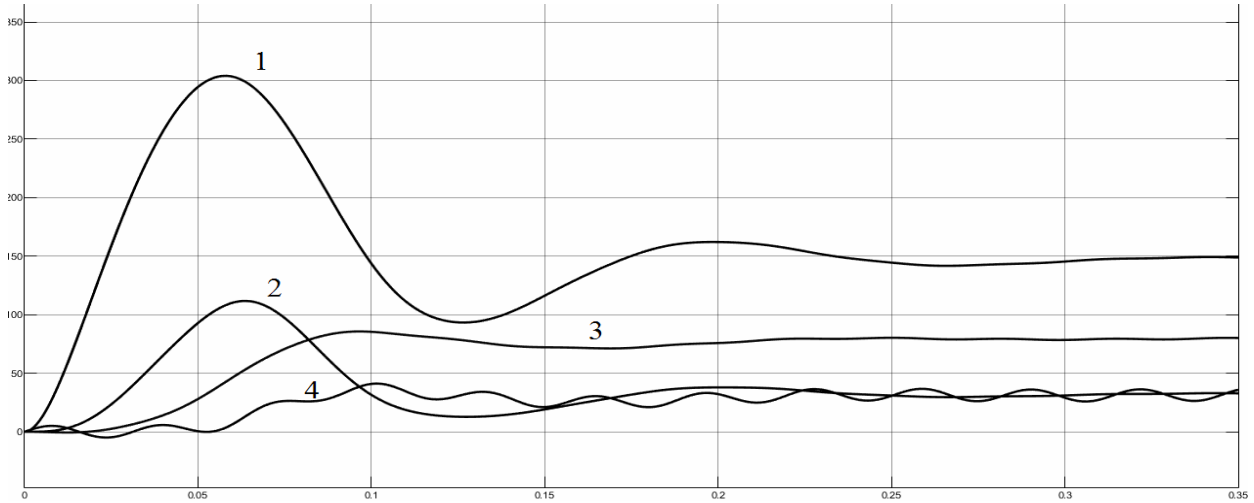


Рисунок 5.9 – Пуск у системі з НК на середню швидкість і дії періодичного збурення

Аналіз наведених результатів моделювання (рис. 5.7; 5.8 та рис. 5.9) доводить, що пропонована система стабілізації електрорушія з НК ефективно функціонує у будь яких умовах експлуатації, а якість процесів регулювання, зокрема – швидкості, є задовільною.

Для кількісної оцінки якості перехідних процесів використовувався інтегральний критерій абсолютної похибки (IAE), який визначається як

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt, \qquad (5.15)$$

де $e(t)$ – похибка регулювання, T – інтервал аналізу.

Зменшення значення IAE свідчить про підвищення точності регулювання та покращення динамічних властивостей системи. Використання нечіткого контролера забезпечує зниження інтегральної похибки в умовах параметричних збурень та змінних режимів функціонування морської автономної платформи.

Отримані результати моделювання підтверджують здатність нечіткого контролера забезпечувати стійке функціонування електромеханічної підсистеми морської автономної платформи в умовах зміни навантаження та зовнішніх збурень. У порівнянні з класичним ПІ-регулятором система з нечітким керуванням

демонструє меншу чутливість до зміни параметрів об’єкта керування, що особливо важливо для автономних платформ зі змінною масою, моментом інерції та умовами експлуатації. Отримані результати підтверджують доцільність використання інтелектуальних методів керування як елемента підвищення інтегральної ефективності функціонування МАП.

У контексті морських автономних платформ якість функціонування електромеханічних підсистем безпосередньо впливає на безпеку виконання місії, точність дотримання маршруту, енергетичну ефективність та стійкість роботи автономних алгоритмів керування. Тому інтелектуальні системи регулювання електрорушіїв слід розглядати як складову загальної системи забезпечення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів.

5.2 Інформаційна підтримка процесу експлуатації автономних морських технічних засобів

Водний транспорт традиційно позиціонується як найбільш економічно доцільний та ефективний спосіб дистрибуції вантажів у глобальному масштабі, формуючи базис міжнародної логістичної системи та забезпечуючи переміщення домінуючої частки світового товарообігу. Водночас, попри вищі показники екологічної стійкості порівняно з авіаційними та автомобільними перевезеннями, функціонування судноплавного сектору супроводжується деструктивним антропогенним навантаженням на біосферу, зокрема через емісію широкого спектра забруднюючих речовин. У сучасних умовах глобального потепління та посилення екологічних імперативів зазначений чинник набуває особливої критичності. Відтак, ключовим вектором розвитку сучасної морської індустрії стає інтенсифікація використання провізної спроможності флоту за умови пролонгованого зниження його екологічного сліду, що досягається шляхом реалізації комплексу техніко-технологічних та операційних рішень у сфері підвищення енергоефективності суден [320].

В сучасних умовах зростаючий інтерес до впливу судноплавства на навколишнє середовище обумовлює значний ступінь актуальності цього питання і характеризується збільшенням наукових публікацій, присвячених дослідженням, заходам, ініціативам, політиці, спрямованим на зменшення його негативних наслідків [321]. Проблеми забезпечення енергоефективності (дослідження засобів та методів управління суднами, впровадження інноваційних методик для розрахунків показників енергоефективності суден [322] поряд з підвищенням вимог до забезпечення екологічної безпеки транспорту (використання альтернативних видів палива [323] та посилення відповідальності судновласників [234] стають центральними об'єктами досліджень сучасної теорії і практики експлуатації засобів морського транспорту [325–327].

Отже, питання пошуку шляхів контролю зниження шкідливих викидів в атмосферу з суден та резервів підвищення енергетичної ефективності судна, у тому числі за рахунок оптимізації суднових систем, є сучасними і своєчасними.

Негативний вплив суден на навколишнє середовище відбувається відразу по декількох каналах:

– морські та річкові судна забруднюють біосферу відходами, одержуваними в результаті експлуатаційної діяльності;

– забруднення здійснюється в результаті аварійних подій, під час яких відбувається викид токсичних речовин (в більшій частині, нафти і нафтопродуктів);

– викид парникових газів;

– шумове (акустичне) забруднення;

– вихід зі строю і затоплення суден.

Вуглекислий газ (CO_2) є найбільш значним парниковим газом (ПГ), що викидається суднами. Викиди парникових газів є основною причиною глобального потепління. Оксиди сірки (SO_x) і азоту (NO_x) сприяють утворенню кислотних дощів і вкрай небажані через їх вплив на здоров'я людини. Чадний

газ (CO), леткі органічні сполуки (ЛОС) і тверді частинки (ТЧ) також впливають на здоров'я людини. До ТЧ відноситься чорний вуглець (ЧВ), який не тільки особливо шкідливий для людини, але є другим за значимістю фактором впливу на клімат після CO_2.

IMO (*International Maritime Organization*), як орган, відповідальний за регулювання морських викидів, розробила складну дорожню карту для декарбонізації сектора. Так, у 2018 р. було прийнято оригінальну стратегію IMO щодо зменшення викидів парникових газів у судноплавстві. Беручи за базовий рік 2008 р., стратегія спрямована на те, щоб до 2050 р. скоротити як мінімум удвічі загальні викиди ПГ від судноплавства і знизити середню вуглеродоємність (CO_2 на тонно-милю) як мінімум на 40 % до 2030 р. і на 70 % до середини століття [328].

Діяльність IMO щодо вирішення проблеми викидів парникових газів судами можна описати виразом

$$\text{Викиди } CO_2 = (\textit{діяльність}) \text{ x } (\textit{енергоефективність}),$$

де діяльність – обсяг транспорту, помножений на відстань (тонно-милі); енергоефективність – викиди CO_2 за видами.

Виходячи з цієї формули, маємо наступне, скоротити викиди CO_2 при міжнародному судноплавстві можливо за рахунок зниження активності судноплавства. Але це, в свою чергу, призведе до стагнації світової економіки. Для того, щоб цього уникнути, треба проводити заходи щодо підвищення енергоефективності судноплавства.

Основною метою вимог Додатку VI до Міжнародної конвенції (МК) MARPOL є скорочення викидів парникових газів із суден за рахунок підвищення їх енергетичної ефективності. Отже, енергоефективність є інструментом, що сприяє зменшенню шкідливих викидів з суден в атмосферу.

Заходами з підвищення енергоефективності є технічні та операційні заходи, які характеризуються відповідними індексами.

Технічні заходи дозволяють підвищити енергетичну ефективність судна за рахунок використання удосконаленого, модернізованого обладнання. Такими заходами є

– покращення форми корпусу (зниження опору при русі);

– удосконалення гвинта (підвищення ефективності тягової сили);

– удосконалення фюзеляжу виступаючих частин судна для енергозбереження відпрацьованого тепла;

– використання поновлюваних джерел енергії тощо.

Оцінка ефективності технічних заходів проводиться за допомогою індексу енергоефективності конструкції (*EEDI*), який є однією з специфікацій суден, вимірює кількість грамів викидів CO_2 на тонну на морської милі і розраховується виходячи з конструкції суден і показників експлуатації двигунів за формулою

$$EEDI = \frac{CO_2}{Capacity \cdot V_{ref}} \tag{5.16}$$

Показник *EEDI* розраховується один раз у період будівництва судна, фіксована вартість протягом всього життєвого циклу судна.

Операційні заходи. Підвищення енергоефективності досягається через «операційні зусилля» (оптимізацію операційного плану для кожного судна, зниження швидкості проводки з урахуванням погодних умов, прибуття в порт вчасно, обслуговування корпусу, двигуна тощо) без модифікації обладнання.

Індекс оцінки ефективності операційних заходів (*EEOI*)

$$EEOI = \frac{\sum FC_j \cdot CF_j}{m_{cargo} \cdot D}, \tag{5.17}$$

Для комплексної оцінки ефективності функціонування автономної морської платформи запропоновано інтегральний індекс енергоефективності *IEE*, який враховує енергетичні витрати, результативність виконання місії та

рівень експлуатаційного ризику. На відміну від традиційних показників, орієнтованих переважно на енергоспоживання або екологічні характеристики, запропонований індекс забезпечує багатокритеріальне оцінювання роботи автономної системи в реальному часі. Значення індексу визначається як зважена сума нормованих показників енергетичної ефективності, ймовірності успішного виконання місії та безпеки функціонування, що дозволяє використовувати його як цільову функцію в алгоритмах прогнозного керування цифрового двійника морської автономної платформи. Чим більше значення *IEE*, тим вищим є рівень загальної ефективності функціонування системи.

$$IEE(t) = w_1 \frac{E_{ref}}{E(t)} + w_2 \frac{P_{succ}(t)}{P_{ref}} + w_3 \left(1 - \frac{R(t)}{R_{max}}\right), \qquad (5.18)$$

де $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, $E(t)$ – фактичне енергоспоживання; E_{ref} – еталонне енергоспоживання; $P_{succ}(t)$ – ймовірність успішного виконання місії; P_{ref} – еталонне значення успішності місії; $R(t)$ – інтегральний ризик функціонування; R_{max} – максимально допустимий рівень ризику; w_1, w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти критеріїв енергоефективності, результативності та безпеки відповідно.

Для морських автономних платформ питання енергоефективності має не лише екологічне, але й функціонально-критичне значення, оскільки енергетичні ресурси автономної місії є обмеженими. У зв’язку з цим задачі адаптивного управління енергоспоживанням безпосередньо впливають на тривалість автономного функціонування, стійкість виконання місії та інтегральну ефективність експлуатації АМТЗ.

Резолюцією IMO MEPC.282(70) передбачена розробка заходів щодо підвищення енергоефективності експлуатації конкретного судна (план SEEMP) [329]. В якості таких заходів зазначеною резолюцією пропонується використання більш якісного палива, обмеження часу простою в портах за рахунок чіткішого планування рейсів, правильне баластування судна, своєчасне

обслуговування корпусу та двигуна тощо [330, 331]. Щодо головного двигуна (ГД), то в керівництві ІМО справедливо говориться, що коефіцієнт корисної дії сучасних суднових дизелів вкрай високий (~ 50 %) і можливість подальшого його підвищення без залучення нових технологій (наприклад, паливних елементів) викликає сумніви. Але у допоміжних системах та механізмах резерви оптимізації енергоспоживання наявні. Тому питання виявлення та використання резервів підвищення енергоефективності судів за рахунок оптимізації суднових систем, а саме систем, що задіяні на ходу судна; що забезпечують вантажні операції та систем, що не споживають енергію, є безумовно актуальними.

В системах, які задіяні на ходу судна, енергія, що споживається враховується при розрахунку індексу енергоефективності конструкції, тобто системи беруть участь у виробництві транспортної роботи, і споживана ними енергія враховується при розрахунку *EEDI*. До таких систем відносяться:

– системи, що обслуговують головний двигун (охолодження палива, олії, вентиляції машинного відділення (МВ), систему підігріву палива);

– системи, що обслуговують вантаж у процесі перевезення (вентиляції вантажних трюмів, холодильна установка, що обслуговує рефтрюми, системи охолодження вантажу);

– системи, що забезпечують загальносудові потреби (побутові, холодильна установка провізійної комори, вентиляції та кондиціювання житлових та службових приміщень, баластові та осушувальні системи при їх використанні на ходу судна).

До систем, які забезпечують вантажні операції, відносять системи розвантаження (вантажну, баластну, інертних газів, вентиляції трюмів суден РО-РО, заморожування вантажу в рефтрюмах, систему підігріву вантажу на танкерах). Група систем, що не споживають енергію, включає газовідвідну систему шпігатів з відкритих палуб, а також рідко задіяні системи – пожежні, обігрів баластових танків тощо.

Основними способами економії за рахунок оптимізації роботи суднових систем є застосування забортних охолоджувачів і частотного регулювання насосів

охолодження забортною водою; оснащення приводів вентиляторів машинних приміщень та вантажних трюмів частотними регуляторами; будову рекуператорів з утилізацією теплоти витяжного повітря для нагрівання припливного в системах вентиляції та кондиціювання житлових та службових приміщень; використання утилізаційних котлів для підігріву важкого палива та побутових потреб.

Розглянемо специфіку енергоспоживання суднової системи вентиляції з метою визначення додаткових факторів та особливостей, які слід врахувати для більш повного та адекватного визначення енергетичної ефективності судна, а також виявлення потенційних можливостей енергозбереження.

Функціональне призначення суднової вентиляційної системи полягає у забезпеченні нормативних параметрів повітряного середовища в службових та житлових приміщеннях шляхом контрольованого масообміну та заміщення асимільованих повітряних мас свіжим припливним повітрям. Системи примусової (машинної) вентиляції енергетичного відсіку проєктуються з умовою забезпечення температурного режиму в машинному відділенні відповідно до граничних критеріїв Правил Регістру судноплавства України (не більше 45°С), а також задоволення вимог ергономіки та безпеки життєдіяльності операторського персоналу.

Згідно з методологічними положеннями, викладеними у [332–334], сумарна номінальна електрична потужність електроприводів (ЕП) вентиляційного комплексу є функцією від сумарної максимальної тривалої потужності головного двигуна (ГД) і формалізується базовою залежністю:

$$P_{\text{вМВ}} = 0{,}025N^{0{,}6}, \qquad (5.19)$$

де N – потужність головного двигуна, МВт.

Аналіз залежності (5.19) показує, що зі збільшенням потужності головного двигуна потреба у вентиляції машинного відділення зростає нелінійно, що обумовлює доцільність застосування частотного регулювання вентиляторів як одного із заходів підвищення енергоефективності.

Величина електричної потужності, необхідна для забезпечення роботи електроприводів вентиляційних установок машинних відділень (МВ), розраховується з урахуванням специфіки експлуатаційних режимів. Зокрема, під час стоянки судна в помірних та арктичних широтах це значення фіксується на рівні 25 % від номінального, тоді як в умовах тропічної зони воно зростає до половини від базового показника. У ходовому режимі вентиляційні системи МВ зазвичай функціонують з максимальним навантаженням, формуючи вагому складову сумарного енергоспоживання.

Аналітична залежність (5.19) свідчить, що витрати електроенергії на вентиляцію машинного простору досягають 20–30 % від загального обсягу споживання суднової електростанції на ходу. Таке значне навантаження детермінує відповідне збільшення супутніх енергетичних витрат, зокрема на забезпечення працездатності насосних агрегатів систем охолодження головної енергетичної установки.

Для перевірки адекватності застосування формули (5.19) проведено тепловий розрахунок вентиляції МВ з вихідними даними при підвищенні температури повітря на 15°С і виділенні двигунами тепла в повітря машинного відділення 1,2 % від потужності двигуна. Результати розрахунку збіглися із наведеною вище формулою (5.19).

Розрахункова кількість припливного повітря в машинних відділеннях визначається з розрахунку на асиміляцію надлишкових тепловиділень виходячи з розрахункового значення температури зовнішнього повітря, яка вибирається хоч і з урахуванням передбачуваного району плавання судна, але з великим запасом для найбільш спекотної пори року. Регулювання подачі повітря до МВ залежно від температури можна розглядати як спосіб зменшення енерговитрат на вентиляцію. Якщо регулювати подачу повітря зміною частоти обертання вентилятора, то економія може становити половину і більше витрат енергії на вентилятор, а економія палива на ходу судна складе близько 0,5 %.

Витрата електроенергії на вентиляцію в житлових і службових приміщеннях правильніше оцінювати спільно з системами опалення та кондиціонування повітря, так як від кратності вентиляції в таких приміщеннях залежить споживання енергії системою опалення та електронагрівальними приладами для обігріву службових приміщень та непрацюючого обладнання. Засоби електрообігріву службових приміщень встановлюються практично на всіх типах суден, тому споживана ними потужність входить в інтегральну потужність судна і враховується при розрахунках *EEDI* в тих 5 % від потужності головного двигуна, рівним яким приймається енергоспоживання на ходовому режимі.

Різні способи економії тепла, холоду та електроенергії в суднових системах вентиляції описані в роботі [335, 336], де наводяться схеми різних рекуператорів, які можуть знайти застосування на суднах. Основною характеристикою рекуператорів є коефіцієнт ефективності рекуперації. Це відношення між максимально можливим отриманим теплом і теплом, отриманим насправді. Коефіцієнт залежить від типу рекуператора, змінюється від 30 до 90 %. Таким чином, за попередніми оцінками при їх застосуванні можна заощаджувати до 70 % споживаної електроенергії на обігрів та кондиціювання.

Проведений аналіз показав, що підвищення енергоефективності морських транспортних засобів може досягатися як шляхом удосконалення конструкції судна, так і за рахунок оптимізації режимів функціонування допоміжних систем. Для морських автономних платформ це набуває додаткового значення, оскільки безпосередньо впливає на тривалість автономної місії, доступний енергетичний ресурс та ефективність виконання цільових завдань.

5.3 Системи керування для безекіпажних морських платформ у змінних режимах експлуатації

Основна маса електроприводів, що застосовуються на морських і річкових суднах (більше 90 %), це винайдені ще у 1889 році трифазні асинхронні

електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. На основі АД утворюють, так званий, нерегульований електропривод (ЕП). При застосуванні нерегульованого ЕП доводиться миритися з використанням засувок у насосах та вентиляторах, а також із застосуванням складних механічних передач, наприклад редукторів і коробок передач (швидкостей), у механізмах, де потрібно змінювати швидкість і регулювати продуктивність технологічного процесу. Доводиться миритися і з тим, що технологічні процеси з нерегульованим електроприводом практично неможливо автоматизувати та дуже важко забезпечується їх енергетична оптимізація при різних навантаженнях [337–339].

Пріоритетний напрямок у сучасному судновому електроприводі – перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого. Це стало можливим завдяки досягненням силової та інформаційної електроніки: між мережею та електродвигуном включається електроннокерований перетворювач енергії і електропривод набуває додаткові споживчі якості.

Потрібно відзначити, що силова і керуюча електроніка породила і конкурентів асинхронному електроприводу, який раніше домінував у всіх технічних галузях. Це, наприклад, регульовані електроприводи, побудовані на основі сучасних двигунів: *BLDC – Brushless DC Electric Motor* (безколекторний електродвигун постійного струму) [340], *PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor* (синхронний двигун з постійними магнітами), *SRM – Switched Reluctance Motor* (вентильний реактивний двигун). Загалом, електроприводи, побудовані на основі перелічених вище типів електродвигунів, мають електронні системи управління, схожі на застосовувані для асинхронного регульованого електроприводу.

Так, регульований *SRM*-електропривод є потенційним кандидатом для використання його у пропульсивному комплексі суден наступного покоління – через його низьку вартість, вкрай низьке використання кольорових матеріалів, високу ефективність, здатність працювати при високих температурах та у жорстких кліматичних умовах. Тим не менш, *SRM*-електроприводи мають суттєвий недолік –

високі пульсації обертаючого моменту. Це може створювати, крім шуму в транспортних засобах і їх механізмах, підвищені пульсації споживаного струму.

Можна вважати, що ефективність використаних енергозберігаючих технологій значною мірою визначається ефективністю регульованого електроприводу. Розробка високопродуктивних, компактних та економічних систем регульованого електроприводу для водного транспорту різного призначення є пріоритетним напрямком розвитку сучасної науки та техніки. Слід визнати, що особлива увага в останні роки приділяється підвищенню якості електроенергії, що споживається з суднової мережі, та забезпеченню електромагнітної сумісності пристроїв [341–342].

Наприклад, вимоги загальнопромислових міжнародних стандартів, таких як *IEC 61000-3, IEEE 519* та інших, до якості енергоспоживання з роками постійно посилюються, а темпи впровадження подібних стандартів в Україні суттєво відстають від міжнародних. Останніми роками ситуація починає змінюватися. Переглянуто не лише старі вимоги, що висуваються до показників якості електроенергії (наприклад, ГОСТ 13109-97, [343]), але й запроваджені нові показники якості, що відповідають ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЕК 61000-3-2-95). Відповідно до останнього стандарту коефіцієнт потужності працюючої апаратури повинен наближатися до одиниці для всіх споживачів потужністю понад 300 Вт. Невиконання вимог стандарту тягне за собою не тільки відсутність конкурентоспроможності, а й призводить до неможливості взагалі вийти зі своєю продукцією на світовий ринок. Про державну значущість цього питання свідчить ухвалення Закону України «Про електромагнітну сумісність».

У зв'язку з цим виникає проблема пошуку відповідного сучасним запитам практики рішення, а саме проблема проєктування та виготовлення пристроїв, що коригують коефіцієнт потужності споживача. Слід зазначити, що створення та освоєння промисловістю Заходу високоефективних силових приладів і обчислювальних пристроїв та урахування можливостей програмованих

мікроконтролерів, значно розширилися функціональні можливості більшості силових корегуючих пристроїв, що спрощує проектувальникам вирішення зазначених проблем.

Багато великих закордонних виробників електронної апаратури (*Semiconductor, Infineon Technologies, International Rectifier* та інші) приділяють велику увагу розробкам пристроїв, які активно керують енергією споживаною з мережі. Це робиться з однією метою – метою суттєвого та якісного підвищення коефіцієнта потужності споживача енергії. Але до цього часу ще не існує загальноприйнятих, яким би віддавалася явна перевага, схемотехнічних рішень для виконання таких пристроїв, однозначних алгоритмів їх роботи, методик обрання окремих елементів. Для аналізу існуючих алгоритмів роботи, наприклад, активних коректорів коефіцієнту потужності (АККП), а також для розрахунку елементів схеми та перевірки працездатності проєктованого пристрою, потрібні трудомісткі, не завжди обґрунтовані, розрахунки у часовій та частотній областях. У зв'язку з цим, останнім часом, з'явилася практика проведення досліджень у спеціалізованих інтегрованих пакетах математичного моделювання. Наприклад, проблеми попереднього моделювання активних коректорів коефіцієнту потужності (А*ККП* або *PFC – Power Factor Correction*), які працюють на навантаження у вигляді інверторів різноманітних регульованих електроприводів, добре вирішуються з використанням *MATLAB* та його енергетичних бібліотек [344–350], тому за мету є аналіз існуючих можливостей підвищення енергетичного фактору суднових мереж електропостачання.

Використання активних коректорів коефіцієнта потужності у структурі суднових електроенергетичних систем дозволяє не лише підвищити енергетичний фактор мережі, але й забезпечити підвищення стабільності функціонування автономної платформи в умовах змінних режимів навантаження та стохастичних коливань параметрів живлення.

Вирішення названого наукового завдання є, безумовно, актуальним, оскільки дозволить при проєктуванні сучасних систем електропостачання різноманітних засобів водного транспорту, передбачати передустановку різного

типу та призначення пристроїв, що підвищують енергетичний фактор споживача, наприклад, використати АККП (*PFC*) і тим самим забезпечити конкурентоспроможність кінцевого технічного рішення.

Основні терміни, визначення та співвідношення

Наступні електроенергетичні показники судна характеризують ефективність використання та ефективність споживання електричної енергії, навантажувальні та перевантажувальні характеристики всієї суднової системи електропостачання.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) характеризує ефективність використання обладнання та представляє відношення вихідної активної потужності до вхідної:

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\% . \qquad (5.20)$$

Повна потужність (*S*) – характеризує величину завантаженості мережі обладнанням, що дорівнює добутку діючих значень напруги та струму:

$$S = U \cdot I, \quad (BA) \qquad (5.21)$$

і визначається трьома складовими потужності:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}, \qquad (5.22)$$

де P – активна потужність (Вт), Q – реактивна потужність (ВАр), T – потужність спотворення (ВА). Для лінійних навантажень маємо $T = 0$.

Коефіцієнт потужності (K_p) характеризує ефективність споживання енергії та представляє відношення активної потужності до повної:

$$K_p = \frac{P}{S} = \cos\varphi_1 \cdot K_{\text{нл}}, \qquad (5.23)$$

де φ_1 – фазовий зсув між першими гармоніками напруги та струму, $K_{\text{нл}}$ – коефіцієнт нелінійності:

$$K_{\text{нл}} = \frac{I_1}{I} \le I, \tag{5.24}$$

а I_1 – чинне значення першої (основної) гармоніки струму, I – чинне значення несинусоїдального періодичного струму:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1} I_n^2}, \tag{5.25}$$

при I_n – діюче значення n-ої гармоніки струму, n – порядок вищої гармоніки струму.

Енергетичний коефіцієнт (енергетичний фактор) – узагальнений показник ефективності обладнання:

$$K_{\text{е}} = \eta \cdot K_p, \tag{5.26}$$

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності – характеризує ступінь відхилення форми періодичної кривої струму від синусоїдальної.

За визначенням стандарту 13109-97 маємо:

$$K_{\text{с}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1}, \tag{5.27}$$

Коефіцієнт нелінійності, що впливає на значення коефіцієнта потужності, може бути представлений через коефіцієнти спотворення синусоїдальності:

$$K_{\text{нл}} = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{\text{с}}^2}}. \tag{5.28}$$

Наведені електроенергетичні показники формують аналітичну основу оцінювання енергетичної ефективності морської автономної платформи та можуть

бути використані як складові інтегрального критерію mission-oriented efficiency. Це дозволяє поєднати процеси управління електроспоживанням із задачами адаптивного оперативного управління.

Застосування активних коректорів коефіцієнту потужності у схемах джерел електропостачання суднових електроприводів

Особливою проблемою створення електроприводів, призначених для живлення від бортової електромережі, є обмеження, що накладаються на величину струму, який споживається з мережі. Наприклад, у побутових системах електропостачання, при живленні від мережі напругою 220 В, 50 Гц (європейський стандарт), воно становить 10 А, а від мережі напругою 115 В, 60 Гц (стандарт США) – 15 А. Для морських транспортних засобів такі обмеження встановлюються у кожному конкретному випадку й можуть бути навіть більш жорсткими. Отже, для підвищення корисної потужності регульованого електроприводу, без перевищення допустимих значень струмів, необхідно підвищувати коефіцієнт потужності системи [350–355].

З іншого боку, сучасні вимоги до суднових споживачів електроенергії включають вимоги щодо електромагнітної сумісності. Підвищені вимоги по коефіцієнту потужності і формі струмів, що споживаються з мережі, роблять бажаним застосування спеціальних засобів корекції форми вхідного струму.

Ці два аспекти обґрунтовують застосування у складі схеми джерела електропостачання активних коректорів коефіцієнту потужності. Застосування АККП теоретично дозволяє збільшити cosφ до величини, щонайменше, 0,99. При цьому ККД АККП становить, щонайменше, 0,94. Енергетичний фактор електротехнічної установки (1,6) при цьому зростає. Наприклад, при ККД споживача 0,75 і його cosφ = 0,65, енергетичний фактор зростає на 21 % = (0,94·0,75·0,99 – 0,75·0,65), що й становить частку потенційного збільшення корисної потужності. При цьому, також, суттєво покращується якість вхідного струму споживача – він стає практично синусоїдальним.

Таким чином, коректор коефіцієнту потужності виконує у системі:

– формування такого вхідного струму установки, який повторює за формою вхідну напругу. Це збільшує коефіцієнт потужності та дозволяє збільшити крутний момент електроприводу за рахунок підвищення допустимого значення корисної потужності;

– підвищення та стабілізацію напруги U_d живлення інвертора ЕП. Це дозволяє отримати крутний момент, який не залежить від величини вхідної напруги.

Математичне моделювання електроенергетичних процесів у джерелі постійної напруги (ДПН) споживача необхідне не тільки для підвищення точності розрахунку електромагнітних процесів у системі, але й для визначення параметрів та вибору силових електронних приладів, дроселя ККП, конденсатора фільтра, для розрахунку розмірів охолоджуючого силові елементи радіатора.

Коефіцієнт потужності джерел енергії суднових електроприводів (на прикладі SRM-електроприводу)

Вентильний реактивний електродвигун (ВРД) є досить складною електромеханотронною системою (рис. 5.10), до складу якої входять власне індукторна машина ІМ, перетворювач-комутатор частоти ПЧ, система управління СУ, вентильний комутатор ВК і датчик положення ротора ДПР.

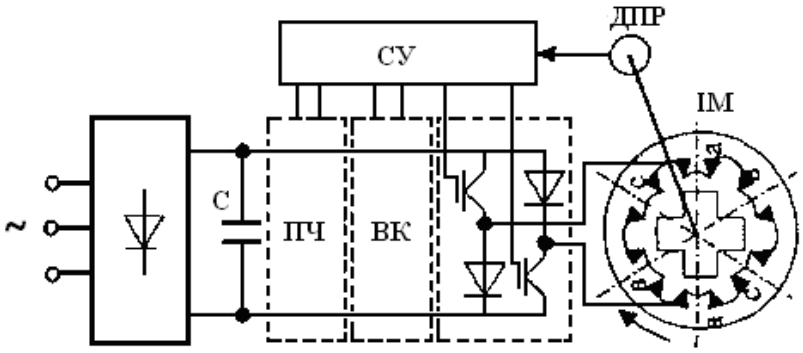


Рисунок 5.10 – Функціональна схема SRM-електроприводу

Функціональне призначення цих елементів *SRM* очевидне: перетворювач частоти забезпечує живлення фаз ІМ однополярними імпульсами напруги

прямокутної форми; ІМ здійснює електромеханічне перетворення енергії, а система управління СУ, відповідно до закладеного в неї алгоритму і сигналів зворотного зв'язку, що надходять від датчика положення ротора, керує всім процесом обертання ротора двигуна.

Робота інвертора, що комутує фази *SRM-двигуна*, супроводжується періодичними режимами споживання струму від конденсатора *C* та його наступної підзарядки. Звичайно, такий характер перебігу струму призводить до імпульсного споживання енергії з мережі. Приймаємо, у загальному випадку, що імпульсний блок живлення є однофазним мостовим випрямлячем, навантаженим на ємнісний фільтр і високочастотний імпульсний перетворювач [365–360]. Така схема характеризується негармонічною формою споживаного струму (рис. 5.11, 5.12 та 5.13).

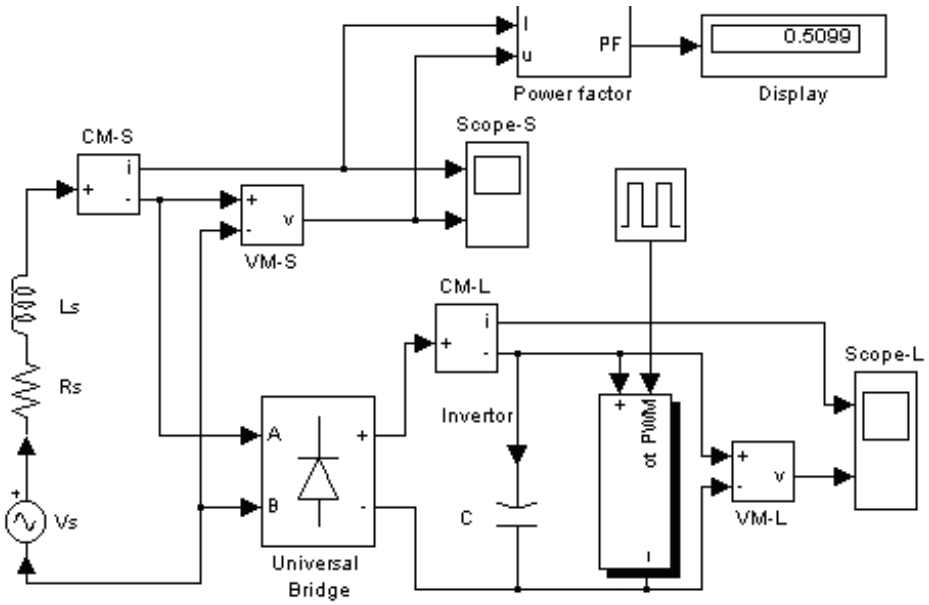


Рисунок 5.11 – Схема однофазного імпульсного джерела живлення, навантаженого на одну фазу SRM

Для аналізу електромагнітних та енергетичних характеристик SRM-приводу було побудовано модель імпульсного джерела живлення та схему підключення окремої фази інвертора. Таке моделювання дозволяє дослідити процеси комутації, розподіл струмів і вплив імпульсного режиму роботи на енергоспоживання системи.

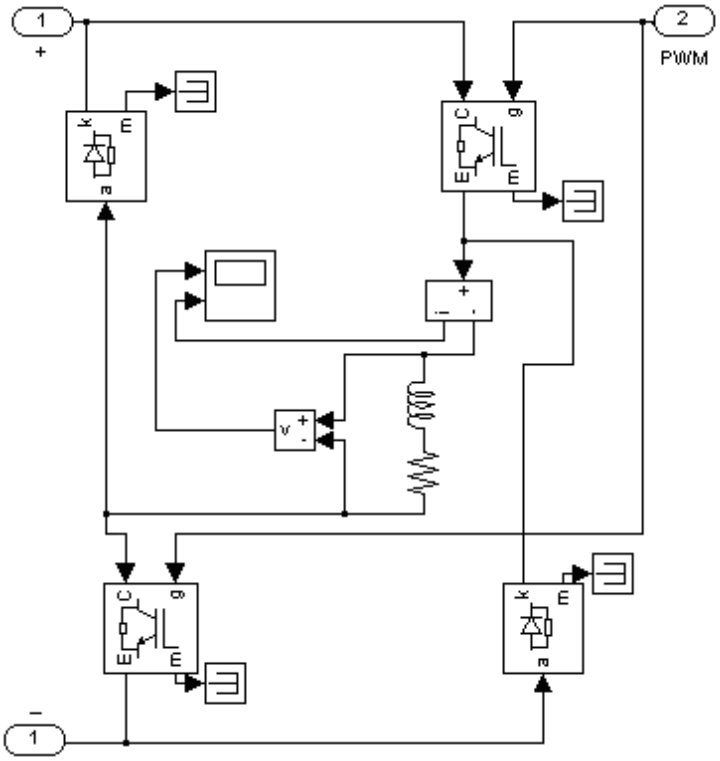


Рисунок 5.12 – Схема підключення однієї фази інвертора SRM

Представлені схеми демонструють принцип організації живлення та керування фазами SRM-двигуна в імпульсному режимі. Використання інверторної структури забезпечує формування необхідних режимів комутації струму, що дозволяє підвищити ефективність електроприводу та реалізувати адаптивне регулювання параметрів роботи двигуна. Аналіз отриманих моделей є основою для подальшого дослідження гармонічних спотворень, енергетичних втрат і режимів стабілізації системи.

При синусоїдальній вхідній напрузі мережі споживаний струм $I_{вх}$ кожен напівперіод набуває форми імпульсу, тривалість $t_і$ і амплітуда $I_{ім}$ якого залежать від моменту відмикання діодів і вхідного опору випрямляча на інтервалі споживання ним струму, і характеризується певним коефіцієнтом амплітуди (рис. 5.13).

Як видно з рис. 5.13, такого роду навантаження споживає з мережі струм короткими імпульсами, що в свою чергу говорить про неприпустимо низький коефіцієнт потужності. Це підтверджується моделями розрахунків.

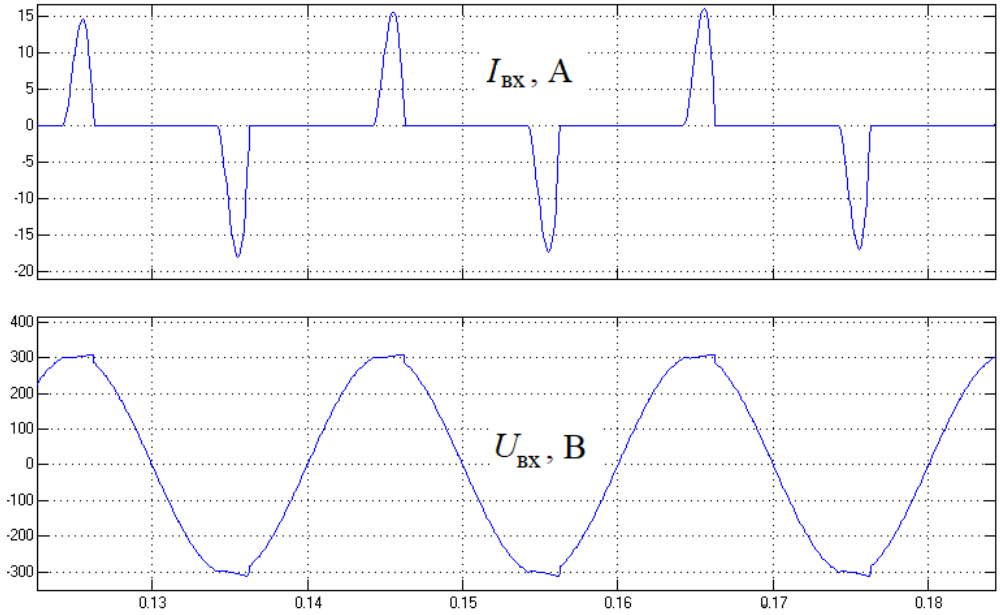


Рисунок 5.13 – Форма напруги та струму на вході випрямляча

Користуючись формулами (5.3–5.10) можна розрахувати величину коефіцієнту потужності. У розробленій моделі для розрахунку коефіцієнту потужності служить блок *Power factor*, внутрішня структура якого показана на рис. 5.14 [360–365].

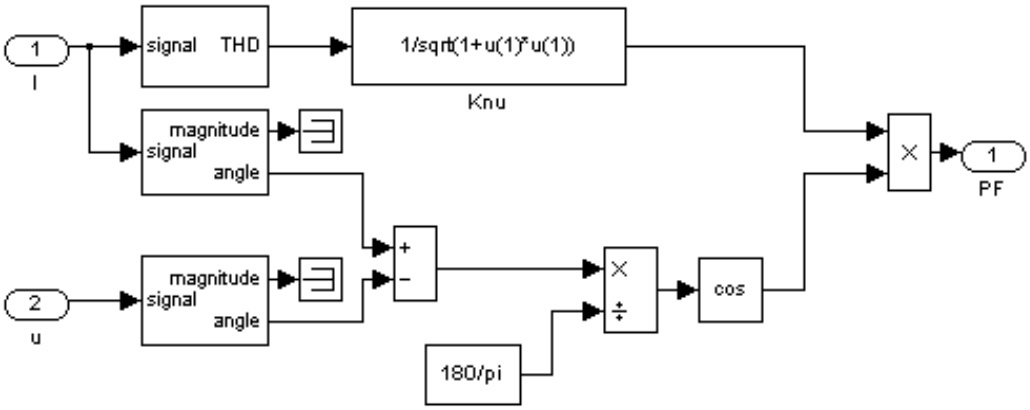


Рисунок 5.14 – Структура блоку вимірювання коефіцієнту потужності

Обчислення коефіцієнту потужності проводиться за формулою:

$$K_p = \cos\varphi_1 \cdot K_{нл} = \cos\varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1+K_c^2}}, \qquad (5.29)$$

де K_c= *THD* (*Total harmonic distortion*); $\cos\varphi_1$ – фазовий зсув між першими гармоніками напруги та струму.

Для визначення використовуються блоки *Fourier analyzer* та блоки стандартних математичних функцій.

Як показали результати моделювання, коефіцієнт потужності звичайного джерела живлення для *SRM*-електроприводу не перевищує 0,6. Це для сучасних виробів дуже низьке значення. Крім того, слід звернути увагу ще на дві обставини.

По-перше, це те, що піковий струм, який споживається з мережі, виявляється у кілька разів вищим, ніж середній. Як відомо, корисна потужність визначається середнім струмом, тоді як падіння напруги на дротах – піковим.

По-друге, струм, споживаний короткими імпульсами, має високу швидкість зміни і, відповідно, створює електромагнітні перешкоди для суднової мережі у широкому спектрі частот. Але значення гармонік струму споживання обмежені досить жорсткими міжнародними стандартами. І, наприклад, якщо традиційні перетворювачі та інвертори до, приблизно, 250 Вт перетвореної активної потужності з хорошим мережним фільтром задовольняють цим стандартам, то при великих потужностях (вже більших 300 Вт), перетворювач, силовий інвертор або блок живлення (БЖ) принципово не можуть відповідати їм. Вихід на світовий ринок із таким виробом неможливий. У зв'язку із зазначеним, з'являється гостра необхідність у застосуванні спеціальних засобів для підвищення коефіцієнта потужності [366, 367].

Такі засоби, з одного боку позитивно діють на мережу живлення, а з іншого боку – дають підвищення енергетичного фактора споживача, у нашому прикладі – SRM-електроприводу. Дещо покращити проблему дозволяє використання у схемотехніці перетворювачів і інверторів елементів пасивної корекції енергетичного фактору *PF* (*PPFC*). Такі пасивні елементи відрізняються значно більшою масою, у порівнянні з АККП. У корпусі *PPFC*, на виході випрямляча, розміщується великогабаритний дросель класичного *LC-фільтра*. Дросель і

конденсатор згладжують імпульси струму та напруги, роблячи процес споживання потужності з мережі більш рівномірним. Але вирішити основну проблему, пов'язану з імпульсним характером споживання струму на подвоєній частоті мережі, у такий спосіб не вдасться [368–370].

Усього вищезазначеного можна уникнути, якщо з боку мережі блок живлення буде виглядати як суто дисипативний опір. Незважаючи на різноманітність існуючих пристроїв та застосованих у них рішень, принцип роботи інверторів з АККП (*APFC*) можна розглянути на прикладі [371, 372].

Коректор коефіцієнту потужності – це не що інше, як майже звичайний імпульсний регулятор, що живиться випрямленою, але не згладженою мережевою напругою, і стабілізує напругу на вихідному накопичувальному конденсаторі *C* (рис. 5.15).

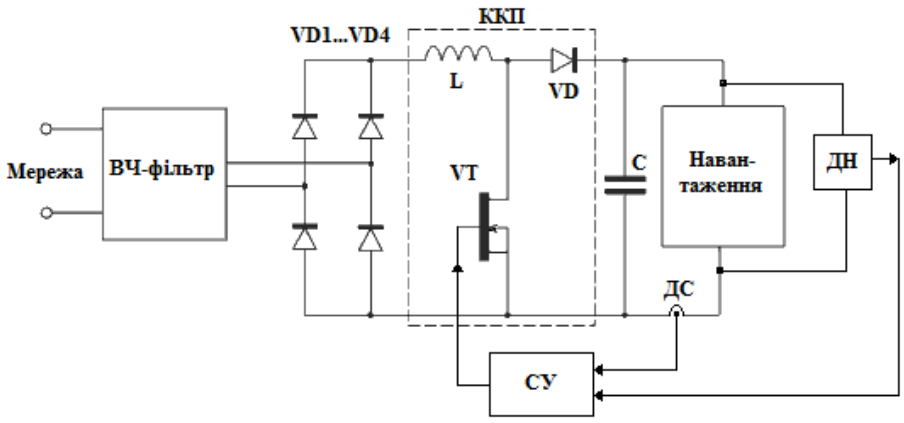


Рисунок 5.15 – Схема джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності

Основний принцип його дії є досить простим. Спочатку, на короткий період, замикається транзисторний ключ *VT* і в котушці індуктивності *L* починає наростати струм. Через деякий час ключ розмикається, а енергія, накопичена в котушці, через діод *VD* переходить у вихідний накопичувальний конденсатор *C*. Цей цикл безперервно повторюється. В результаті, на накопичувальний конденсатор *C* надходять порції енергії, значення яких залежать від:

– вхідної напруги;

– значення індуктивності встановленої котушки;

– часу замкнутого стану ключа.

Індуктивність L необхідно обирати невеликою, щоб розміри котушки та втрати у ній були незначні. Але частоту повторення циклів роблять високою, до сотень тисяч кГц. Необхідно підкреслити, що зі збільшенням частоти циклу падає ККД АККП через суттєве зростання втрат на перемикання ключового транзистора [373–376]. Саме таке протиріччя необхідно вирішувати не тільки попередніми розрахунками, а і засобами моделювання. Визначення втрат у ключі дозволяє обрати охолоджувальний радіатор. Площа поверхні радіатора дозволяє визначити масогабаритні показники АККП. Зрозуміло, що це ітераційна задача, яку неможливо вирішити без сучасних засобів моделювання.

Для узагальненої оцінки результативності інтелектуальної системи керування морською автономною платформою доцільно використовувати інтегральний критерій ефективності, який враховує якість регулювання, енергоефективність та експлуатаційну надійність системи.

$$K_{\text{eff}} = w_1 K_{\text{ctrl}} + w_2 K_{\text{eng}} + w_3 K_{\text{rel}}, \tag{5.30}$$

де K_{ctrl} – показник якості керування; K_{eng} – показник енергоефективності; K_{rel} – показник надійності; w_i – вагові коефіцієнти.

5.4. Критерій ефективності АМТЗ з штучним інтелектом на основі переходу від класичної «ресурсної ефективності» до «когнітивного гомеостазу»

У класичних суднових системах ефективність оцінюється, у головному, виключно через витрату палива / енергоресурсів, час переходу та механічний знос. Проте для безекіпажного судна з інтегрованим штучним інтелектом критичною загрозою є когнітивний колапс – втрата адекватності оцінки реальності, коли

внаслідок зносу, завад або навмисного глушіння (*GPS-spoofing*) сенсори (*GNSS*, ІНС, РЛС, лідари) починають постачати суперечливі дані. Штучний інтелект (ШІ) починає «галюцинувати», розсинхронізуючи цифровий двійник із фізичним об'єктом [454].

Нижче наведено переформатування через впровадження нового класу критеріїв когнітивного здоров'я системи рівняння узагальгеного критерію ефективності

$$I_E = w_1 I_M + w_2 I_R + w_3 I_S + w_4 I_E^{en}, \tag{5.31}$$

де I_M – показник виконання місії; I_R – показник ризику; I_S – показник стійкості функціонування; I_E^{en} – показник енергоефективності. При цьому $\sum_{i=1}^{4} w_i = 1$.

Когнітивний гомеостаз – це динамічна здатність керуючого ШІ-агента утримувати розсинхронізацію між своєю внутрішньою моделлю світу (цифровим двійником) та фізичною реальністю у безпечних, математично обмежених межах, забезпечуючи зв'язність і несуперечливість прийняття рішень при деградації метрологічних характеристик / сигналів вимірювальних пристроїв [455, 457].

Для математичного опису цього стану вводимо метрики «когнітивного здоров'я».

1. Варіаційна вільна енергія як міра «адекватності», базується на принципі вільної енергії Карла Фрістона– ШІ-агент прагне мінімізувати неузгодженість між сенсорними спостереженнями та внутрішньою генеративною моделлю цифрового двійника. Варіаційна вільна енергія $F(t)$ виступає верхньою межею «сюрпризу» (ентропії неузгодженості):

$$F(t) = \underbrace{D_{KL}\left(q\left(x_t \mid \Theta_{DT}(t)\right) \parallel p(x_t)\right)}_{\text{Складність моделі}} - \underbrace{E_q[\ln p\,(z_t \mid x_t)]}_{\text{Точність (правдоподібність)}},$$

де $q\left(x_t \mid \Theta_{DT}(t)\right)$ – внутрішній імовірнісний розподіл стану судна, що генерується цифровим двійником з параметрами Θ_{DT}; $p(x_t)$ – апріорний

розподіл фізичного стану реального об'єкта; z_t – сукупний вектор сенсорних спостережень; D_{KL} – дивергенція Кульбака-Лейблера (відносна ентропія).

2. Індекс когнітивного дисонансу сенсорів $H_{dissonance}(t)$ оцінює суперечливість даних між різними каналами спостереження (наприклад, коли *GNSS* через супутниковий спуфінг показує рух на північ, а гірокомпас інерціальної навігаційної системи та радар фіксують дрейф на південь).

Нехай маємо M незалежних джерел вимірювань, акожне джерело i дає оцінку стану $p_i(x_t \mid z_{i,t})$. Індекс дисонансу розраховуємо як зважену суму попарних розбіжностей Кульбака-Лейблера:

$$H_{dissonance}(t) = \sum_{\mathrm{i}=1}^{M} \sum_{\mathrm{j}>i}^{M} w_i w_j \cdot D_{KL}\left(p_i(x_t \mid z_{i,t}) \parallel p_j(x_t \mid z_{j,t})\right),$$

де w_i, w_j – вагові коефіцієнти метрологічної надійності інтелектуальних сенсорів, що динамічно коригуються в реальному часі. При нормальній роботі $H_{dissonance} \to 0$. При конфлікті даних індекс експоненційно зростає, сигналізуючи про «когнітивну галюцинацію» ШІ.

3. Показник розсинхронізації двійника $D_{sync}(t)$ визначає швидкість розходження прогностичної траєкторії цифрового двійника та реальної кінематики судна внаслідок накопичення похибок інтегрування навігаційних параметрів:

$$D_{sync}(t) = D_{KL}\left(p_{DT}(x_t \mid \Theta_{DT}(t)) \parallel p_{fused}(x_t \mid \mathrm{z}_{1:M,t})\right),$$

де p_{fused} – інтегрований за Бейєсом стан після оптимальної фільтрації.

У класичній постановці рівняння (5.31) мінімізувало суто ресурсний функціонал (витрати енергії $u^T Ru$ та траєкторію):

$$J = \int_0^T [e_x^T(t) Q e_x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \longrightarrow \min .$$

Пропонується його розширити на «антикрихкий когнітивно-гомеостатичний цільовий функціонал» J_{CH}:

$$J_{CH} = \int_0^T \left[\underbrace{e_x^T Q e_x + u^T R u}_{\text{Фізико-ресурсна підсистема}} + \underbrace{\lambda_1 F(t) + \lambda_2 H_{dissonance}(t) + \lambda_3 D_{sync}(t)}_{\text{Когнітивно-інформаційна підсистема (Здоров'я ШІ)}} \right] dt \longrightarrow \min_{u(t),\Theta_{DT}(t)},$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$ – вагові множники когнітивного пріоритету виживання.

Розглянемо оцінку фізичного та інформаційного ефекту від використання антикрихкого когнітивно-гомеостатичниного цільового функціоналу.

1. Адаптивна затримка / Безпечний дрейф. Якщо індекс когнітивного дисонансу $H_{dissonance}(t)$ різко зростає (сенсори суперечать один одному), внесок когнітивної підсистеми у загальний інтеграл J_{CH} стає домінуючим. Система автоматично приймає рішення призупинити активний рух (знизити швидкість $u(t) \to 0$ або лягти у дрейф на безпечній глибині), оскільки подальше форсування ресурсного переходу в умовах «сліпоти» загрожує катастрофою.

2. Активне епістемічне зондування. Задля зменшення вільної енергії $F(t)$ (тобто для уточнення координат), контролер АМТЗ може виконати короткочасний безпечний діагностичний маневр (наприклад, зробити зигзаг, циркуляцію або змінювати кут нахилу антени РЛС). З точки зору класичної економіки це «перевитрата палива», але з точки зору когнітивного гомеостазу – це необхідна дія для відновлення адекватності картини світу.

3. Динамічне калібрування двійника. Мінімізація за вектором параметрів $\Theta_{DT}(t)$ змушує систему на льоту перебудовувати структуру фільтрів Калмана чи нейромережевих обсерверів, виключаючи з контуру обчислень сенсор, який деградував або піддався *spoofing*-атаці.

У якості спрощеного прикладу, порівняємо (табл. 5.1) класичний ресурсний підхід (який розглянуто у Розділі 2) та пропонований когнітивно-гомеостатичний.

Таблиця 5.1 – Порівняння ресурсного та когнітивно-гомеостатичного управління АМТЗ

Характеристика порівняння	Класичний ресурсний підхід	Когнітивно-гомеостатичний підхід (пропоноване розширення)
Критерій оптимізації	Мінімізація витрати палива / енергії, шляху та часу руху	Збереження зв'язності та адекватності внутрішніх моделей ШІ
Реакція на критичний відмов сенсорів	Продовження руху за хибними даними (загроза зіткнення)	Активація безпечного стану, запуск епістемічних маневрів для перекалібрування
Статус цифрового двійника	Статична розрахункова модель для симуляції зносу	Динамічний гомеостатичний регулятор, що вчиться в рантаймі
Пріоритет при аварії	Економія фізичного ресурсу (палива / батареї)	Уникнення інформаційного хаосу та втрати контролю («*sanity preservation*»)

Впровадження цього класу критеріїв у рівняння (5.31) дозволяє перевести роботу у міждисциплінарну категорію досліджень з когнітивної робототехніки, експлуатації / діагностики / ремонту та безекіпажне судноводіння, вирішуючи головну проблему MASS – безпеку автономного прийняття рішень у глибоко невизначених та конфліктних середовищах відкритого океану [456, 458].

Відтворимо ситуацію, де інтеграл J_{CH} рятує АМТЗ від посадки на мілину під час GPS-спуфінгу, яка слугуватиме перетворенням від теоретичних рівнянь на алгоритм управління. Для цього чисельного підтвердження та ілюстрації процесу запобігання когнітивному колапсу ШІ при критичних аваріях навігаційного обладнання, розроблено симуляційний скрипт за наступним фізико-математичним сценарієм. Моделюється рух двох АМТЗ через безпечний судноплавний канал шириною 24 метри (безпечний коридор обмежений мілинами: $y \in [-12; 12]$ метрів. Довжина місії становить 50 годин (або кроків дискретизації). На 20-й годині місії починається координована атака типу GPS-*spoofing*: зловмисники починають плавно зміщувати хибний сигнал GPS вліво (лінійний зсув у бік від'ємного у зі швидкістю 1,2 м/год). Бортовий приймач GPS

починає видавати ШІ-контролеру хибні дані, стверджуючи: *«Судно зносить ліворуч на мілину».* Одночасно з цим бортовий радар інерціальної навігаційної системи продовжує фіксувати реальний стабільний рух судна по центру фарватеру ($y \approx 0$). Поведінку систем представлено на рис. 5.16.

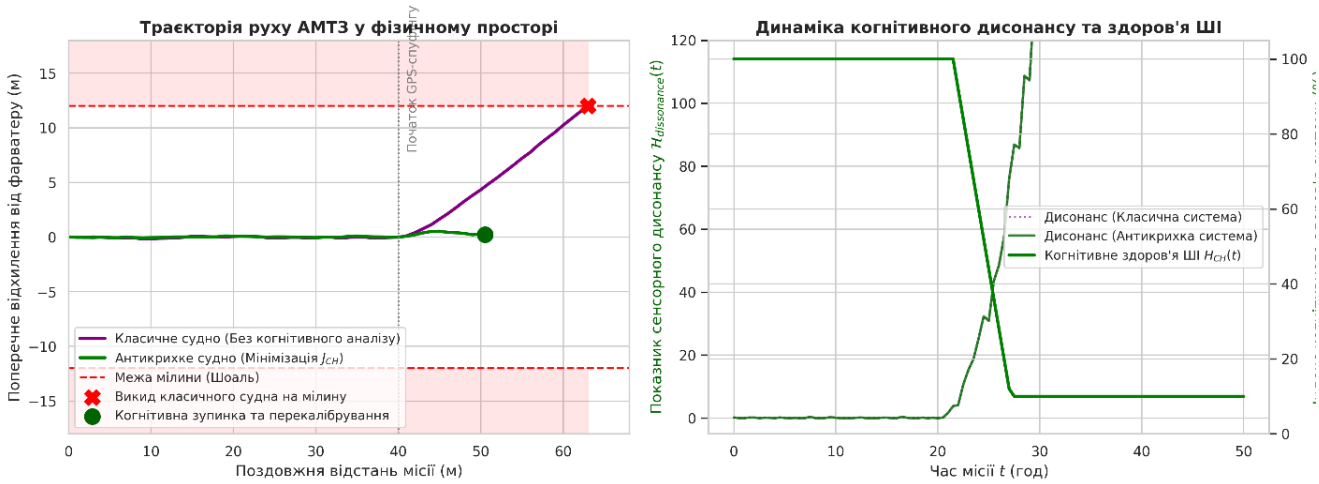


Рисунок 5.16 – Запобігання когнітивного колапсу при GPS-спуфінгу через мінімізацію J_{CH}

Оцінимо поведінку систем у процесі описаної ситуації.

Класичне судно (без когнітивного аналізу). Тут контролер системи, який жорстко налаштований на підтримку нульового відхилення, за даними GPS ($(y_{gps} \to 0)$, не аналізує суперечливість джерел і не оцінює своє «розумове здоров'я». Криза (t = 20–30 год) – отримавши хибне повідомлення про знесення ліворуч, класичний контролер починає екстрено перекладати рулі праворуч (у позитивний y) для компенсації вигаданого збурення. Результат (t = 30 год): довіряючи даним пошкодженого сенсору, класичне судно вилітає за межі безпечного каналу (y > 12 м) і сідає на мілину (аварійна мітка «Х» на лівому графіку). Його поздовжній рух блокується $v_x \to 0$, місію повністю зірвано через втрату адекватності оцінки реальності. Ліва панель («Траєкторія руху АМТЗ у фізичному просторі») демонструє, як класичне судно (пурпурна лінія) під впливом спуфінгу суттєво і досить різко відхиляється праворуч і врізається в червону зону

мілини. Натомість зелена траєкторія антикрихкого судна після виявлення загрози стабілізується на безпечній відстані, здійснюючи м'яку когнітивну зупинку.

Антикрихке судно (мінімізація J_{CH}). Тут ШІ мінімізує інтегральний функціонал когнітивного гомеостазу (J_{CH}). Він безперервно вимірює розбіжність між сенсорами через індекс когнітивного дисонансу:

$$H_{dissonance}(t) = \left(y_{\text{gps}} - y_{radar}\right)^2.$$

Криза та ідентифікація аномалії (t = 20–23 год): щойно починається спуфінг, показник дисонансу стрімко злітає вгору, миттєво долаючи критичний поріг безпеки ($H_{dissonance} > 4{,}0$).

Етап когнітивного самозбереження. Тут розрахунковий індекс когнітивного здоров'я ШІ $H_{CH}(t)$ падає зі 100 % до мінімальних безпечних 10 %. Замість нераціональної витрати енергії на маневрування, наприклад, спалювання палива, мінімізація J_{CH} змушує АМТЗ терміново скинути швидкість $v_x \to 0$ та виконати безпечну зупинку для збереження фізичної цілісності. Оператор F_{config} у цей час експоненційно знижує ваговий коефіцієнт GPS-приймача $w_{gps} \to 0{,}01$, повністю вимикаючи його з контуру прийняття рішень як деградований вузол. Результат (t = 25–50 год): навігація повністю та безперешкодно перемикається на локальну навігаційну систему. ШІ відновлює адекватну оцінку реальних координат, когнітивне здоров'я стабілізується, а судно залишається у повній безпеці всередині фарватеру. Права панель «Динаміка когнітивного дисонансу та здоров'я ШІ» показує стрімке зростання дисонансу (пунктирні лінії) після 20-ї години. На зеленому суцільному графіку видно, як вчасно зреагував антикрихкий ШІ – його індекс когнітивного здоров'я впав, запустивши аварійний протокол відключення скомпрометованого GPS-каналу, що врятувало судно від фізичного руйнування.

Для оптимального розподілу обчислювальних ресурсів у рої АМТЗ з метою підтримки когнітивного гомеостазу та запобігання інформаційному

хаосу необхідно впроваджувати гібридну туманно-межову архітектуру (*Hybrid Fog-Edge Architecture*). Така архітектура раціонально розділяє обчислювальні процеси за часовими масштабами, рівнем критичності задач та поточним енергетичним станом кожного судна. Вона є наступною.

1. Межовий рівень (*Edge AI*) – швидкі контури локального гомеостазу. Тут ШІ-агенти на суднах мають функціонувати в межах жорстких лімітів часу (часто в діапазоні мілісекунд), особливо у складних погодних умовах чи під час маневрів запобігання зіткненням. Первинна фільтрація навігаційних сигналів, злиття даних сенсорів (РЛС, лідари, ІНС) та безперервне обчислення індексу когнітивного дисонансу $H_{dissonance}(t)$ мають виконуватися виключно локально на бортових комп'ютерах (*Edge Computing*) кожного окремого АМТЗ. Межові пристрої дозволяють суднам приймати децентралізовані рішення автономно. Це гарантує, що у разі тимчасової втрати зв'язку судно не втратить адекватності оцінки реальності та продовжить утримувати свій локальний гомеостаз.

2. Туманний рівень (*Fog Computing*) – паралельне та кооперативне моделювання рою. Тут складні завдання аналітичного ядра цифрового двійника (наприклад, прогнозування тривимірного поля течій за допомогою методів Ньютона, або розрахунок «*what-if*» прогнозів на великих горизонтах планування) потребують значної обчислювальної потужності, якої може бракувати одному невеликому АМТЗ. Для прискорення моделювання на борту судна обчислення доцільно проводити паралельно. За допомогою додаткового моделювання у різних умовах, доведено, що використання розподіленого режиму обчислень із поділом навантаження на два ізольовані потоки даних зменшує часові витрати (усереднено) на 28 %, а поділ на чотири потоки – на 42 %.

Якщо одне з суден рою виявляє апаратну аномалію, перегрів обчислювача чи прискорену деградацію батареї, воно задіює контур логічного резервування. Таке судно може делегувати (*offload*) ресурсомісткі задачі розрахунку свого цифрового двійника сусіднім суднам рою, які мають профіцит обчислювальної

потужності. Завдяки розподіленій архітектурі ШІ, АМТЗ здатні обмінюватися цифровим досвідом у реальному часі, підтримуючи працездатність навіть фізично пошкодженого агенту.

3. Хмарно-береговий рівень (*Cloud Integration*) – довгострокова еволюція, деоновлення глибоких нейромережевих моделей (наприклад, для алгоритмів *MAPPO* чи *QMIX*) створює експоненціальновисокі обчислювальні та пам'яттєві навантаження у міру зростання чисельності рою. Процеси важкого навчання та довгострокового прогнозування зносу обладнання доцільно виконувати у береговому хмарному центрі. Оновлені ваги моделей передаються на судна під час періодичних вікон зв'язку, де вони використовуються для швидкого децентралізованого виконання на борту.

4. Оптимізація комунікаційного навантаження. Тут перерозподіл обчислювальних задач між суднами безпосередньо обмежений енергетичною спроможністю зв'язку, оскільки, наприклад, підводні акустичні, канали майже завжди мають низьку пропускну здатність та великі затримки. Щоб не порушити гомеостаз рою перевитратами енергії на трансляцію сирих даних, мережева топологія оптимізується шляхом жорсткого обмеження ступеня зв'язності кожного вузла ($d_i \leq 3$), та періодичного використання внутрішніх прогнозів цифрового двійника замість безперервної передачі сигналів.

Для чисельного підтвердження та подальшого практичного втілення запропонованого механізму забезпечення стійкості рою розроблено математичну модель розподілу обчислень.

Фізичний зміст симуляції – моделюється 50-годинна автономна місія рою з трьох АМТЗ (АМТЗ 1, АМТЗ 2, АМТЗ 3), що виконують спільне завдання з моніторингу акваторії. Для повного функціонування когнітивних моделей ШІ та синхронізації цифрових двійників кожному судну в штатному режимі потрібно 40 умовних одиниць обчислювальної потужності.

Аварійний тригер (t = 15 год). На 15-й годині місії на АМТЗ 1 виникає апаратна несправність – часткова відмова системи охолодження

обчислювального блоку (наприклад, засмічення фільтра забортної охолоджуваної води). Фізичний коефіцієнт теплоутворення процесора стрімко зростає від 1,0 до 2,5 °C/од. навантаження.

Температурна динаміка процесорів описується диференціальним рівнянням теплового балансу:

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = \gamma_i(t) \cdot L_{local,i}(t) - \alpha_c \cdot (T_i(t) - T_{amb}),$$

де $T_i(t)$ – температура CPU i-го АМТЗ, $\gamma_i(t)$ – коефіцієнт тепловиділення, $L_{local,i}(t)$ – фактичне обчислювальне навантаження, що виконується локально на борту, $\alpha_c = 0{,}15$ – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище (T_{amb} = 25°C).

При нормальних умовах робоча температура процесора стабілізується на рівні 55°C. Симуляція розраховує та порівнює поведінку рою у двох варіантах архітектурного виконання (рис. 5.17).

1. Варіант (сценарій) без кооперації (ізольований межовий ШІ). Кожен агент виконує свої обчислення суворо локально (на власному борту). Після 15-ї години температура процесора АМТЗ 1 стрімко долає критичну межу T_{crit} = 75 °C і виходить на небезпечний рівень 91,6 °C. Задля запобігання фізичному виплавленню кристала бортова ОС активує апаратний троттлінг CPU. Це спричиняє експоненційне зростання обчислювальної затримки від номінальних умовних 0,05 с до 0,78 с. Через лаг обчислень цифровий двійник АМТЗ 1 втрачає синхронізацію з реальними сенсорами, ШІ починає оперувати застарілими даними, виникає критичний дисонанс, і індекс когнітивного гомеостазу АМТЗ 1 падає до катастрофічних 15,4 % (аварійний стан утримання позиції).

2. Варіант (сценарій) з когнітивним гомеостазом (антикрихкий туманний розподіл). При наближенні температури до 60 °C цифровий двійник АМТЗ 1 прогнозує теплову аварію та активує оператор реконфігурації обчислювальних потоків F_{config}. АМТЗ 1 «скидає» частину своїх завдань моделювання (що не

вимагають мілісекундної реакції реального часу) на сусідні АМТЗ 2 та АМТЗ 3. Локальне завантаження на процесор АМТЗ 1 знижується з 40 до 24 одиниць, а на АМТЗ 2 і 3 – зростає з 40 до 48 одиниць (що є абсолютно безпечним для їхнього робочого резерву). Температура АМТЗ 1 успішно утримується у безпечному діапазоні і стабілізується на рівні 65 °C.

Але тут слід урахувати комунікаційну плату – передача даних через канал зв'язку вносить невелику мережеву затримку. Це викликає незначне короткочасне зниження індексу гомеостазу АМТЗ 1, але до безпечних 88,4 %. Проте загальна когнітивна стійкість та зв'язність прийняття рішень рою повністю зберігаються на рівні 88,4 % замість колапсу до 15,4 %.

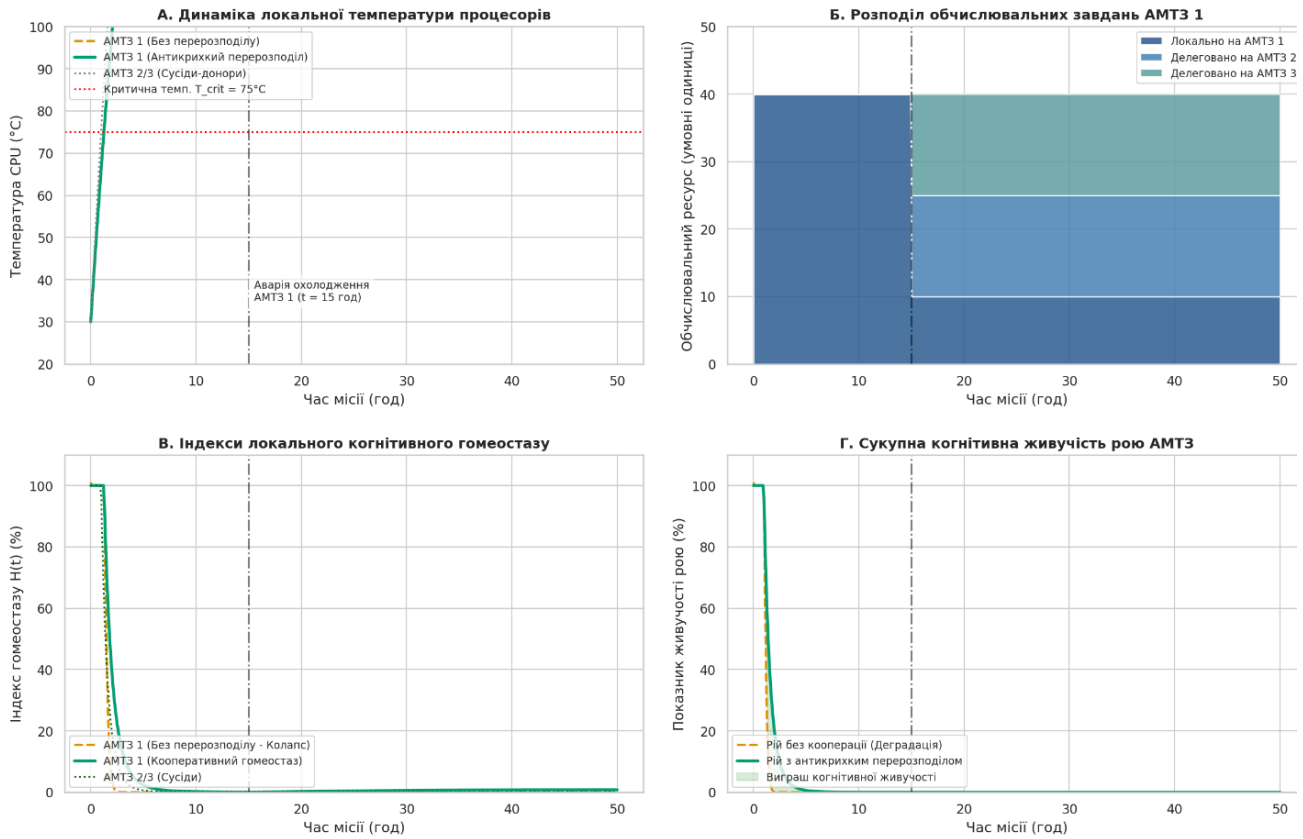


Рисунок 5.17 – Оптимізація та перерозподіл обчислювальних ресурсів у рої АМТЗ для підтримки когнітивного гомеостазу

Панель А («Динаміка локальної температури процесорів») показує, як у сценарії без кооперації температура АМТЗ 1 (пунктирна помаранчева лінія)

безконтрольно злітає вище червоної лінії критичного ліміту (75 °C). При кооперативному перерозподілі (зелена лінія) температура процесора АМТЗ 1 стабілізується на безпечних 65 °C завдяки тому, що сусіди-донори (сіра пунктирна лінія) беруть на себе тепловий удар.

Панель Б («Розподіл обчислювальних завдань АМТЗ 1») показує часовий розподіл обчислювального навантаження АМТЗ 1. У точці t = 15 годин починається плавне «стиснення» локальних обчислень (темно-синя зона) і пропорційне делегування задач на АМТЗ 2 (блакитна зона) та АМТЗ 3 (бірюзова зона).

Панель В («Індекси локального когнітивного гомеостазу») візуалізує когнітивне здоров'я систем. Без перерозподілу індекс АМТЗ 1 (пурпурна пунктирна лінія) стрімко падає до критичного нуля. За умов антикрихкої взаємодії (зелена лінія) гомеостаз АМТЗ 1 утримується на рівні 88,4 %, а сусіди-донори демонструють стабільні 96,3 %.

Панель Г («Сукупна когнітивна живучість рою АМТЗ»). Тут зелена затінена область наочно демонструє інтегральний виграш когнітивної живучості рою від впровадження багатоагентного перерозподілу обчислень. Замість повної деградації та втрати керованості одним із суден рій продовжує впевнено виконувати місію.

Наведені результати попереднього моделювання доводять, що інтелектуальна відмовостійкість рою АМТЗ може бути досягнута не за рахунок фізичного дублювання дорогого обладнання, а завдяки гнучкій інформаційній взаємодії когнітивних агентів.

5.5 Висновки до пятого розділу

У розділі розроблено теоретико-методологічні засади інтелектуального адаптивного управління та забезпечення енергоефективності морських автономних платформ в умовах невизначеності, змінних режимів функціонування та стохастичних зовнішніх збурень. Аналіз особливостей функціонування

електромеханічних комплексів МАП підтвердив, що результативність автономної місії безпосередньо залежить від якості роботи виконавчих механізмів та систем стабілізації руху. Встановлено обмежену ефективність класичних ПІД-алгоритмів при роботі з нелінійними об’єктами в умовах деградації параметрів та багатофакторної невизначеності морського середовища.

Сформовано математичну модель електромеханічної підсистеми автономного морського об'єкта, яка, на відміну від існуючих, інтегрує чинники нелінійності механічних проявів приводних комплексів, стохастичну мінливість корисного навантаження та каскадний вплив гідрометеорологічних збурень, що дозволяє адекватно прогнозувати поведінку платформи в умовах високого ступеня інформаційної невизначеності.

Дістало подальший розвиток методологічне забезпечення адаптивного оперування електромеханічними комплексами безпілотних плавзасобів на основі синтезу інтелектуального нечіткого контролера типу Мамдані. Зазначене рішення уможливлює формалізацію та трансформацію евристичних експертних правил у чіткі цифрові керуючі впливи, гарантуючи стійкість (робастність) системи до параметричних девіацій об'єкта управління.

Емпірично та аналітично доведено, що імплементація апарату теорії нечітких множин у контур регулювання супроводжується інтенсифікацією динамічних показників електромеханічної системи у перехідних та змінних експлуатаційних режимах. Це мінімізує негативні наслідки структурних коливань параметрів і демонструє суттєві переваги за критеріями якості регулювання порівняно з конвенційними лінійними алгоритмами.

Науково обґрунтовано доцільність детермінації та сумісного аналізу індексів енергоефективності (зокрема EEDI та EEOI) як референтних метрик для оцінювання ефективності автономних платформ і суден. Такий підхід забезпечує наскрізне врахування впливу функціональних режимів пропульсивних та допоміжних енергетичних установок на граничну тривалість автономного плавання та раціоналізацію використання паливно-енергетичного бюджету місії.

Встановлено, що впровадження кіберфізичних інтелектуальних систем та засобів когнітивної інформаційної підтримки формує передумови для синергетичного підвищення загальної ефективності оперування автономними суднами завдяки когерентному покращенню параметрів стійкості керування, паливної ощадливості та загальносистемної безвідмовності.

Доведено, що безпека безекіпажних платформ зі штучним інтелектом залежить від підпорядкування ресурсного менеджменту критеріям когнітивного здоров'я системи. Завдяки оцінці варіаційної вільної енергії та індексу сенсорного дисонансу антикрихкий функціонал ідентифікує внутрішні конфлікти даних (зокрема, спричинені GPS-спуфінгом або деградацією датчиків). Працездатність цього гомеостазу забезпечує гібридна туманно-межова архітектура, яка делегує обчислення всередині рою та віддає пріоритет адекватності віртуальних моделей ШІ над збереженням заданої траєкторії, запобігаючи виникненню аварійних ситуацій.

Показано, що сукупність отриманих теоретичних та прикладних результатів формує цілісну науково-методичну платформу для проєктування інтегрованих архітектур управління безпілотними морськими комплексами, забезпечуючи практичну реалізацію стратегії сталого, високоефективного та безпеко-орієнтованого судноводіння в умовах динамічно мінливого зовнішнього середовища.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [4, 6, 7, 14–16, 39–44].

РОЗДІЛ 6
СТРУКТУРНО-СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОРСЬКИХ АВТОНОМНИХ ПЛАТФОРМ

6.1 Моделювання динаміки морських автономних платформ в умовах хвильових збурень

Сучасні дослідження у сфері автономних морських технічних засобів охоплюють широкий спектр задач: від візуального спостереження до кооперативного керування та багатосенсорної інтеграції. Пріоритетним напрямом є розвиток методів виявлення суден з рухомих платформ, що є фундаментальною умовою забезпечення повної навігаційної автономії. Паралельно з цим критичне значення мають перспективні бездротові технології морського зв’язку, оскільки стабільність каналів передавання даних визначає надійність функціонування автономних систем у віддалених акваторіях [377–380].

Особлива увага приділяється безпечному плануванню траєкторій, де сучасні підходи базуються на інтеграції ситуаційних карт знань із динамічними алгоритмами прогнозування. Розвиток мультиагентних морських систем, зокрема кооперативного керування у зв’язці безпілотних літальних і надводних апаратів, свідчить про перехід до комплексного використання автономних ресурсів. Важливими складниками загальної архітектури залишаються системи багатосенсорного сприйняття навколишнього середовища, дослідження взаємодії людини та машини в умовах перехідного судноплавства, а також спеціалізовані модулі екологічного моніторингу й оперативного виявлення техногенних загроз [390–392].

Ефективне функціонування автономних морських технічних засобів значною мірою залежить від здатності підтримувати стабільні режими руху в умовах невизначеності зовнішнього середовища.

Одним із ключових факторів, що детермінують динаміку руху морських платформ, є хвильові збурення, які ініціюють коливальні процеси та суттєво знижують точність відпрацювання керуючих сигналів. Традиційні лінійні регулятори демонструють обмежену здатність забезпечувати стабільність системи за умов змінних параметрів середовища та вираженої нелінійності гідродинамічних характеристик [393].

У зв’язку з цим актуалізується потреба у розробці спрощених, проте адекватних математичних моделей морських автономних платформ, що дозволяють кількісно аналізувати вплив зовнішніх збурень та здійснювати порівняльну оцінку ефективності різних стратегій керування. Відтак, метою даного дослідження є побудова нелінійної моделі морської автономної платформи з трьома ступенями вільності (3-DOF) та верифікація ефективності робастної схеми керування в умовах інтенсивного гармонічного хвильового впливу. Такий підхід забезпечує аналітичне підґрунтя для синтезу систем управління, здатних підтримувати задану траєкторію руху при мінімізації енергетичних витрат на стабілізацію [394].

Таким чином незважаючи на активний розвиток алгоритмів сприйняття, навігації та кооперативного керування, питання робастного керування динамікою морських автономних платформ в умовах хвильових збурень залишаються актуальними та потребують подальших досліджень зокрема спрощеної нелінійної динамічної моделі морської автономної платформи з урахуванням хвильових збурень та оцінювання ефективності робастної схеми керування порівняно з класичним пропорційним регулятором [395, 396].

Для досягнення поставленої мети передбачено формалізацію 3-DOF-моделі руху платформи в площині, введення гармонічної моделі зовнішнього хвильового впливу та синтез двох варіантів керування, а також чисельне моделювання й порівняльний аналіз показників якості.

Розглянемо рух морської автономної платформи у горизонтальній площині

з трьома ступенями вільності: поздовжній рух (surge), поперечний рух (sway) та обертання навколо вертикальної осі (yaw).

Вектор швидкостей має вигляд:

$$v = [u\ v\ r]^T, \tag{6.1}$$

де u – поздовжня швидкість, v – поперечна швидкість, r – кутова швидкість рискання.

Динаміка системи описується рівнянням:

$$M\dot{v} + C(v)v + Dv = \tau + \tau_w, \tag{6.2}$$

де M – матриця інерції; $C(v)$ – матриця коріолісових та центробіжних сил; D – матриця гідродинамічного демпфування, τ – вектор керуючих впливів; τ_w – вектор зовнішніх збурень.

Для спрощеного чисельного аналізу використано діагональні форми матриць M та D, що дозволяє зосередитися на впливі хвильового збурення та структури регулятора.

Зовнішній вплив середовища моделюється гармонічною функцією:

$$\tau_w(t) = A_w \sin(\omega_w t), \tag{6.3}$$

де A_w – амплітуда хвильового навантаження; ω – частота хвилі.

Такий підхід дозволяє імітувати періодичні збурення, характерні для помірного стану моря.

Синтез системи керування

Для оцінювання впливу структури регулятора розглянуто дві схеми керування, а саме: класичне пропорційне керування

$$\tau = K_p(v_{ref} - v), \tag{6.4}$$

та робастна схема з демпфувальним зворотним зв’язком

$$\tau = K_p(v_{ref} - v) - K_d\dot{v}. \qquad (6.5)$$

Додатковий демпфувальний член забезпечує підвищену стійкість системи до періодичних збурень і зменшує амплітуду коливань.

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt, \qquad (6.6)$$

де $e(t) = v_{ref}(t) - v(t)$ – похибка відстеження швидкості; T – тривалість інтервалу моделювання. Інтегральний критерій абсолютної похибки *IAE* використовується для кількісного порівняння якості різних стратегій керування морською автономною платформою.

Якість керування оцінюється за такими показниками, як амплітуда усталених коливань, час перехідного процесу та інтегральна похибка відстеження з величиною керуючого впливу [397, 398].

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання дозволяє оцінити ефективність запропонованого підходу в умовах хвильових навантажень.

На рис. 6.1 представлено зміну поздовжньої швидкості $u(t)$ при використанні класичної та робастної схем керування, де робастний регулятор забезпечує зменшення амплітуди коливань, прискорене затухання перехідних процесів та підвищення динамічноїстійкості системи в умовах періодичного хвильового збурення.

Графік на рис. 6.2 відображає динаміку похибки відстеження $e_u(t)$ для двох стратегій керування у логарифмічному масштабі, що дозволяє оцінити швидкість збіжності процесу.

Робастна схема забезпечує суттєво швидшу збіжність похибки до нуля та зниження інтегрального критерію абсолютної похибки (*IAE*), що свідчить про підвищення точності та якості керування.

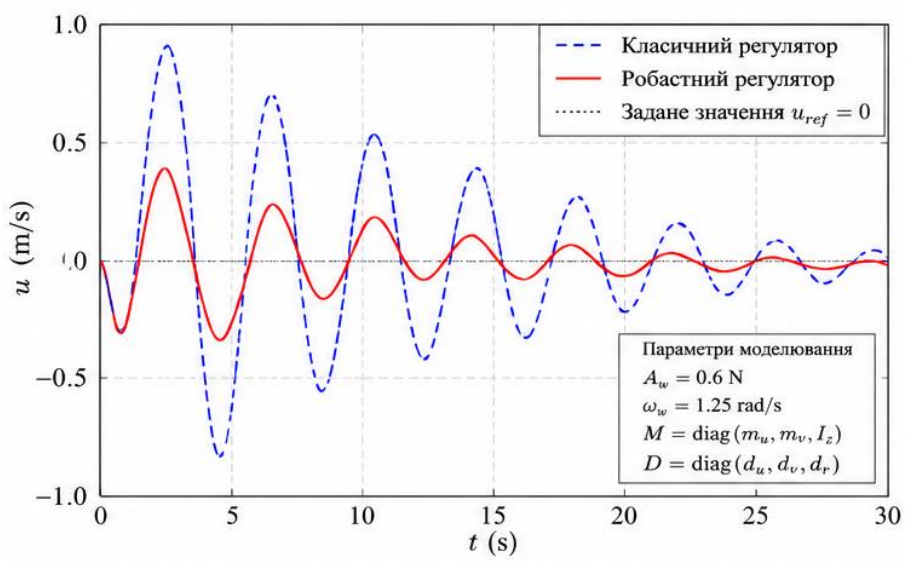


Рисунок 6.1 – Перехідні процеси поздовжньої швидкості з урахуванням стохастичних збурень

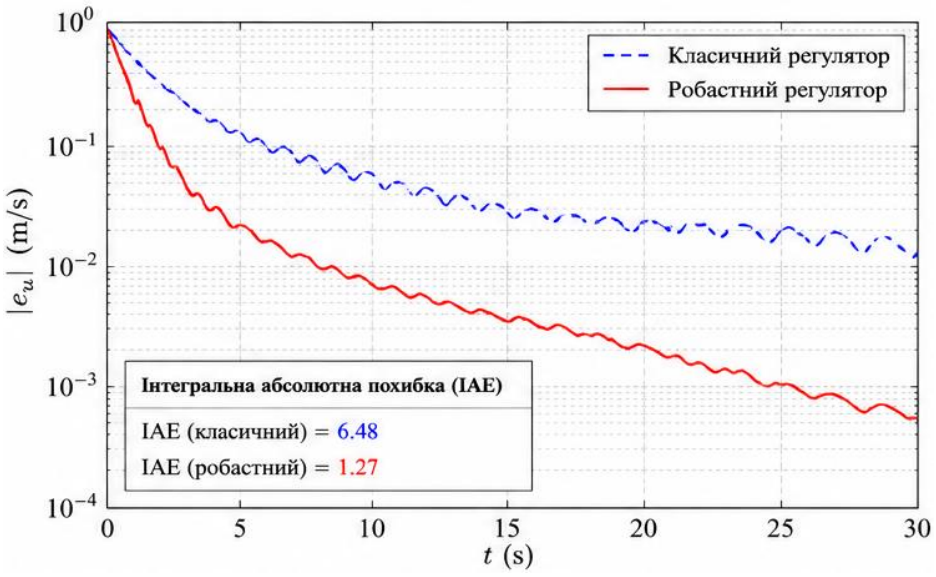


Рисунок 6.2 – Динаміка похибки відстеження швидкості

На рис. 6.3 представлено часову залежність керуючого сигналу $\tau_u(t)$ та результати оцінювання енергетичного функціоналу керування. Робастна схема формує більш згладжений керуючий вплив із меншою амплітудою коливань, що забезпечує зниження енергетичних витрат, підтверджене зменшенням значення функціоналу J_u у порівнянні з класичним регулятором.

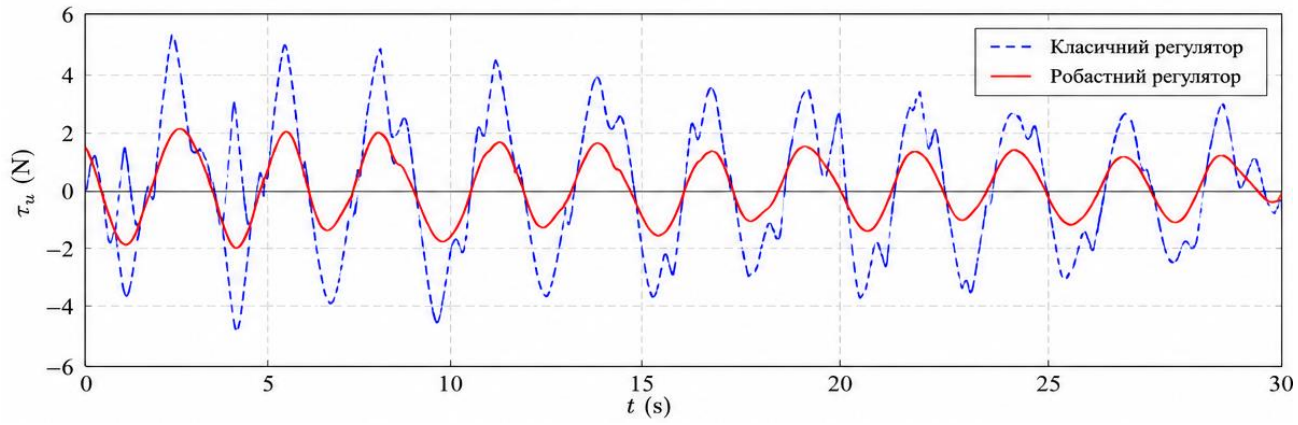


Рисунок 6.3 – Керуючий вплив та енергетична ефективність системи управління

Отримані результати чисельного моделювання підтверджують суттєвий вплив хвильових збурень на динамічні характеристики морської автономної платформи. При застосуванні класичного пропорційного регулятора спостерігаються усталені коливання швидкостей та підвищена амплітуда похибки відстеження, що зумовлено періодичним характером зовнішнього збурення [399, 400].

Для кількісного оцінювання ефективності запропонованого підходу було проведено порівняльний аналіз показників якості регулювання для класичного та робастного регуляторів. Оцінювання виконувалося за критеріями максимальної похибки, часу стабілізації, амплітуди коливань і інтегрального показника абсолютної похибки (IAE), що дозволяє комплексно характеризувати динамічні властивості системи керування в умовах хвильових збурень.

Таблиця 6.1– Порівняння показників якості регулювання

Показник	Класичний регулятор	Робастний регулятор
Максимальна похибка	e_{max}^{cl}	e_{max}^{rob}
Час стабілізації	t_s^{cl}	t_s^{rob}
Амплітуда коливань	A^{cl}	A^{rob}
IAE	IAE^{cl}	IAE^{rob}

Порівняльний аналіз показує, що використання робастного регулятора забезпечує зменшення інтегральної похибки, скорочення часу стабілізації та

зниження чутливості системи до хвильових збурень у порівнянні з класичним законом керування.

Використання робастної схеми керування з додатковим демпфувальним зворотним зв’язком забезпечує швидше затухання перехідних процесів та зменшення амплітуди коливань у сталому режимі. Це свідчить про підвищену здатність системи компенсувати періодичні хвильові навантаження. Разом із тим, покращення показників стійкості системи супроводжується незначним збільшенням початкової величини керуючого впливу. Проте загальний рівень енергетичних витрат залишається прийнятним для автономних морських технічних засобів середнього класу [401–403].

Запропонована модель, незважаючи на спрощений характер, дозволяє відобразити ключові особливості взаємодії динаміки платформи з хвильовими збуреннями та може бути використана як базис для подальшого розширення з урахуванням нелінійних гідродинамічних коефіцієнтів та адаптивних алгоритмів керування.

6.2 Інтеграція інформаційних потоків у системі експлуатаційного управління морськими автономними платформами

Зростання рівня автономності морських платформ та ускладнення їх технічної архітектури зумовлюють підвищені вимоги до інформаційного забезпечення процесів експлуатаційного управління. Функціонування морських автономних платформ відбувається в умовах асинхронного надходження даних від сенсорних, навігаційних, енергетичних і силових підсистем, що ускладнює формування узгоджених оцінок технічного стану в режимі реального часу.

Існуючі інженерні рішення здебільшого орієнтовані на локальний моніторинг параметрів і не забезпечують інтеграції багатомасштабних інформаційних потоків у єдиний інформаційний простір, придатний для аналітичної обробки та підтримки прийняття рішень. За таких умов реалізація

адаптивних алгоритмів управління, цифрових двійників і систем підтримки прийняття рішень потребує формалізації інформаційного рівня як окремого функціонального компонента системи [404].

Таким чином, дослідження, спрямоване на розробку інженерно-орієнтованих підходів до інтеграції інформаційних потоків морських автономних платформ, є актуальним для створення масштабованих, надійних та проактивних систем експлуатаційного управління.

Упродовж останніх років спостерігається інтенсивний розвиток морських автономних і напівавтономних платформ, функціонування яких відбувається в динамічних умовах із високим рівнем інформаційної та експлуатаційної невизначеності. Провідні наукові дослідження у цій галузі зосереджені на створенні інтелектуальних систем управління, а також на розробці моделей енергоефективності та адаптивного керування в автономному режимі [405, 406]. Водночас зростає увага до інформаційного забезпечення як ключового чинника підвищення надійності та стійкості автономних морських систем.

Одним із фундаментальних напрямів сучасних досліджень є інтеграція методів штучного інтелекту та стохастичного прогнозування для підвищення точності оцінки технічного стану складних інженерних систем. Застосування нейромережевих архітектур для інтелектуальної діагностики вузлів у складних експлуатаційних умовах є методологічно близьким до задач оцінювання деградації компонентів морських автономних платформ, де виникає необхідність інтеграції багатопараметричних інформаційних потоків [407].

Значну увагу приділено впровадженню імовірнісних моделей, зокрема байєсівських мереж, для аналізу ризиків та прогнозування кіберзагроз у морському автономному судноплавстві. Використання таких підходів дозволяє враховувати фактори невизначеності в системах управління, що безпосередньо корелює із завданнями інформаційного забезпечення експлуатації платформ. Паралельно розвиваються методи глибокого навчання з підкріпленням для оптимізації

енергоспоживання, що є критично важливим для формування стратегій управління ресурсами під час виконання автономних місій [408, 409].

Концепція цифрових двійників стає базовим інструментом для симуляції місій та аналізу експлуатаційних сценаріїв у реальному часі. Використання цифрових копій автономних апаратів дозволяє створити високоефективний інформаційний рівень для прогнозування поведінки системи в динамічному середовищі. Питання системної безпеки при цьому базуються на поєднанні структурних методик оцінювання ризиків із визначенням меж операційного домену, що забезпечує стійкість системи до контекстних факторів середовища [410].

Окремий пласт досліджень пов’язаний із функціонуванням автономних комплексів у сфері відновлюваної енергетики, зокрема в офшорних вітрових та водневих технологіях. Це підкреслює необхідність глибокої інтеграції технічних, енергетичних та експлуатаційних параметрів у єдину інформаційну структуру. Подальший розвиток оптимізаційних алгоритмів для планування місій та управління енергетичними установками ілюструє можливості застосування гібридних методів для мінімізації інформаційної невизначеності та підвищення надійності навігації автономних морських систем [411, 412].

Обґрунтування формалізованого підходу до інформаційного забезпечення процесу управління експлуатацією морських автономних платформ на основі інтеграції різнорідних інформаційних потоків у єдиний узгоджений інформаційний рівень, придатний для аналітичної обробки, прогнозування технічного стану та підтримки прийняття управлінських рішень у режимі реального часу, є на меті дослідження.

Загальний підхід до формування інформаційного рівня

Інформаційний рівень морської автономної платформи розглядається як проміжна ланка між фізичним рівнем функціонування системи та рівнем експлуатаційного управління. Основним завданням цього рівня є інтеграція

різнорідних інформаційних потоків, їх синхронізація та перетворення первинних сенсорних даних у структуровані оцінки технічного стану, придатні для подальшого аналізу та прийняття управлінських рішень [413].

Методологія ґрунтується на системному підході, згідно з яким інформаційні процеси морської автономної платформи описуються як сукупність взаємопов'язаних функціональних модулів, що працюють у різних часових масштабах і мають різний рівень критичності для експлуатаційної безпеки.

Класифікація та характеристики інформаційних потоків

Первинні інформаційні потоки, що формуються в морській автономній платформі, доцільно класифікувати за джерелами, часовими характеристиками та функціональним призначенням. Узагальнена класифікація наведена в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Основні типи інформаційних потоків МАП

№	Тип потоку	Джерела даних	Частота оновлення	Основне призначення
1	Навігаційний	GNSS, INS, IMU	10–100 Гц	Позиціонування та стабілізація руху
2	Енергетичний	BMS, датчики струму	0,1–1 Гц	Оцінка ресурсу та планування
3	Силовий	Двигуни, приводи	1–50 Гц	Контроль руху та маневрування
4	Середовищний	Вітер, хвиля, течії	0,1–5 Гц	Адаптація режимів
5	Діагностичний	Логи, self-test	Подієвий	Виявлення відмов

Аналіз табл. 6.2 показує, що інформаційні потоки мають суттєво різні часові масштаби та рівні впливу на експлуатаційні рішення, що унеможливлює їх пряме використання без попередньої інтеграції. Структуру інтеграції інформаційних потоків морської автономної платформи наведено на рис. 6.4.

Формалізація інтеграції інформаційних потоків

Сукупність первинних вимірювань морської автономної платформи подається у вигляді множини часових рядів:

$$Z(t) = \{z_1(t), z_2(t), \ldots, z_n(t)\}, \qquad (6.7)$$

де $z_i(t)$ – вимірюванняi-го сенсорного або обчислювального модуля.

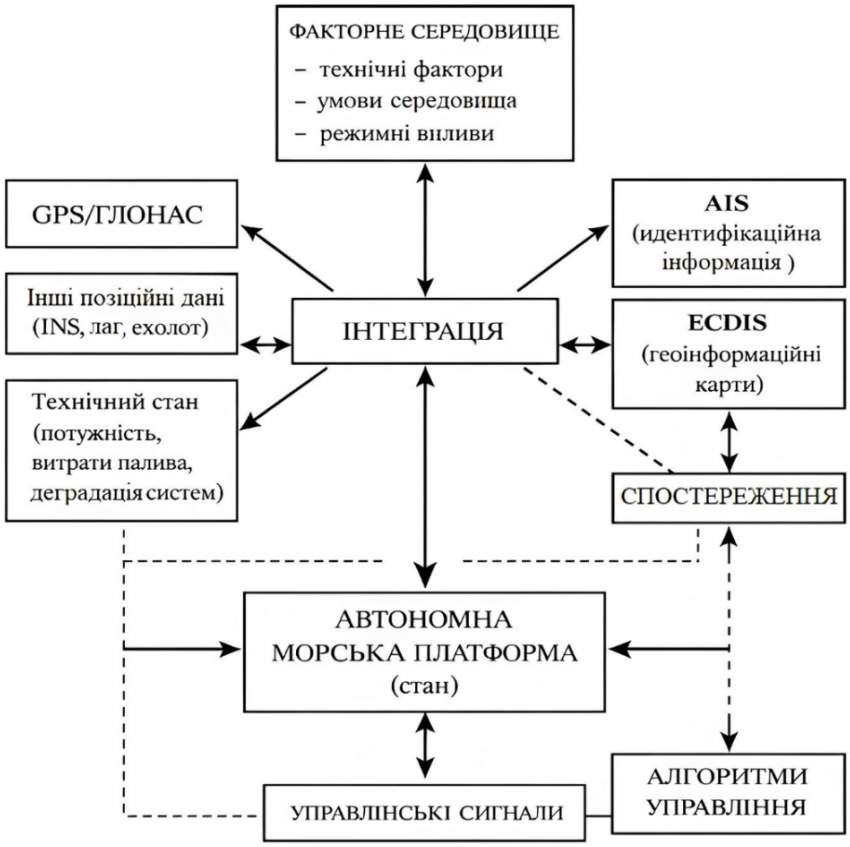


Рисунок 6.4 – Структура інтеграції інформаційних потоків морської автономної платформи

Для формування узгодженого інформаційного представлення вводиться оператор інтеграції:

$$Z(t) = A\{z_1(t), z_2(t), \ldots, z_n(t)\}, \qquad (6.8)$$

де $A(\cdot)$ враховує часову синхронізацію потоків, вагові коефіцієнти достовірності та фільтрацію шумів та пропусків даних.

Формування узагальненого інформаційного вектора стану

Результатом інтеграції інформаційних потоків є узагальнений інформаційний вектор:

$$\hat{x}(t) = F(Z(t)), \qquad (6.9)$$

де $\hat{x}(t)$ містить оцінки ключових параметрів технічного стану платформи (позиція, енергетичний резерв, навантаження, рівень деградації).

Для узагальненої оцінки якості інтеграції інформаційних потоків використовується інтегральний показник інформаційної узгодженості, який враховує повноту, достовірність та актуальність даних, що надходять від окремих джерел інформації.

$$Q_I = \sum_{i=1}^{n} w_i q_i , \qquad (6.10)$$

де q_i – оцінка якості i-го інформаційного потоку; w_i – ваговий коефіцієнт його важливості; n – кількість джерел інформації.

Збільшення значення Q_I відповідає підвищенню узгодженості та інформативності даних, що використовуються системою підтримки прийняття рішень морської автономної платформи.

Інформаційний рівень у контурі експлуатаційного управління

Сформований інформаційний вектор використовується як вхід до алгоритмів експлуатаційного управління та підтримки прийняття рішень. Таким чином, інформаційний рівень забезпечує перехід від даних до інформації та управлінських рішень (рис. 6.5).

На відміну від класичних систем моніторингу, запропонований підхід дозволяє зменшити інформаційну невизначеність, виявляти деградаційні тенденції на ранніх стадіях та створити основу для реалізації проактивних стратегій управління [414, 415].

Таким чином, запропонована методологія орієнтована на модульну інтеграцію інформаційних потоків і може бути масштабована для платформ різного класу. Подальший розвиток передбачає інтеграцію інформаційного рівня з аналітичними моделями оцінки ефективності та цифровими двійниками морських автономних платформ [416, 417].

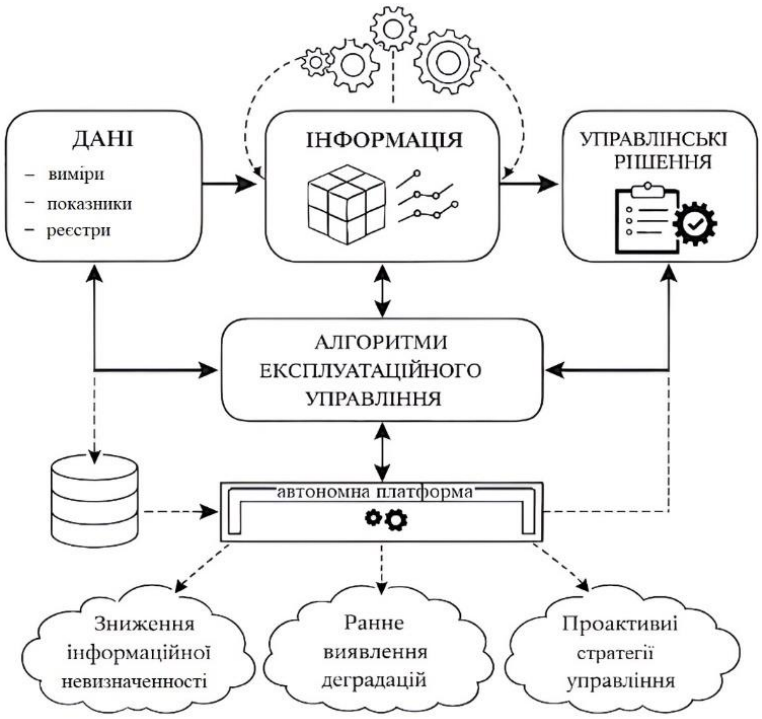


Рисунок 6.5 – Інформаційна модель узгодження багатомасштабних часових потоків в контурі експлуатаційного управління

У результаті застосування запропонованої методології інтеграції інформаційних потоків було сформовано узагальнений інформаційний вектор стану морської автономної платформи, що відображає поточні та трендові характеристики її функціонування. Інтеграція навігаційних, енергетичних, силових і даних середовища в єдиному інформаційному просторі дозволила суттєво зменшити асинхронність вимірювань та підвищити узгодженість оцінок технічного стану.

У результаті застосування запропонованої методології інтеграції інформаційних потоків було сформовано узагальнений інформаційний вектор стану морської автономної платформи, що відображає поточні та трендові характеристики її функціонування. Інтеграція навігаційних, енергетичних, силових і даних середовища в єдиному інформаційному просторі дозволила суттєво зменшити асинхронність вимірювань та підвищити узгодженість оцінок технічного стану. Так, на відміну від класичного підходу, за якого кожен параметр аналізується окремо, запропонований інформаційний рівень забезпечує комплексне представлення стану платформи у вигляді вектору

$$\hat{x}(t) = [\hat{z}_1(t), \hat{z}_2(t), \ldots, \hat{z}_k(t)], \qquad (6.10)$$

що дозволяє використовувати його безпосередньо в алгоритмах експлуатаційного управління.

Порівняння з класичними системами моніторингу

Для оцінки ефективності запропонованого підходу проведено порівняння з традиційною системою порогового моніторингу (табл. 6.3). Критеріями порівняння обрано час виявлення деградаційних тенденцій, стабільність оцінок стану та інформативність для управлінських рішень.

Таблиця 6.3 – Порівняння результатів моніторингу

Критерій	Класичний моніторинг	Запропонований підхід
Тип оцінки	Локальна, параметрична	Інтегральна, системна
Час виявлення деградації	Після перевищення порогу	На ранній стадії
Стійкість до шумів	Низька	Підвищена
Придатність до прогнозування	Відсутня	Забезпечується
Підтримка управлінських рішень	Обмежена	Висока

Отримані результати свідчать, що інтеграція інформаційних потоків дозволяє перейти від фіксації критичних подій до аналізу тенденцій, що є принципово важливим для автономних платформ.

Аналіз часових масштабів інформаційних потоків

У процесі дослідження встановлено, що найбільший внесок у зниження інформаційної невизначеності забезпечує узгодження потоків різних часових масштабів (рис. 6.6).

З цією метою інформаційні дані були згруповані у швидкі, середні та повільні контури обробки. Формально це може бути подано у вигляді:

$$Z(t) = Z_f(t) \cup Z_m(t) \cup Z_s(t), \qquad (6.11)$$

де $Z_f(t)$ – швидкі інформаційні потоки (сенсори високої частоти), $Z_m(t)$ – потоки середньої швидкості, $Z_s(t)$ – повільні потоки (наприклад, діагностичні, логічні сигнали тощо).

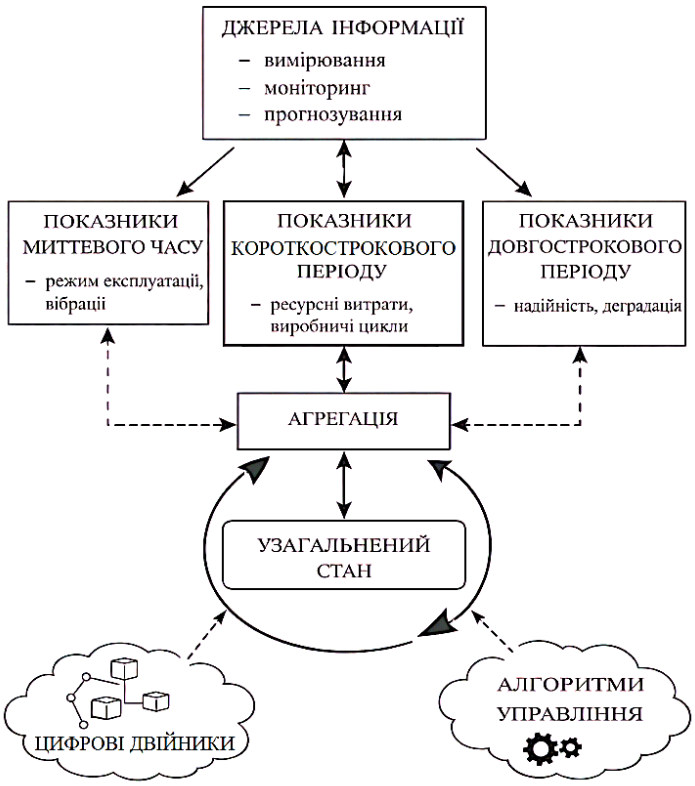


Рисунок 6.6 – Узгодження інформаційних потоків різних часових масштабів

Вплив інтеграції інформації на якість управлінських рішень

Використання узагальненого інформаційного вектору дозволило підвищити стабільність оцінок технічного стану та зменшити кількість хибних спрацьовувань, характерних для порогових систем. Зокрема, при моделюванні деградаційних процесів енергетичного та силового модулів було встановлено, що інформаційний рівень дозволяє виявляти зниження працездатності на 20 % раніше порівняно з класичним підходом. Це створює передумови для адаптації режимів експлуатації до моменту досягнення критичних значень параметрів і, відповідно, для продовження ресурсу морської автономної платформи [418, 419].

Отримані результати підтверджують, що інтеграція інформаційних потоків у рамках формалізованого інформаційного рівня забезпечує якісно новий рівень експлуатаційного управління морськими автономними платформами. Запропонований підхід дозволяє перейти від фрагментованого моніторингу до системної оцінки технічного стану та створює основу для подальшої реалізації аналітичних моделей і цифрових двійників.

6.3 Сценарно-орієнтоване моделювання ризиків автономних морських платформ на основі dynamic DEMATEL framework

Автономні морські системи представляють собою новий клас кіберфізичних об'єктів, в яких датчики, засоби зв'язку, обчислення і виконавчі механізми інтегровані в єдиний контур управління в режимі реального часу. На відміну від традиційних морських платформ, автономні рішення характеризуються високим рівнем цифровізації, зниженням ролі людини-оператора і підвищенням автоматизації процесу прийняття рішень. Це докорінно змінює структуру ризиків: небезпеки виникають не тільки в результаті окремих відмов компонентів, але і в результаті взаємодії технічних, програмних, інформаційних, організаційних та екологічних факторів [420].

Метод DEMATEL широко використовується для моделювання причинно-наслідкових зв'язків та виявлення рушійних факторів у складних системах. Сучасні дослідження морських автономних систем демонструють швидкий розвиток алгоритмів прийняття рішень, навігаційного моделювання та безпечного запобігання зіткнень. Оцінка ризиків на морському транспорті вже спирається на цілий спектр методів, від класичних статистичних моделей до складних мережевих підходів. Огляд показує, що причинно-наслідкові зв'язки між факторами ризику стають центральним об'єктом аналізу, особливо в контексті складних операційних сценаріїв. Для морського сегмента це знайшло відображення в дослідженнях, що моделюють еволюцію ризику зіткнень між

суднами та аналізують топологію ланцюгів аварій на основі складних мереж та підходу DEMATEL, що оцінюють зміни технічного стану суден при експлуатаційних навантаженнях та перевезенні негабаритних вантажів , а також у більш широкому контексті управління безпекою на морі, включаючи сучасні тенденції, ризики та стратегії пом'якшення наслідків [420–422].

Методологія DEMATEL та її варіації (*Grey*, *Fuzzy*, *Hybrid*) сьогодні є фундаментальним інструментом аналізу причинно-наслідкових зв’язків у складних промислових системах. Практичне застосування цих підходів охоплює моделювання мереж якості в атомній енергетиці, ідентифікацію ризиків при видобутку сланцевого газу на основі інтеграції STPA та FTA, а також оцінювання взаємозалежностей у стійких ланцюгах постачання та логістиці, орієнтованій на ESG-критерії. Комбінації DEMATEL із байєсівськими мережами (BN) та аналітичними ієрархічними процесами (ANP) дозволяють інтегрувати структурні моделі з імовірнісними методами для комплексної оцінки високошвидкісних залізниць та складних інституційних систем. Еволюція методології також простежується у поєднанні з системною динамікою для прогнозування вартості проєктів, методами ентропії для оцінки якості та алгоритмами TOPSIS для аналізу критичності обладнання [423, 424].

Незважаючи на потужну базу в статичних та квазістатичних умовах, перехід до автономних морських систем вносить динамічний, сценарно-залежний аспект ризику. Сучасні дослідження в цій галузі фокусуються на гібридних системах зв’язку, кібербезпеці морського транспорту та моделях прийняття рішень щодо запобігання зіткненням, що імітують когнітивні процеси людини. Активно впроваджуються алгоритми ієрархічного навчання з підкріпленням (DRL), методи на основі PPO та трансформаторів для координації декількох суден, а також сценарно-орієнтовані структури для тестування навігаційної безпеки у складних акваторіях [425].

Допоміжні компоненти управління включають високоточне нейромережеве прогнозування руху, моделювання динаміки довіри в системах «людина - автономне судно» та побудову графів знань про інциденти з використанням BERT-подібних моделей. Проте, попри детальну описаність еволюції рішень під впливом змінних сценаріїв, у сучасній літературі спостерігається прогалина щодо явної формалізації еволюції причинно-наслідкових зв'язків ризиків за допомогою операторів, аналогічних DEMATEL, у динамічному часовому вимірі. Це підкреслює необхідність розробки динамічних моделей, здатних адаптувати структурні зв’язки між факторами ризику до мінливих умов експлуатації морських автономних платформ [426].

Саме тут актуалізується необхідність розробки динамічної сценарно-орієнтованої платформи на базі методології DEMATEL. З одного боку, існуючі модифікації DEMATEL в інших галузях демонструють успішні приклади конвергенції причинно-наслідкових графів з імовірнісними мережами, моделями життєвого циклу та стратегіями управління. З іншого боку, у морському секторі накопичено значний досвід комплексного аналізу ризиків зіткнень, моделювання деградації технічного стану суден під впливом експлуатаційних чинників, оцінювання режимів роботи флоту та енергетичної ефективності альтернативних видів палива [427, 428].

Додатковим детермінантом динамічності системи є інформаційно-комунікаційні підсистеми автономних платформ, які, з огляду на специфіку кібербезпеки та гібридних каналів зв’язку, самі стають джерелами змінного ризику. Проте на перетині вдосконаленої методології DEMATEL та динамічної безпеки автономних суден досі відсутній уніфікований підхід, здатний формалізувати еволюцію матриць впливу факторів при переходах між експлуатаційними режимами (нормальним, погіршеним та аварійним). Зокрема, науковий пошук потребує чіткої математичної моделі оператора, що описує трансформацію топології мережі ризиків у часовому вимірі, забезпечуючи адаптивність системи управління до мінливих умов автономної місії [429].

Незважаючи на великі дослідження автономної навігації та інтелектуального управління, більшість досліджень стосуються алгоритмів прийняття рішень або окремих компонентів безпеки, а не еволюції структур ризику на системному рівні. Зокрема, існуючі програми DEMATEL зазвичай використовують статичну причинно-наслідкову топологію, де загальна матриця впливу будується для одного операційного контексту і розглядається як інваріантна.

Для морських автономних систем це припущення є обмежувальним, оскільки переходи між режимами (нормальний – деградація – відмова) можуть змінювати не тільки інтенсивність факторів, але і конфігурацію причинно-наслідкових залежностей, що призводить до недооцінки наслідків посилення ризику під час переходів за сценарієм [430, 431].

На відміну від класичного методу DEMATEL, який використовує статичну матрицю причинно-наслідкових зв’язків, запропонований підхід враховує часову зміну інтенсивності впливів між факторами ризику. Це дозволяє відображати динаміку розвитку експлуатаційної ситуації та адаптувати результати аналізу до змін зовнішнього середовища, технічного стану платформи та параметрів виконуваної місії.

Тому актуальним є розроблення динамічного сценарно-орієнтованого підходу DEMATEL для моделювання еволюції причинно-наслідкової топології ризиків в автономних морських системах залежно від режиму експлуатації.

Формальна постановка завдання

Автономна морська система розглядається як сукупність взаємозв'язаних факторів ризику, причинно-наслідкові зв'язки між якими залежать від режиму експлуатації. На відміну від класичного підходу, який передбачає, що причинно-наслідкова структура є постійною, ця робота передбачає, що топологія ризику змінюється залежно від операційного сценарію.

Припустимо наступне: набір факторів ризику $F = \{f_1, f_2, ..., f_n\}$, кілька операційних сценаріїв $S = \{S_1, S_2, S_3\}$, де S_1 – нормальний режим, S_2 – режим деградації, S_3 – аварійний режим.

Для кожного сценарію S_k визначається матриця прямих впливів $A^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}]$, $a_{ij}^{(k)} \in [0,4]$, $a_{ii}^{(k)} = 0$. Мета полягає в побудові залежних від сценарію матриць сумарних впливів $T^{(k)}$, а також визначення показників, що дозволяють оцінювати зміни причинно-наслідкової ролі факторів між сценаріями, кількісно описувати структурну перебудову топології ризиків і виявляти стратегічно важливі фактори з урахуванням нестабільності режиму.

Таким чином, завдання формулюється наступним чином: завдання $\{A^{(k)}\}_{k=1}^{3}$, обчислення $T^{(k)}, SI_i, DCI_i, \Delta T^{(k \to l)}$ для аналізу еволюції причинно-наслідкової структури.

Сценарій залежності матриці від прямих впливів

Для кожного операційного сценарію визначається матриця прямих впливів:

$$A^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}],\ k \in \{1,2,3\}, \tag{6.12}$$

де $k = 1$ – нормальний режим, $k = 2$ – режим деградації, $k = 3$ – аварійний режим

$$a_{ij}^{(k)} \in [0,4],\ a_{ii}^{(k)} = 0, \tag{6.13}$$

Сценарій матриці сумарних співвідношень

Для кожного сценарію:

$$s^{(k)} = \max \sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{(k)}, \tag{6.14}$$

$$X^{(k)} = \frac{A^{(k)}}{s^{(k)}}, \tag{6.15}$$

$$T^{(k)} = X^{(k)}(I - X^{(k)})^{-1}. \tag{6.16}$$

Динамічні причинно-наслідкові показники

$$D_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{n} t_{ij}^{(k)}, \tag{6.17}$$

$$R_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{n} t_{ji}^{(k)}, \tag{6.18}$$

$$Rel_i^{(k)} = D_i^{(k)} - R_i^{(k)}, \tag{6.19}$$

$$Prom_i^{(k)} = D_i^{(k)} + R_i^{(k)}, \tag{6.20}$$

Оператор перетворення сценарію

Для кількісного опису змін у причинно-наслідковій структурі між сценаріями введено оператор перетворення сценарію

$$\Delta T^{(k \to l)} = T^{(l)} - T^{(k)}, \tag{6.21}$$

де $k, l \in \{1, 2, 3\}$, $k \neq l$, $T(k)$ – матриця загального відношення для сценарію *k*.

Елемент $\Delta t_{ij}^{(k \to l)}$ відображає зміну впливу фактора *i* на фактор *j* при переході між режимами.

Для агрегованої оцінки трансформації вводимо матричну норму:

$$\left\| \Delta T^{(k \to l)} \right\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (\Delta t_{ij}^{(k \to l)})^2}. \tag{6.22}$$

Цей показник характеризує інтенсивність структурної перебудови системи ризиків.

Індекс сценарної нестабільності

Для кожного фактора визначається індекс сценарної нестабільності:

$$SI_i = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}(Rel_i^{(k)} - \overline{Rel_i})^2}\,, \tag{6.23}$$

де

$$\overline{Rel_i} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} Rel_i^{(k)}\,. \tag{6.24}$$

Таким чином, m = 3 – кількість сценаріїв, SI_i – чутливість фактора i до режиму роботи. Чим більше значення SI_i, тим менш стабільна роль фактора в різних режимах роботи.

Індекс динамічної критичності

Інтегральна оцінка важливості фактора з урахуванням його нестабільності визначається як:

$$DCI_i = Prom_i \cdot (1 + SI_i)\,, \tag{6.25}$$

де

$$Prom_i = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} Prom_i^{(k)}\,, \tag{6.26}$$

Таким чином, високі значення $Prom_i$ указывают вказують на системну значимість фактора; високі значення SI_i указывают вказують на його чутливість до змін режимів роботи; високі значення DCI_i характеризують фактор як стратегічно важливий.

Практичне використання отриманих показників дозволяє ранжувати фактори ризику за ступенем їх впливу на ефективність місії та формувати пріоритети для систем підтримки прийняття рішень морської автономної платформи.

Алгоритм 1: *Процедура дематеріалізації на основі динамічного сценарію*

Input:

Набір факторів ризику $F = \{f_1, f_2, ..., f_n\}$

Набір сценаріїв $S = \{S_1, S_2, S_3\}$

Матриці прямої залежності $A(k)$, оцінені експертами

Output:

Матриці загального відношення, що залежать від сценарію $T(k)$

Індекс нестабільності сценарію SI_i

Індекс динамічної критичності DCI_i

Матриці перетворення сценарію $\Delta T(k \to l)$

Крок 1: для кожного сценарію $k \in S$

1.1 Обчисліть коефіцієнт нормалізації:

$s(k) = \max\_i \in \_i a\_ij(k)$

1.2. Нормалізувати матрицю прямої залежності:

$X(k) = A(k) / s(k)$

1.3. Обчислити матрицю загального відношення:

$T(k) = X(k) (I - X(k))^{(-1)}$

Крок 2: длякожногокоефіцієнтаi

2.1. Обчисліть $D\_i(k)$ та$R_i(k)$

2.2. Обчислити $Prom\_i(k) = D\_i(k) + R\_i(k)$

2.3. Обчислити $Rel\_i(k) = D\_i(K) - R\_i(k)$

Крок 3: обчислюємо Індекс нестабільності сценарію:

SI_i = стандартне відхилення $Rel\_i(k)$

Крок 4: обчислюємо динамічний Індекс критичності:

DCI_i = середнєзначення $(Prom\_i(k)) \times (1 + SI\_i)$

Крок 5: для кожної пари (k, l)

Обчислюємо матрицю перетворення:

$\Delta T(k \rightarrow l) = T(l) - T(k)$

Поревіряємо всі обчислені показники.

Концептуальна архітектура динамічної платформи

Запропонований динамічний підхід до сценаріїв DEMATEL реалізований у вигляді багаторівневої аналітичної архітектури, яка поєднує експертну оцінку, матричні перетворення та аналіз сценаріїв. На першому рівні формується набір факторів ризику і визначаються сценарії функціонування системи. На другому рівні для кожного сценарію будуються матриці прямих впливів, які проходять процедуру нормалізації і перетворюються в матриці сумарних впливів. Третій рівень включає в себе розрахунок причинних індикаторів, індикаторів нестабільності і динамічних індикаторів критичності. Заключний етап вимагає оцінки сценарію за допомогою оператора перетворення, який визначає структурні зміни в топології ризиків. Концептуальна основа поєднує статичний причинно-наслідковий аналіз з динамічним моделюванням сценаріїв для створення цілісної системи оцінки ризиків [432, 433].

На рис. 6.7 представлена концептуальна архітектура платформи DEMATEL, заснованої на динамічних сценаріях.

Структура складається з:

− вхідного рівня (фактори ризику та операційні сценарії) LEVEL 1 – INPUT LAYER;

− рівня моделювання конкретних сценаріїв LEVEL 2 – SCENARIO-SPECIFIC MODELING;

− рівня обчислення причинно-наслідкових показників LEVEL 3 – CAUSAL METRICS;

− рівня динамічного аналізу трансформації LEVEL 4 – DYNAMIC ANALYSIS;

– рівня виходу для підтримки прийняття рішень LEVEL 5 – DECISION SUPPORT OUTPUT.

Дана структура інтегрує статичне відображення впливу з динамічним моделюванням, що залежить від режиму.

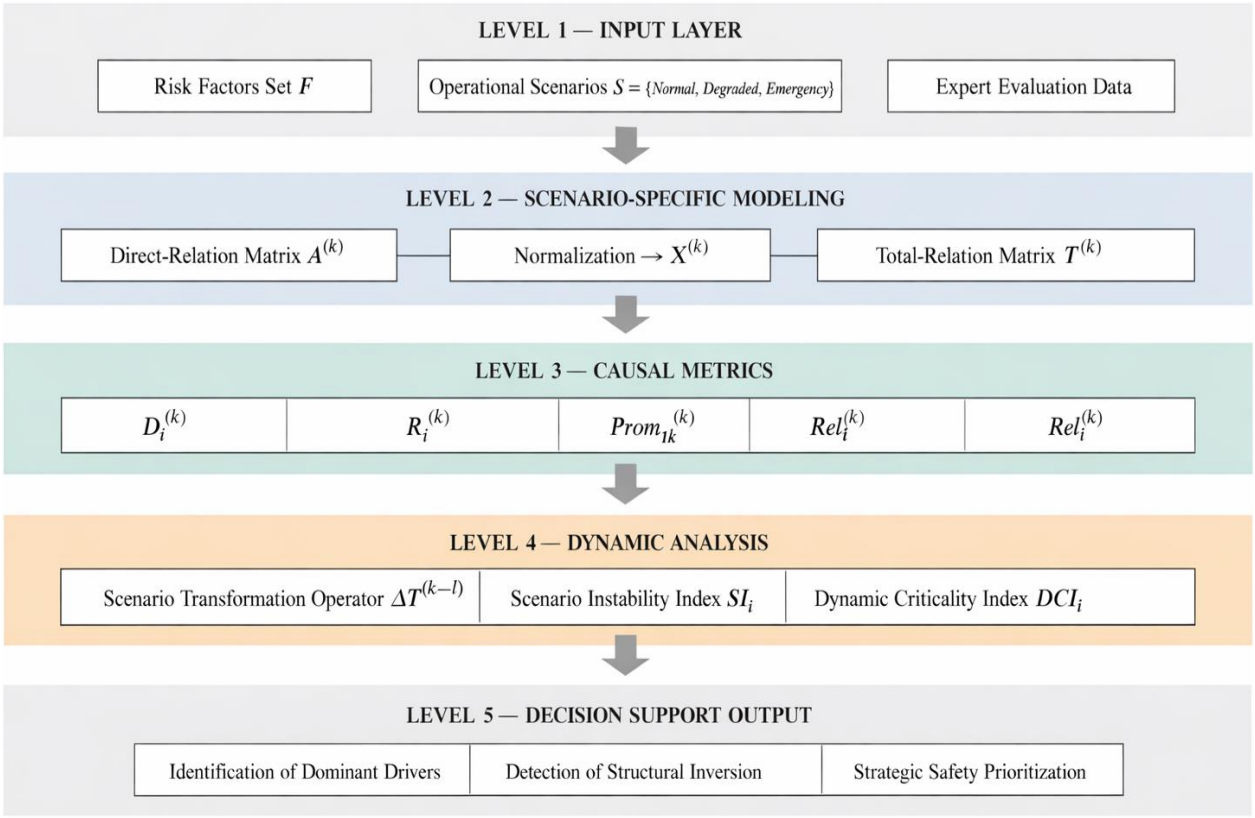


Рисунок 6.7 – Концептуальна архітектура платформи DEMATEL, яка заснована на динамічних сценаріях, для моделювання топології ризику, що змінюється в часі, в автономних морських системах

Ілюстрація перетворення топології ризиків

Для наочного уявлення сценарної еволюції причинно-наслідкової структури ризиків пропонується графічна інтерпретація матриць сумарних впливів $T^{(k)}$ у вигляді орієнтованих зважених графів.

Кожному фактору ризику відповідає вершина графіка, а елемент $t_{ij}^{(k)}$ визначає вагу дуги від фактора f_i до фактора f_j в сценарії S_k. Таким чином, топологія ризиків в кожному режимі роботи визначається наступним чином:

$G^{(k)} = (F, E^{(k)}, W^{(k)})$, де F – набір факторів ризику, $E^{(k)}$ – спрямовані ребра, $T^{(k)}$ $W^{(k)} = \{t_{ij}^{(k)}\}$ – ваги ребер.

Перехід між режимами моделюється як перетворення оператора $G^{(k)} \to G^{(l)}$, що відповідає різниці в матриці $\Delta T^{(k \to l)} = T^{(l)} - T^{(k)}$.

Візуалізація на рис. 6.8 дозволяє ідентифікувати зміни в основних рушійних силах, появу нових домінуючих зв'язків і посилення або ослаблення причинно-наслідкових зв'язків між режимами роботи. Для забезпечення інтерпретованості положення вузлів зберігаються у всіх сценаріях, що дозволяє проводити пряме візуальне порівняння структурних змін.

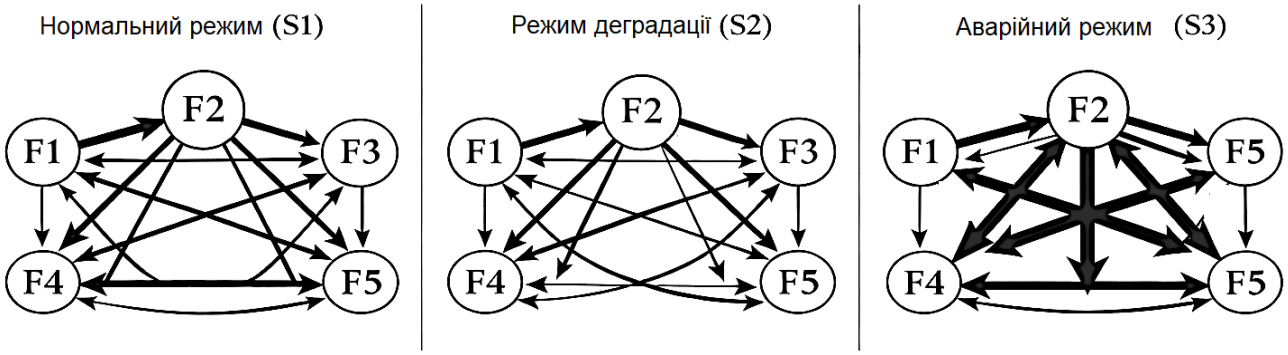


Рисунок 6.8– Сценарій,залежний від перетворення топології ризиків, яке отримане на основі матриць загального відношення DEMATEL

Порівняльння проявів мережі для нормального режиму (S1), режиму деградації (S2) і аварійного режиму (S3) роботи представлені на рис. 6.8. Розмір вузла пропорційний значенню фактора (D_i + R_i), тоді як товщина спрямованого ребра відображає величину впливу t_{ij} в матриці загального відношення. Просторові положення вузлів фіксуються в різних сценаріях для забезпечення структурної порівнянності.

Візуалізація на рис. 6.8 дозволяє виявити зміни в основних рушійних силах, поява нових домінуючих зв'язків і ослаблення або посилення причинно-наслідкових зв'язків між режимами.

Теоретичні висновки та методологічне позиціонування

Запропонований динамічний підхід, орієнтований на сценарії, переосмислює метод DEMATEL не лише як інструмент для побудови статичної причинно-наслідкової карти, але і як операційну модель, здатну відображати залежну від режиму трансформацію топології ризику. У класичному формулюванні DEMATEL матриця сумарних впливів T розглядається як інваріантна характеристика системи. В рамках запропонованого підходу вона приймає форму набору сценарно-залежних операторів $T^{(k)}$, кожен з яких відповідає окремому робочому стану системи.

Таким чином, топологія ризиків інтерпретується як структура, що залежить від стану, а не як фіксована причинно-наслідкова конфігурація. Це дозволяє інтерпретувати систему ризиків морської автономної платформи як набір взаємозв'язаних структур, між якими існують переходи між операторами $T^{(k)} \to T^{(l)}$. Введення матриці перетворення $\Delta T^{(k \to l)}$ перетворює DEMATEL з статичного аналітичного інструменту в динамічний механізм аналізу структурних змін.

У цьому контексті топологію ризиків можна розглядати як елемент простору структур, де норма $\left\| \Delta T^{(k \to l)} \right\|_F$ служить мірою структурної відстані між режимами.

Порівняння зі статичним DEMATEL

Класичний DEMATEL дозволяє ідентифікувати рушійні і залежні фактори в рамках єдиного операційного контексту. Однак він не враховує можливу інверсію причинно-наслідкового зв'язку при зміні режиму роботи системи.

При статичному підході використовується єдина матриця T, причинно-наслідкові зв'язки визначаються один раз, а структурна стабільність не аналізується. У пропонованій динамічній постановці, набір матриць утворюється $\{T^{(k)}\}$, вводиться індекс нестабільності SI_i, інтегральний показник динамічної критичності DCI_i і структурних перетворень оцінюється через $\Delta T^{(k \to l)}$. Таким чином, метод переходить від аналізу «структури» до аналізу «еволюції структури», що принципово важливо для автономних кіберфізичних систем.

Структурна інверсія та нестабільність сценарію

Отримані результати демонструють феномен структурної інверсії причинної ролі факторів. Фактори, які є домінуючими рушійними силами в нормальних умовах, можуть втратити свою роль у режимі деградації або аварійному сценарії. Водночас фактори, які в нормальних умовах є залежними, в умовах кризи можуть стати стратегічно важливими.

Індекс нестабільності SI_i дозволяє кількісно оцінити чутливість ролі фактора до режиму роботи. Високі значення SI_i вказують на потенційну роль фактора як тригера для переходу між режимами.

Інтегральний показник $DCI_i = \overline{Prom_i}(1 + SI_i)$ об'єднує структурну вагу фактора з мінливістю його режиму, формуючи більш адекватну оцінку стратегічної важливості.

Практичне значення для автономних морських систем

Запропонований підхід має практичне значення для автономних морських систем. При проєктуванні платформи необхідно враховувати фактории DCI_i, що мають велике значення для забезпечення резервування, дублювання критично важливих компонентів і пріоритизації надійності. Це забезпечує стратегічну стійкість системи.

В управлінні безпекою, фактори з високим SI_i і вимагають адаптивного контролю, так як їх значення змінюється в залежності від режиму. З точки зору нормативного регулювання, високі значення $\left\|\Delta T^{(k\to l)}\right\|_F$ свідчать про чутливість системи до переходу в стан збою. Нарешті, фактори, що залежать від сценарію, можуть бути інтегровані в модулі підтримки прийняття рішень та управління ризиком для підвищення адаптивності алгоритмів.

Незважаючи на отримані результати, пропонований підхід має ряд методологічних обмежень. По-перше, це залежить від експертного формування матриць $A^{(k)}$, що може призвести до суб'єктивності в оцінці причинно-наслідкових зв'язків. По-друге, режимна структура системи дискретизована

тільки за трьома сценаріями, що спрощує реальну багатовимірну динаміку функціонування. Крім того, в моделі відсутній механізм оновлення матриць в режимі реального часу, і впливи в рамках формалізму DEMATEL вважаються лінійними. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію цього підходу з імовірнісним або нечітким DEMATEL, розширення моделі до простору безперервного режиму і об'єднання її з адаптивними методами оцінки ризиків, заснованими на навчанні з підкріпленням.

Для демонстрації можливості застосування запропонованої структури, побудований синтезований приклад з п'ятьма факторами ризику: F1 – цифрова автономність, F2 – надійність датчиків, F3 – стабільність зв'язку, F4 – здатність реагувати на надзвичайні ситуації, F5 – стійкість енергосистеми, де розглядаються три сценарії роботи: S1 – нормальний режим, S2 – режим деградації, S3 – аварійний режим.

Матриці прямої залежності

Приклад (S1 – нормальний):

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (6.27)$$

Матриці $A^{(2)}$ і $A^{(3)}$ побудовані з урахуванням підвищеного впливу факторів, пов'язаних з надзвичайною ситуацією в S3. Після нормалізації і обчислення матриць сумарних співвідношень в S1 спостерігаються наступні тенденції: F1 має найбільше значення, в S3 домінуючим фактором стає F4. Індекс нестабільності SI_i є найвищим для F4 і F3. Ці результати підтверджують явище структурної інверсії та демонструють залежні від режиму зміни домінування.

Для оцінки надійності структури був проведений аналіз чутливості по збурюючим елементам $A^{(k)}$ в межах ±10 %. Аналіз показує, що значення основних показників залишаються стабільними при невеликих збуреннях. Фактори з високим SI_i демонструють більш високу чутливість до структурних зрушень. Норма Фробеніуса $\left\|\Delta T^{(k\to l)}\right\|_F$ залишається незмінною при ранжируванні ступеня тяжкості переходів. Це підтверджує чисельну стабільність запропонованого динамічного розширення.

Порівняння з класичним DEMATEL

Для уточнення методологічного внеску запропонованого підходу в табл. 6.4 наведені ключові відмінності між класичною статичною системою DEMATEL та запропонованою динамічною структурою на основі сценаріїв.

Таблиця 6.4 – Порівняння між класичною DEMATEL та запропонованою динамічноюструктурою на основі сценаріїв

Аналітична функція	Класична DEMATEL	Запропонована динамічна структура
Представлення причинно-наслідкової топології	Одинарна інваріантна матриця повних відносин T	Сценарій залежних матриць$\{T^{(k)}\}$
Диференціація режиму роботи	Не розглядається	Явне моделювання нормального та аварійного режимів, режиму деградації
Аналіз структурної трансформації	Недоступно	Оператор трансформації $\Delta T^{(k\to l)}$
Кількісна оцінка чутливості режиму	Недоступно	Індекс нестабільності сценаріюSI_i
Інтегрований показник критичності з урахуванням режиму	Недоступно	Динамічний індекс критичності DCI_i
Виявлення інверсії причинно-наслідкової ролі	Неявна та статична	Явно кількісно виражена в різних сценаріях

Як показано в табл.6.4, класичний метод DEMATEL забезпечує статичне представлення структури впливу на основі єдиної матриці загального відношення. Хоча він ефективний для визначення домінуючих факторів у фіксованому контексті, він не враховує структурні перетворення, які відбуваються при переході системи від одного режиму роботи до іншого.

На відміну від цього, пропонована структура вводить сценарно-залежне моделювання, що дозволяє проводити формальний аналіз еволюції топології. Включення оператора перетворення $\Delta T^{(k\to l)}$ дозволяє безпосередньо кількісно оцінити структурні зрушення, тоді як індекс нестабільності SI_i та індекс динамічної критичності DCI_i забезпечують оцінку важливості факторів з урахуванням режиму.

Таким чином, запропонований підхід перетворює DEMATEL з інструменту відображення статичного впливу на платформу динамічного структурного аналізу, придатну для складних кіберфізичних систем, що працюють у декількох режимах.

Обчислювальна складність запропонованої структури в першу чергу визначається матричною інверсією при обчисленні матриць загального відношення $T^{(k)} = X^{(k)}(\mathrm{I}-X^{(k)})^{-1}$. Для інверсії матриці потрібно $O(n^3)$ операцій для кожного сценарію.Таким чином, для m сценаріїв загальна складність дорівнює $O(\mathrm{m}\cdot n^3)$.

Оскільки кількість сценаріїв, як правило, невелика і фіксована, масштабованість в першу чергу визначається кількістю факторів ризику. Структура залишається обчислювально прийнятною для систем середнього масштабу ($n \le 50$), що характерно для експертного моделювання ризиків.

Основні наукові результати цієї статті можна узагальнити наступним чином:

– розроблено формалізм залежних від сценарію матриць прямого і сумарного відношення для нормального, погіршеного і аварійного режимів роботи;

– введений оператор перетворення сценарію для кількісної характеристики структурних змін у причинно-наслідкових зв'язках між режимами роботи;

– запропоновано індекс нестабільності сценарію для вимірювання чутливості режиму до окремих факторів ризику;

– розроблений динамічний індекс критичності для об'єднання структурної значущості та нестабільності режиму в єдину метрику;

– формально продемонстровано феномен інверсії причинно-наслідкового зв'язку між нормальним і аварійним режимами, що підтверджує сценарно-залежний характер топології ризиків.

Таким чином, застосування Dynamic DEMATEL дозволяє перейти від статичного аналізу ризиків до динамічного оцінювання взаємозв’язків між факторами експлуатації морської автономної платформи, що забезпечує більш обґрунтоване формування керуючих рішень в умовах невизначеності.

6.4 Причинно-наслідковий аналіз ризиків та оцінювання сценарної стійкості морських автономних платформ

Активний розвиток морських автономних платформ суттєво змінює підходи до проведення морських операцій, особливо в галузі енергетики, морського моніторингу, спостереження і підводних робіт. Скорочення або повне усунення екіпажу на борту знижує ризики для персоналу, але в той же час створює нові системні загрози, пов'язані з автономним прийняттям рішень, цифровою інфраструктурою і дистанційним управлінням. На відміну від традиційних морських споруд, автономні платформи функціонують як складні кіберфізичні системи, в яких технічні, організаційні та інформаційні фактори тісно взаємозв'язані. Відмова одного елемента може спричинити каскадні наслідки, що призводять до надзвичайних ситуацій, затримок у реагуванні або навіть необхідності покинути платформу. Класичні методи оцінки ризиків, такі як FMEA або аналіз дерева несправностей, зазвичай базуються на лінійних причинно-наслідкових зв'язках і не враховують належним чином взаємний вплив факторів та контури зворотного зв'язку [434, 435]. У цьому контексті доцільно використовувати методи багатокритеріального аналізу прийняття рішень, які здатні моделювати складні причинно-наслідкові структури.

Сучасні дослідження в області безпеки на морі в значній мірі зосереджені на питаннях автономного судноплавства і автономних системах. Відзначається, що автономність знижує вплив людського фактора, але в той же час збільшує залежність від цифрових технологій, алгоритмів прийняття рішень і надійності каналів зв'язку. Деякі дослідження зосереджені на кіберризиках, збоях програмного забезпечення та проблемах ситуаційної обізнаності в автономних системах. Однак більшість існуючих підходів розглядають ризики ізольовано, без урахування їх взаємного впливу. Системний причинно-наслідковий аналіз ризиків для морських автономних платформ заснований на декількох взаємозв'язаних розділах літератури, які в сукупності обґрунтовують застосовність методу DEMATEL. По-перше, дослідження з управління глобальною безпекою, гібридних загроз, тероризму, бар'єрів на шляху сталого розвитку та планування евакуації на основі даних AIC показують, що ризики в морській галузі мають багаторівневий і поліцентричний характер і залежать як від політики, так і від просторової організації інфраструктури [436–438].

На цьому тлі сформувалося велике сімейство підходів, орієнтованих на DEMATEL (класичний, нечіткий, сірий, нейтрософський DEMATEL, а також комбіновані схеми DEMATEL-ISM / ANP, DEMATEL-BN, DEMATEL-FT-BN тощо), які використовуються для виявлення і кількісної оцінки причинно-наслідкових зв'язків між факторами аварійності, техногенними інцидентами, людськими помилками, організаційними бар'єрами і цифровими обмеженнями в різних галузях – від морського транспорту, пожеж і вибухів до виробництва сталі, водневої інфраструктури та будівництва [439, 440]. Для автономних і напівавтономних платформ ці інструменти застосовуються в технічній дослідницькій базі, що охоплює нові алгоритми управління AUV / USV, моделі запобігання зіткнень, надійні системи зв'язку і радарно-сенсорні системи, енергоефективність суднових установок, використання альтернативних видів палива, оптимізацію конструкції корпусу і цілісність конструкції корпусу [441–443].

Метод DEMATEL широко використовується для аналізу складних систем у галузі транспорту, енергетики, управління безпекою та аналізу ризиків. Його перевага полягає в здатності виявляти причинні фактори (рушійні сили) і залежні фактори (результати), а також в побудові візуальної карти причинно-наслідкових зв'язків. Незважаючи на потенціал DEMATEL, його застосування для аналізу ризиків морських автономних платформ залишається обмеженим, що визначає наукову новизну даного дослідження.

Тому метою даного параграфу є розробка та застосування методу DEMATEL для аналізу причинно-наслідкових зв'язків між ключовими факторами ризику для автономних платформ з метою підтримки ефективного управління безпекою.

Основними науковими результатами даного дослідження є наступні:

– запропоновано структурований підхід, заснований на методі DEMATEL, для аналізу причинно-наслідкових зв'язків між факторами ризику для морських автономних платформ;

– було встановлено, що цифровізація та автономне прийняття рішень є ключовими причинними факторами, тоді як реагування на надзвичайні ситуації, відмова від платформи та час реагування в основному залежать від них;

– чисельна реалізація DEMATEL продемонстрована за допомогою побудови причинно-наслідкових діаграм, що забезпечують ясність і відтворюваність результатів;

– продемонстрована практична застосовність запропонованого підходу для підтримки управлінських рішень, пов'язаних з безпекою морських автономних платформ.

Дослідження використовує метод лабораторних випробувань та оцінки прийняття рішень (DEMATEL) для аналізу причинно-наслідкових зв'язків між факторами ризику для морських автономних платформ тобто DEMATEL-метод багатокритеріального аналізу прийняття рішень, який дозволяє виявляти як прямі, так і непрямі взаємодії між елементами складних систем [444].

Основною перевагою методу DEMATEL є його здатність структурувати експертні знання в формалізовану модель причинно-наслідкових зв'язків, що критично важливо для аналізу автономних платформ як кіберфізичних систем з високим рівнем взаємозалежності між технічними, інформаційними та управлінськими компонентами.

Застосування DEMATEL в даній роботі здійснюється в кілька послідовних етапів:

– виявлення ключових факторів ризику;

– формування матриці прямих впливів на основі експертних оцінок;

– нормалізація матриці для забезпечення збіжності розрахунків;

– розрахунок матриці загальних впливів;

– визначення інтегральних показників впливу і залежності;

– інтерпретація результатів у вигляді причинно-наслідкових діаграм.

Такий підхід забезпечує прозорість розрахунків, відтворюваність результатів і практичне застосування отриманих висновків при управлінні ризиками автономних платформ.

Загальна послідовність виконання аналізу DEMATEL для морських автономних платформ показана на рис. 6.9. На схемі показані етапи формування набору факторів, збору експертних оцінок, побудови матриці прямих впливів, нормалізації, обчислення матриці загальних факторів і визначення інтегральних показників D, R, $D+R$ і $D-R$. Для інтерпретації результатів і визначення пріоритетів управління ризиками використовується побудова причинно-наслідкової діаграми і (при необхідності) мережі порогових впливів [445].

Робочий процес включає вибір факторів, експертну оцінку, нормалізацію матриці, обчислення матриці загального співвідношення, виведення значущості та індексів взаємозв'язку, а також візуалізацію за допомогою причинно-наслідкової діаграми.

На першому етапі було складено список факторів ризику, що характеризують безпеку МАП. Фактори були обрані на основі аналізу наукових

публікацій, галузевих стандартів та досвіду експертів у галузі морських операцій та автономних систем.

Остаточний набір факторів включав наступні ключові аспекти: необхідність виходу з платформи, час реакції на збої, здатність системи приймати автономні рішення, ефективність управління в надзвичайних ситуаціях і рівень цифровізації платформи. Обрані фактори охоплюють як технічні, так і організаційні компоненти системи і відображають специфіку експлуатації МАП без постійної присутності екіпажу.

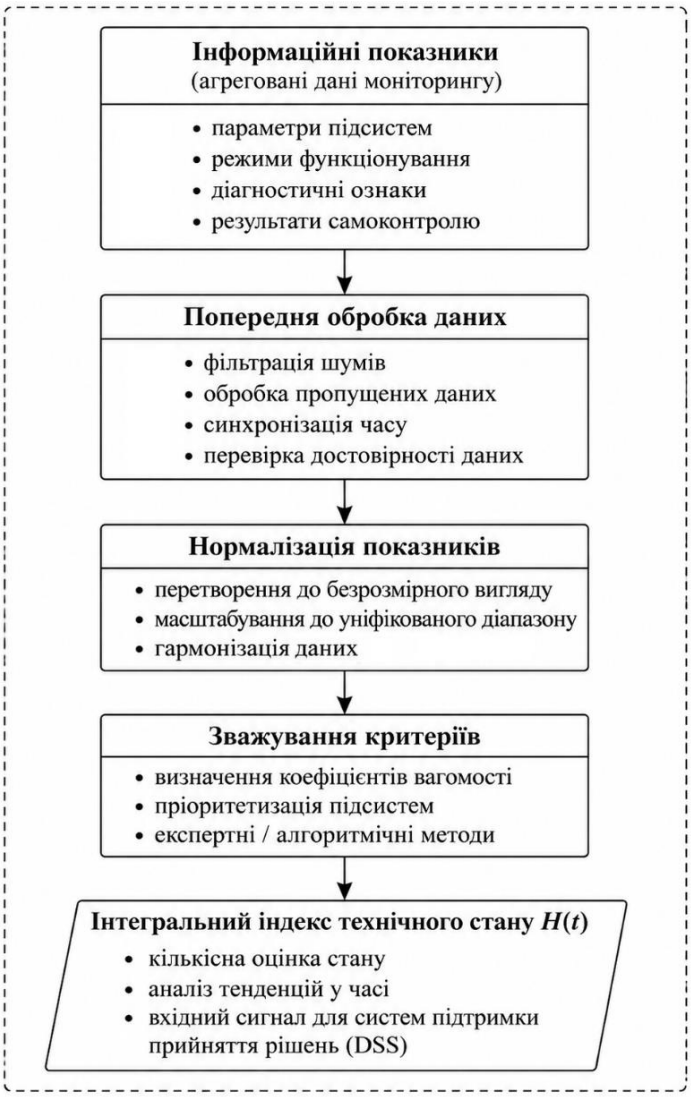


Рисунок 6.9 – Робочий процес аналізу ризиків на базі DEMATEL для морських автономних платформ

Оцінка взаємного впливу факторів ризику проводилася із залученням експертів в області морської техніки, морських операцій і автономних систем управління. Експертам було запропоновано оцінити ступінь впливу кожного фактора на інші фактори за дискретною шкалою від 0 до 4, де 0 означає відсутність впливу, а 4 – дуже сильний вплив. З метою зниження суб'єктивності оцінок окремі експертні матриці були об'єднані шляхом усереднення, що дозволило отримати узагальнену матрицю прямих впливів для подальшого аналізу [446].

Після формування матриці прямих впливів була реалізована стандартна обчислювальна процедура методу DEMATEL. На цьому етапі матриця нормалізується, розраховується матриця сумарних впливів і визначаються кількісні показники впливу і залежності для кожного фактора.

Розрахунки проводили за допомогою програмних реалізацій у середовищах MATLAB та *Python*. Отримані чисельні результати стали основою для побудови причинно-наслідкових діаграм і мереж порогового впливу, що дозволяє наочно інтерпретувати структуру ризиків АМП.

Структура DEMATEL. Визначення набору факторів

Нехай система складається з кінцевого набору факторів, пов'язаних з ризиком:

$$F = \{ f_1, f_2, ..., f_n \}, \tag{6.28}$$

де n позначає загальну кількість факторів. У цьому дослідженні враховуються наступні фактори: f_1 – відмова, f_2 – час реагування, f_3 – прийняття рішень, f_4 – управління в аварійних режимах, f_5 – рівень цифровізації.

Матриця прямих зв'язків

Для оцінки впливу фактора f_i на фактор f_j збираються експертні оцінки за дискретною шкалою від 0 (відсутність впливу) до 4 (дуже сильний вплив). Матриця прямих зв'язків визначається як:

$$A = [a_{ij}]_{n\times n},\ a_{ij} \in [0,4],\ a_{ii} = 0. \tag{6.29}$$

Нормалізація

Матриця нормалізована для забезпечення збіжності:

$$s = \max \sum_{j=1}^{n} a_{ij}, \quad X = \frac{A}{s}. \tag{6.30}$$

Матриця загального відношення

Матриця загального відношення обчислюється наступним чином:

$$T = X(I - X)^{1}, \tag{6.31}$$

де I – одинична матриця.

Показники впливу і залежності

Вектор впливу D і вектор залежності R визначаються як:

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} t_{ij}, \quad R_i = \sum_{j=1}^{n} t_{ji}. \tag{6.32}$$

Причинно-наслідкові показники

Отримано два показники:

$$M_i = D_i + R_i, \quad C_i = D_i - R_i, \tag{6.32}$$

де M_i позначає значимість фактора, а C_i визначає причинно-наслідкову роль.

Запропонований підхід був застосований до гіпотетичної МАП, що працює без постійного екіпажу. Експертні оцінки були отримані від фахівців в області морської техніки, морських операцій і автономних систем (табл. 6.5).

Розрахунки DEMATEL (нормалізація, побудова загальної матриці впливу та обчислення індексів D, R, $D+R$ та $D-R$) були виконані за допомогою програмної реалізації на MATLAB / Python.

Чисельний приклад застосування методу DEMATEL

Для демонстрації практичної реалізації запропонованого підходу DEMATEL було проведено чисельний приклад для п'яти факторів ризику, зв'язаних з МАП: відмова (F1), час реагування (F2), прийняття рішень (F3), управління в аварійних режимах (F4) та цифровізація (F5).

Таблиця 6.5 – Фактори ризику, розглянуті в аналізі DEMATEL

Код	Назва фактора	Опис
F1	Відмова	Втрата оперативного контролю, що вимагає евакуації
F2	Час реагування	Час, необхідний для вжиття коригувальних заходів
F3	Прийняття рішень	Автономна або дистанційна здатність до прийняття рішень
F4	Управління в аварійних режимах	Вміння керувати нестандартними ситуаціями
F5	Цифровізація	Рівень цифрової інтеграції

На першому етапі на основі експертних оцінок формується матриця прямих впливів A, в якій кожен елемент отражает відображає інтенсивність впливу фактора F_i на фактор F_j за шкалою від 0 до 4. Діагональні елементи матриці дорівнюють нулю, що відповідає відсутності самостійного впливу факторів.

Потім матриця A нормалізується шляхом ділення її на максимальну суму елементів рядка, що забезпечує виконання умови збіжності методу DEMATEL. Отримуємо нормалізовану матрицю X. Значення елементів матриці X знаходяться в інтервалі [0; 1], що дозволяє коректно враховувати як прямі, так і непрямі взаємозв'язки між факторами.

Матриця сумарних впливів T, яка відображає сукупний ефект прямих і непрямих взаємодій, розраховується за класичною формулою DEMATEL. Аналіз матриці T вказує на наявність суттєвих непрямих впливів, які неможливо виявити, грунтуючись виключно на матриці прямих оцінок.

На основі матриці T, показники загального впливу D, загальна R залежність, а також інтегральні показники значущості (D+R) та зв'язку (D−R) були розраховані

для кожного фактора. Показник $D+R$ характеризує загальну залученість фактора в систему ризиків, в той час як $D-R$ визначає його причинну роль.

Результати аналізу показують, що фактори цифровізація (F5) і прийняття рішень (F3) мають позитивні значення показника $D-R$, що дозволяє віднести їх до причинних факторів (cause group). Це означає, що ці фактори формують початкові імпульси до ризику і мають найбільший системний вплив на інші елементи.

З іншого боку, фактори «управління в аварійних режимах» (F4), «відмова» (F1) і «час реагування» (F2) характеризуються негативними значеннями $D-R$, що вказує на їх залежний характер (effect group). Зокрема, коефіцієнт аварійної керованості має найменше значення $D-R$, що вказує на його високу чутливість до змін в автономній системі управління та цифровій інфраструктурі.

Графічне представлення результатів у вигляді причинно-наслідкової діаграми показано на рис. 6.10, де по осі x відкладено показник значущості ($D+R$), а по осі y–показник взаємозв'язку ($D-R$). Діаграма наочно демонструє поділ факторів на причинно-наслідкові та залежні групи, а також центральну роль факторів F3 та F5 у структурі ризику.

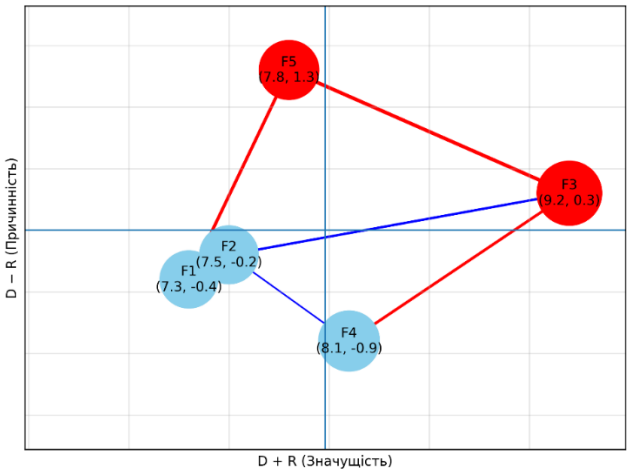


Рисунок 6.10 – Причинно-наслідкова діаграма факторів ризику (DEMATEL)

Як показано на рис. 6.10, фактори прийняття рішень (F3) та цифровізації (F5) розташовані у верхній частині діаграми, що вказує на їх причинно-

наслідковий характер у структурі ризику МАП. Навпаки, фактори управління в аварійних режимах (F4), відмова (F1) та час реагування (F2) належать до групи залежних факторів.

Для додаткової інтерпретації була побудована порогова причинно-наслідкова мережа (рис. 6.11), яка враховує тільки ті зв'язки, значення яких перевищують середнє значення елементів *T*-матриці. Отримана в результаті мережа наочно ілюструє домінуючі канали впливу в системі і підтверджує системоутворюючу роль цифровізації і автономного прийняття рішень.

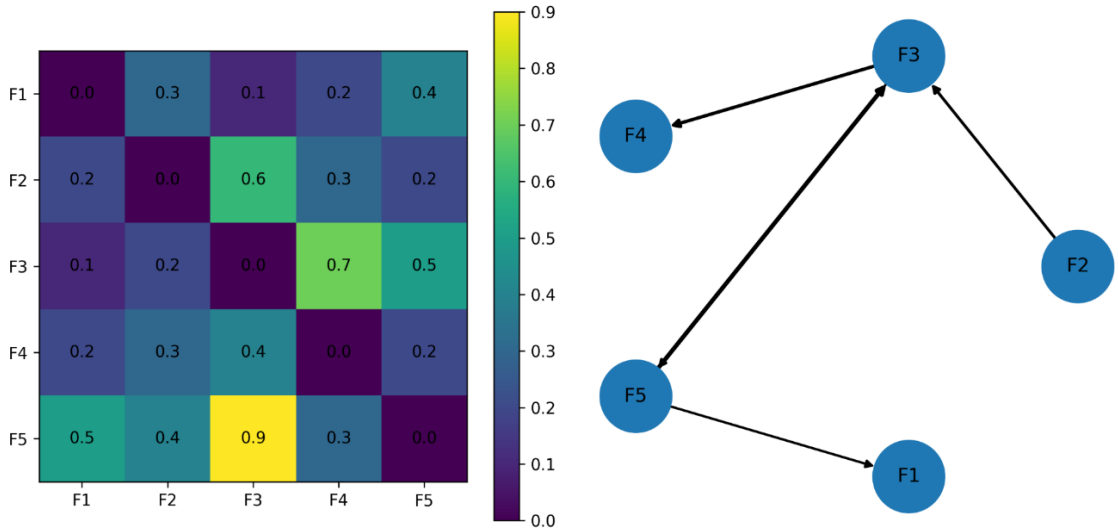


Рисунок 6.11 – Візуалізація причинно-наслідкових зв’язків між факторами: (*a*) матриця впливів (DEMATEL); (*b*) мережа значущих взаємозв’язків (з урахуванням порогового значення)

На рис. 6.11 представлено візуалізацію причинно-наслідкових зв’язків між досліджуваними факторами. Частина (*a*) відображає матрицю впливів, яка характеризує інтенсивність взаємодії між факторами, тоді як частина (*b*) демонструє мережу найбільш значущих зв’язків, відібраних за пороговим значенням. Такий підхід дозволяє чітко ідентифікувати ключові фактори впливу та структуру їх взаємозв’язків у системі. Показана причинно-наслідкова мережа на основі порогових значень, отримана з матриці сумарних відносин з використанням порогового значення α, що дорівнює середньому значенню

матриці *T*. Отримана мережа підтверджує системоутворюючу роль факторів цифровізації (F5) і прийняття рішень (F3). В цілому, числовий приклад підтверджує доцільність використання методу DEMATEL для аналізу ризиків автономних платформ і демонструє його здатність виявляти ключові фактори ризику, які повинні стати пріоритетними цілями для втручання керівництва [447].

Отримані результати моделювання підтвердили ефективність запропонованих моделей адаптивного управління та стійкість системи в умовах стохастичних збурень і зміни режимів функціонування автономного морського транспортного засобу.

Результати аналізу DEMATEL вказують на наявність чітко визначеного причинно-наслідкового зв'язку між факторами ризику морських автономних платформ. Виходячи зі значень індексу $D-R$, фактори цифровізації (F5) та прийняття рішень (F3) класифікуються як фактори групи причин, що означає, що вони мають домінуючий вплив на формування профілю ризику системи. Управління в аварійних режимах (F4), відмови (F1) і часу реагування (F2) характеризуються негативними значеннями $D-R$ і відносяться до групи ефектів. Це свідчить про те, що їх статус багато в чому визначається якістю цифрової інфраструктури та ефективністю автономного прийняття рішень. Значення показника $D+R$ показують, що фактор прийняття рішень (F3) має найвищу інтегральну значимість, тобто він найбільш залучений в систему взаємодій і грає центральну роль в структурі ризику. Результати підтверджують, що для морських автономних платформ ключовими джерелами ризику є не окремі аварії, а системні фактори, пов'язані з цифровізацією та автономними алгоритмами прийняття рішень. Це узгоджується з поточними дослідженнями автономної та кіберфізичної безпеки морських систем, де цифрові компоненти вважаються основними факторами ризику.

Визначення факторів управління в аварійних режимах та відмов як залежних факторів вказує на обмежену ефективність суто реактивних заходів

безпеки. Результати аналізу, проведеного DEMATEL, вказують на доцільність попереджувального управління ризиками за рахунок підвищення надійності цифрових систем, скорочення часу автономного реагування і поліпшення логіки прийняття рішень. Таким чином, метод DEMATEL дозволяє не тільки виявити критичні фактори ризику, а й обґрунтувати пріоритети управлінського впливу, приділяючи особливу увагу причинним факторам, а не їх наслідкам.

Запропонована методологія, орієнтована на DEMATEL, надає можливість систематичного аналізу взаємозв'язків між факторами ризику та дозволяє визначити їх ієрархію причинно-наслідкових зв'язків. Результати підтверджують, що інвестиції в розвиток цифрової інфраструктури, алгоритмів автономного прийняття рішень та систем прогнозного моніторингу мають значно більший вплив на безпеку, ніж традиційні реактивні заходи реагування на надзвичайні ситуації [448–450].

Метод DEMATEL може ефективно використовуватися як аналітичний інструмент для підтримки управлінських рішень при проєктуванні, сертифікації та експлуатації автономних платформ. Для регуляторних органів та розробників це створює основу для інтеграції причинно-наслідкового аналізу ризиків у регуляторні та технічні стандарти та процедури оцінки безпеки систем нового покоління.

6.5 Висновки до шостого розділу

У розділі розроблено структурно-сценарний підхід до моделювання режимів функціонування морських автономних платформ в умовах невизначеності, який забезпечує інтеграцію моделей динаміки руху, інформаційного забезпечення та ризик-орієнтованого аналізу в межах єдиного контуру експлуатаційного управління.

Розроблено спрощену тривимірну динамічну модель морської автономної платформи з трьома ступенями свободи (3-DOF), яка враховує вплив хвильових

збурень та дозволяє досліджувати особливості функціонування систем керування в умовах стохастичних змін зовнішнього середовища. Результати моделювання підтвердили доцільність використання адаптивних і робастних підходів до керування для зменшення похибок відстеження та підвищення стійкості функціонування автономної платформи.

Запропоновано підхід до інтеграції неоднорідних інформаційних потоків навігаційного, технічного, енергетичного та середовищного походження, що забезпечує формування узгодженого інформаційного простору для підтримки прийняття рішень. Введення інтегрального показника якості інформаційної інтеграції дозволяє кількісно оцінювати повноту та узгодженість інформаційного забезпечення автономної системи.

Розроблено сценарно-орієнтований підхід до аналізу ризиків морських автономних платформ на основі Dynamic DEMATEL framework, який, на відміну від класичного DEMATEL-підходу, враховує часову еволюцію причинно-наслідкових зв’язків між факторами ризику. Це дозволяє моделювати зміну структури ризиків у процесі виконання місії та оцінювати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на ефективність експлуатації платформи.

Запропоновано систему показників сценарної стійкості та причинної значущості факторів ризику, які забезпечують кількісне ранжування загроз та визначення критичних елементів структури ризиків. Практичне використання отриманих показників створює основу для формування адаптивних стратегій управління та підвищення обґрунтованості рішень в умовах невизначеності.

Отримані результати розвивають методологію управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів шляхом поєднання моделей динаміки, інформаційної інтеграції та сценарно-структурного аналізу ризиків у межах єдиного підходу до підтримки експлуатаційного управління морськими автономними платформами.

Основні результати розділу опубліковано у працях автора [18, 23, 24, 25, 29, 31, 32, 33, 47, 49, 51, 54].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему розроблення методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності, що базується на місійно-орієнтованому підході, інтеграції adaptive control, цифрових двійників, DSS-архітектур, інтелектуальних систем управління та сценарно-структурного моделювання. Проведене дослідження дозволило сформувати цілісну багаторівневу систему adaptive mission-oriented management, орієнтовану на забезпечення стійкого функціонування АМТЗ у динамічному стохастичному середовищі.

Проведений аналіз сучасного стану розвитку автономних морських транспортних систем показав, що існуючі підходи до управління ефективністю АМТЗ переважно базуються на ізольованому оцінюванні окремих технічних, навігаційних або економічних показників та не забезпечують комплексного врахування багатофакторної невизначеності, адаптивних режимів функціонування і місійної результативності автономних платформ. Встановлено необхідність переходу від локальних детермінованих підходів до інтегрованої місійно-орієнтованої методології адаптивного управління ефективністю.

Сформовано теоретико-методологічні засади управління ефективністю АМТЗ в умовах невизначеності. Запропоновано формалізоване представлення простору невизначеності, яке включає екологічну, технічну, алгоритмічну та інформаційну складові. На відміну від традиційних підходів, невизначеність розглядається як інтегрована багаторівнева категорія ризику, що безпосередньо впливає на стійкість функціонування автономної платформи, ефективність адаптивного управління та результативність автономної місії.

Розроблено концепцію місійно-орієнтованого оцінювання ефективності експлуатації АМТЗ, відповідно до якої результативність автономної системи визначається не лише техніко-економічними показниками, а здатністю

забезпечувати повне та стійке виконання автономної місії у межах заданих часових, енергетичних і функціональних обмежень. Запропоновано інтегральну структуру ефективності виконання завдань, яка враховує рівень виконання завдань, надійність функціонування, енергетичну стійкість, стабільність навігації та адаптивність системи до зміни умов середовища.

У межах дисертаційного дослідження розроблено математичну постановку задачі адаптивного управління, орієнтованого на виконання завдань (місій) автономних морських транспортних засобів у стохастичному середовищі. Запропоновано інтегральний функціонал управління, який одночасно враховує точність стабілізації руху, енергетичні витрати, інтегральний ризик та стійкість функціонування системи. Це дозволило перейти від класичних задач стабілізації руху до комплексного adaptive management автономної місії.

Розроблено інтегровану MPC–FLC–RL архітектуру adaptive control, яка поєднує прогнозне керування, нечітку логіку та reinforcement learning у межах єдиного багаторівневого контуру управління. На відміну від класичних deterministic control systems, запропонований підхід забезпечує адаптивне коригування параметрів управління залежно від зміни умов функціонування, зовнішніх збурень, деградації технічних вузлів та рівня ризику автономної місії.

Введено поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику автономних морських транспортних систем, що враховує похибки адаптивних алгоритмів, неповноту інформації, змінність параметрів моделей та нестабільність процесів прийняття рішень. Запропонований підхід дозволяє підвищити достовірність прогнозування експлуатаційної ефективності та стійкість функціонування автономних платформ у процесі виконання тривалих місій.

Розроблено методологічні засади інтеграції цифрових двійників у систему управління експлуатацією АМТЗ. Запропонована Digital Twin-архітектура забезпечує безперервну синхронізацію фізичного та віртуального станів платформи, прогнозування деградації технічних вузлів, сценарне прогнозування режимів

функціонування та підтримку adaptive decision-making у реальному масштабі часу. На відміну від класичних систем моніторингу, цифровий двійник розглядається як активний елемент ризик-орієнтоване управління автономної платформи.

Запропоновано підхід до інтеграції неоднорідних інформаційних потоків АМТЗ у межах єдиного інформаційного рівня системи експлуатаційного управління. Реалізовано механізми синхронізації, фільтрації та агрегування навігаційних, енергетичних, силових і середовищних даних, що забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану платформи та зниження рівня інформаційної невизначеності.

Розроблено інтелектуальні adaptive control approaches для електромеханічних систем морських автономних платформ. Запропоновано структуру нечітких контролерів відповідно до стандарту IEC 61131-7 та реалізовано нелінійні моделі електроприводів з урахуванням змінності навантаження, стохастичних збурень і деградаційних процесів. Отримані результати підтвердили підвищення робастності системи, стабільності режимів функціонування та енергетичної ефективності автономної платформи.

Розроблено структурно-сценарний підхід до моделювання режимів функціонування морських автономних платформ у стохастичному середовищі. Запропоновано dynamic DEMATEL framework для моделювання еволюції причинно-наслідкової топології ризиків залежно від сценарію функціонування системи. Встановлено існування структурної інверсії факторів ризику між штатним та аварійним режимами експлуатації, що дозволило реалізувати adaptive ризик-орієнтоване управління автономних платформ у реальному масштабі часу.

Запропонована методологія орієнтована на забезпечення ефективної експлуатації автономних морських транспортних засобів шляхом безперервного моніторингу технічного стану, прогнозування його змін, своєчасного виявлення деградаційних процесів та формування адаптивних керуючих рішень, що дозволяє підтримувати необхідний рівень експлуатаційної готовності транспортного засобу.

Розроблено методологічні засади підвищення ефективності технічної експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності, які розвивають теорію технічної експлуатації транспортних засобів шляхом інтеграції методів прогнозування технічного стану, адаптивного управління, цифрових двійників, оцінювання ризиків та підтримки прийняття рішень у єдину систему експлуатаційного управління.

Показано, що фундаментальною зміною в управлінні АМТЗ є відмова від класичної концепції пасивного придушення збурень (компенсації) на користь парадигми антикрихкості. Завдяки введенню індексу антикрихкої адаптивності та використанню строго опуклих цільових функцій (відповідно до нерівності Єнсена), екстремальні зовнішні збурення, такі як штормові хвилі, пропонується розглядати не як завади, а як інформаційні стимули. Це ініціює динамічну структурно-параметричну реконфігурацію математичних моделей цифрового двійника безпосередньо під час місії, що призводить до інформаційної надкомпенсації, суттєвого зниження механічного зносу конструкцій та стрибкоподібного зростання живучості системи в умовах стохастичної волатильності.

Доведено, що забезпечення стійкості у довготривалих місіях вимагає інтеграції ізольованих АМТЗ у багатоагентні морські роботизовані комплекси, функціонування яких спирається на федеративну мережу цифрових двійників. Ця архітектура забезпечує колективне навчання та передачу «цифрового досвіду» адаптації до критичних умов між суднами рою без надмірного навантаження на канали зв'язку. Використання механізмів міжплатформної ройової компенсації (інформаційного заміщення та обчислювального розвантаження) дозволяє комплексу ефективно нівелювати локальні відмови сенсорів та алгоритмічну невизначеність окремих вузлів, гарантуючи збереження інтегральної ефективності місії.

Введено поняття критерії збереження когнітивного здоров'я системи. Обгрунтовано, що для безпечної експлуатації безекіпажних платформ із штучним інтелектом класична оптимізація витрат ресурсів має бути підпорядкована цим критеріям. Впровадження антикрихкого когнітивно-гомеостатичного функціоналу

дозволяє системі розпізнавати внутрішні конфлікти даних (наприклад, під час GPS-спуфінгу або деградації датчиків) через оцінку варіаційної вільної енергії та індексу дисонансу сенсорів. Підтримка такого гомеостазу реалізується шляхом оптимізації через гібридну туманно-межову архітектуру, що дозволяє делегувати складні обчислення в межах рою та пріоритезувати адекватність віртуальних моделей ШІ над жорстким утриманням фізичної траєкторії, ефективно запобігаючи аварійним ситуаціям.

Отримані результати формують цілісну методологію управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, що базується на інтеграції місійно-орієнтованого оцінювання, адаптивного керування, цифрових двійників, DSS-архітектур та інтелектуальних енергоощадних систем. Завдяки поєднанню сценарно-структурного моделювання, ризик-орієнтованого менеджменту та методів прогнозування стійкості місій, запропонований підхід забезпечує перехід від локального управління окремими підсистемами до інтегрованого адаптивного управління, орієнтоване на виконання завдань, що дозволяє підтримувати високу результативність автономних платформ у складному стохастичному середовищі, забезпечуючи адаптацію системи до динамічних змін технічного стану та зовнішніх умов функціонування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей, алгоритмів та архітектур у системах управління морськими автономними платформами, цифрових двійниках, DSS-системах, комплексах енергоменеджменту та системах adaptive navigation. Запропоновані рішення можуть бути використані при створенні перспективних автономних морських транспортних систем, платформ подвійного призначення, роботизованих морських комплексів та інтелектуальних морських автономних систем нового покоління.

Сукупність отриманих результатів формує нові методологічні засади підвищення ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, які спрямовані на забезпечення ефективного використання транспортних засобів за призначенням, прогнозування технічного стану, підвищення експлуатаційної надійності та стійкості функціонування в умовах невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fernando, E., Akter, F., Islam, T., Imtiaz, S., Ahmed, S., Islam, M., & Zaman, H. (2025). Control systems for autonomous marine surface ships. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14081-5.00158-6

2. Morales-Aragón, I. P., Giménez-Gallego, J., Gilabert, J., Torres-Sánchez, R., & Soto-Valles, F. (2025). Design and application of depth control methods for autonomous underwater profilers in challenging marine environments. Results in Engineering, 25, Article 104031. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104031

3. Utne, I. B., Schjølberg, I., & Roe, E. (2018). High reliability management and control operator risks in autonomous marine systems and operations. Ocean Engineering, 171, 399–416. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.034

4. Salalila, A., Lu, J., Martinez, J. J., Hou, H., & Deng, Z. D. (2025). Autonomous sensor suite for evaluating fish-turbine interactions and environmental impacts in marine renewable energy and hydropower. Science of the Total Environment, 966, Article 178710. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178710

5. Gogendeau, P., Bonhommeau, S., Fourati, H., Julien, M., Contini, M., Chevrier, T., Nieblas, A. E., & Bernard, S. (2025). An autonomous surface vehicle for acoustic tracking, bathymetric and photogrammetric surveys. Ocean Engineering, 331, Article 121201. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121201

6. Chen, H., Wen, Y., Huang, Y., Song, L., & Sui, Z. (2025). Inland waterway autonomous transportation: System architecture, infrastructure and key technologies. Journal of Industrial Information Integration, 46, Article 100858. https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100858

7. Sangprasert, N., & Inthavisas, K. (2025). A smart marine debris management system for a sustainable coastal city: An IoT-based application. Cleaner Waste Systems, 11, Article 100262. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100262

8. Ma, D., Li, Y., Ma, T., & Pascoal, A. M. (2025). The state of the art in key technologies for autonomous underwater vehicles: A review. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.08.002

9. Yang, R., Bremnes, J. E., & Utne, I. B. (2023). Online risk modeling of autonomous marine systems: Case study of autonomous operations under sea ice. Ocean Engineering, 281, Article 114765. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114765

10. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mykhailova, I., Obnyavko, T., & Korobko, T. (2023). Focused research on technological innovations in the shipping industry: Review and prospects. Transport Development, 1 (16), 164–174. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13

11. Fogh Sørensen, F., Mai, C., VonBenzon, M., Liniger, J., & Pedersen, S. (2025). The localization problem for underwater vehicles: An overview of operational solutions. Ocean Engineering, 330, Article 121173. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121173

12. Fontenla-Carrera, G., Aldao Pensado, E., Veiga-López, F., & González-Jorge, H. (2025). Efficient offshore wind farm inspections using a support vessel and UAVs. Ocean Engineering, 332, Article 121416. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121416

13. Nakashima, T., Kureta, R., & Khastgir, S. (2025). Addressing systemic risks in autonomous maritime navigation: A structured STPA and ODD-based methodology. Reliability Engineering & System Safety, 261, Article 111041. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111041

14. An, X., Xing, H., Li, H., Shi, H., & Gu, Y. (2025). Construction and verification of the autonomous underwater helicopter’s digital twin system for missions simulation. Ocean Engineering, 341, Article 122641. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122641

15. Melnyk, O., Volianska, Y., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Kononova, O., & Vasalatii, N. (2022). Development of computer-based remote

technologies and course control systems for autonomous surface ships. International Journal of Computer Science and Network Security, 22(9), 183–188. https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.9.27

16. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., Kalinichenko, Y., Rossomakha, O., Naleva, G., & Rossomakha, O. (2022). Autonomous ships concept and mathematical models application in their steering process control. TransNav, 16(3), 553–559. https://doi.org/10.12716/1001.16.03.18

17. Korban, D., Melnyk, O., Onishchenko, O., Kurdiuk, S., Shevchenko, V., & Obniavko, T. (2024). Radar-based detection and recognition methodology of autonomous surface vehicles in challenging marine environment. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 122, 111–127. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.122.7

18. Melnyk, O., Onishchenko, O., Borovyk, S., Volyanskyy, S., Bychkovsky, Y., Zaporozhets, A., & Shcheniavskyi, H. (2025). Survey of ship energy autonomy technologies and development perspectives. In Studies in Systems, Decision and Control (Vol. 574, pp. 37–48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76650-3_3

19. Melnyk, O., Vorokhobin, I., Onishchenko, O., Zaporozhets, A., Koryakin, K., & Kucherenko, V. (2025). Adaptive control strategies to improve the maneuverability and course-keeping of autonomous ships. In Studies in Systems, Decision and Control (Vol. 580, pp. 167–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_11

20. Aydin, M., Sezer, S. I., Akyuz, E., & Gardoni, P. (2025). Improved Z-number based Bayesian network modelling to predict cyber-attack risk for maritime autonomous surface ship (MASS). Applied Soft Computing, 180, Article 113416. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113416

21. Lin, Y., Xin, J., Zhang, R., & Yuen, K. F. (2025). A multi-objective deep reinforcement learning framework for energy efficiency of autonomous harbor crafts. Applied Energy, 401, Article 126809. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126809

22. Melnyk, O., Onyshchenko, O., Voloshyn, A., Vasalatii, N., Lohinov, O., & Koriakin, K. (2022). Development of remote technologies of ship control as a factor for ensuring shipping safety. Transport Development, 3(14), 179–191. https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13

23. Yermolenko, B. (2023). Analysis of the navigation and path planning process of an autonomous surface vessel. Transport Development, 3(18), 138–148. https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.11

24. Cui, Z., Guan, W., Luo, W., & Zhang, X. (2023). Intelligent navigation method for multiple marine autonomous surface ships based on improved PPO algorithm. Ocean Engineering, 287, 115783. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115783

25. Larsen, T. N., Hansen, H., & Rasheed, A. (2022). Risk-based Convolutional Perception Models for Collision Avoidance in Autonomous Marine Surface Vessels using Deep Reinforcement Learning. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 10033-10038. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.870

26. Kim, D., Song, S., Turnock, S., & Tezdogan, T. (2023). Nonlinear URANS model for path-following control problem towards autonomous marine navigation under wave conditions. Ocean Engineering, 270, 113681. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113681

27. Guan, W., Luo, W., & Cui, Z. (2024). Intelligent decision-making system for multiple marine autonomous surface ships based on deep reinforcement learning. Robotics and Autonomous Systems, 172, 104587. https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104587

28. Bonin-Font, F., Martorell-Torres, A., Abadal, M. M., Muntaner-González, C., Nordfeldt-Fiol, B. M., González-Cid, Y., Oliver-Codina, G., Máñez-Crespo, J., Reynés, X., Pereda, L., Hernan, G., & Tomás, F. (2024). Measuring the temporal evolution of seagrass Posidonia oceanica coverage using autonomous marine robots and Deep Learning. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 312, 109029. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.109029

29. Cao, L., Wang, T., Wang, W., Feng, H., Wang, R., Zhang, Y., Li, W., & Chen, S. (2025). Novel copper-based nanocomposite coatings achieving autonomous damage reporting and solar-triggered self-healing for marine corrosion protection. Composites Part B: Engineering, 305, 112748. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112748

30. Massot-Campos, M., Bonin-Font, F., Guerrero-Font, E., Martorell-Torres, A., Abadal, M. M., Muntaner-Gonzalez, C., Nordfeldt-Fiol, B. M., Oliver-Codina, G., Cappelletto, J., & Thornton, B. (2023). Assessing benthic marine habitats colonized with posidonia oceanica using autonomous marine robots and deep learning: A Eurofleets campaign. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 291, 108438. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108438

31. Vimal Kumar, S., & Kim, J. (2024). Actuator fault-tolerant mixed passivity and H∞ control for autonomous marine surface vehicles: A sampled-data approach. European Journal of Control, 81, 101167. https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2024.101167

32. Riccobono, A., Boscaino, V., Odetti, A., Mammana, F., Cipriani, G., Bruzzone, G., Di Dio, V., Caccia, M., & Tinè, G. (2024). A comparison of multi-source power supply systems for autonomous marine vehicles: The SWAMP case study. International Journal of Hydrogen Energy, 80, 1124-1136. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.206

33. Du, Z., Li, C., Wang, P., Jin, Z., Tian, L., Wang, A., & Zhang, M. (2025). Dual-trigger microcapsules for autonomous crack healing in marine concrete: Synergistic response to mechanical stress and chloride ions. Journal of Building Engineering, 113, 114151. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114151

34. Guo, Z., Zhang, J., Zhang, Y., & Zhang, L. (2024). Sliding Mode Control of Autonomous Marine Vehicle with Prescribed Convergence Time. IFAC-PapersOnLine, 59(22), 585–590. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.697

35. Cui, Z., Guan, W., & Zhang, X. (2025). Gated transformer-based proximal policy optimization for multiple marine autonomous surface ships collision avoidance decision-making strategy. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 156, 111242. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111242

36. Xue, H., & Yang, E. (2026). Dual-layer aperiodic event-triggered model predictive control for formation of autonomous marine vehicles with prescribed-time strategy. Journal of the Franklin Institute, 363 (7), 108617. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2026.108617

37. Mesiya Peter, M., & Ma, M. (2025). Tortious liability for autonomous marine vehicle collisions: A suggestive move from fault-based to strict liability. Ocean & Coastal Management, 269, 107781. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107781

38. Zhu, X., Zhu, M., Fang, T., Huang, S., Li, J., & Ma, J. (2026). ISEA-in situ: A submersible flow-based nutrient sensor for autonomous measurement of ammonium in marine waters. Sensors and Actuators B: Chemical, 451, 139441. https://doi.org/10.1016/j.snb.2026.139441

39. Zaccone, R., Ponzini, F., & Martelli, M. (2025). Experimental validation of a modular navigation architecture for marine autonomous surface vehicles with reactive collision avoidance. Applied Ocean Research, 166, 104903. https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104903

40. Bao, Z., Zhu, Q., & Liu, Y. (2026). Dual-channel event-triggered model-free adaptive surge control for autonomous marine vehicles based on data-driven extended state observer. Ocean Engineering, 358, 125716. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125716

41. Wang, J., & Yuan, M. (2026). Regulation of maritime autonomous surface ships on carbon emissions and marine pollution: Context, challenges, responses. Marine Policy, 186, 107020. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.107020

42. Li, H., Meng, X., Zhang, W., Zhou, X., & Yang, X. (2026). A real-time reliability assessment framework for marine mechanical equipment integrating

machine learning and physical knowledge: Toward applications in maritime autonomous surface ships. Reliability Engineering & System Safety, 271, 112233. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112233

43. Syntakas, S., & Vlachos, K. (2026). Real time uncertainty quantification of NMPC employing deep learning in safety-critical autonomous marine systems. Ocean Engineering, 354, 124815. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124815

44. Ahonen, A., De Koning, M., Machado, T., Ghabcheloo, R., & Sievi-Korte, O. (2023). An exploratory study of software engineering in heavy-duty mobile machine automation. Robotics and Autonomous Systems, 165, 104424. https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104424

45. Kaur, M., Kaur, A., & Singh, P. (2025). UAV swarm clustering and trajectory planning: A taxonomy, systematic review, current trends and research challenges. Computers and Electrical Engineering, 128, 110697. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110697

46. Fu, T., Wang, B., Liu, Y., Ai, R., Liu, J., Wang, C., & Li, D. (2026). Design, perception, planning and control for underwater cleaning robotics: Progress, challenges and trends. Journal of Ocean Engineering and Science, 11(2), 614–637. https://doi.org/10.1016/j.joes.2025.12.019

47. Xing, W., & Zhu, L. (2023). Exploring legal gaps and barriers to the use of unmanned merchant ships in China. Marine Policy, 153, 105662. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105662

48. Goerlandt, F. (2020). Maritime Autonomous Surface Ships from a risk governance perspective: Interpretation and implications. Safety Science, 128, 104758. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104758

49. Yousaf, A., Amro, A., Kwa, P. T. H., Li, M., & Zhou, J. (2024). Cyber risk assessment of cyber-enabled autonomous cargo vessel. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 46, 100695. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2024.100695

50. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime

autonomous surface ships using team cognitive work analysis. *Regional Studies in Marine Science, 90*, 104477. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477

51. Ahmed, Y. A., Theotokatos, G., Maslov, I., Wennersberg, L. A. L., & Nesheim, D. A. (2024). Regulatory and legal frameworks recommendations for short sea shipping maritime autonomous surface ships. Marine Policy, 166, 106226. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106226

52. Kim, J., Kim, D., Kim, D., Im, S., Kim, S., Jeong, S., Seo, J., Kim, Y. S., Yeo, D. J., Park, J., & Park, J. (2026). Study on heading controllers for Maritime autonomous surface ship: Simulation and full-scale sea trials. Ocean Engineering, 344, 123484. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123484

53. Xian, J., Li, Z., Wu, H., Mei, X., Chen, X., Zhang, Y., Wang, W., & Zhang, Y. (2026). Polar codes construction and synchronization algorithm for efficient transmission of underwater situational awareness information in autonomous ship navigation. Ocean Engineering, 355, 124940. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124940

54. Meng, X., Li, H., Zhang, W., & Yang, X. (2026). A machine learning-enhanced real-time reliability assessment framework for maritime autonomous surface ships propulsion systems. Reliability Engineering & System Safety, 275, 112804. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112804

55. Ozcan, A. B., Bayezit, I., Kinaci, O. K., & Khan, J. (2026). Nonlinear stability analysis of autonomous container ship under environmental disturbances using hardware-in-the-loop validation. Ocean Engineering, 351, 124201. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124201

56. Tatar, V. (2026). Optimization-based decision support model for risk assessment of autonomous ships: Spherical fuzzy FUCOM-ARTASI approach. Ocean Engineering, 345, 123486. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123486

57. Sun, T., Yin, Y., & Liu, C. (2026). AIS-data-guided trajectory planning and control for ship autonomous berthing. Ocean Engineering, 350, 124270. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124270

58. Yang, X., Wang, Y., Zhang, W., Zhou, X., Meng, X., & Sun, X. (2026). A failure-taxonomy-guided system-theoretic quantitative risk assessment framework for autonomous ship convoy navigation in inland waterways. Reliability Engineering & System Safety, 272, 112514. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112514

59. Seo, M., Paik, K., Yoo, W., Kim, S., & Kwon, S. (2025). A study on the avoidance timing of autonomous surface ships through machine learning. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 18, 100717. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100717

60. Wang, W., Li, M., Chen, G., Yang, S., Suo, Y., Guo, X., & Wang, K. (2026). Cognitive entropy proximal policy optimization for autonomous ship collision avoidance based on deep reinforcement learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 172, 114416. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2026.114416

61. Zhang, W., Wu, G., Zhou, X., Yang, X., & Meng, X. (2025). A function-triggered framework for the feasibility analysis of autonomous ships in Arctic pendulum transport mode. Regional Studies in Marine Science, 93, 104665. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104665

62. Song, T., Fu, L., Zhong, L., Fan, Y., & Zhang, M. (2026). A coordinated control framework for maneuvering and power management in autonomous all-electric ships. Ocean Engineering, 357, 125392. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125392

63. Tran, H. A., Johansen, T. A., & Negenborn, R. R. (2026). Distributed MPC for autonomous ships on inland waterways with collaborative collision avoidance. Ocean Engineering, 353, 124802. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124802

64. Yang, X., Zhao, Y., Zhang, W., Zhou, T., & Zhang, G. (2026). Enhancing data integrity for autonomous ships: A multi-level detection model against clean-label poisoning attacks. Reliability Engineering & System Safety, 272, 112557. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112557

65. Yang, L., Liu, J., Zhou, Q., Liu, Z., Wang, Y., Liu, Y., Li, X., & Li, H. (2026). Advanced autonomous collision avoidance for maritime navigation: A reinforcement learning approach with ship dynamics and environmental awareness. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 212, 104901. https://doi.org/10.1016/j.tre.2026.104901

66. Bolbot, V., Bergström, M., Rahikainen, M., & Valdez Banda, O. A. (2025). Investigation into safety acceptance principles for autonomous ships. Reliability Engineering & System Safety, 257, 110810. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110810

67. Adetunji, A. S., Vasanthan, C., Glomsrud, J. A., Galeazzi, R., & Rokseth, B. (2024). Safety Assurance for Autonomous Ships Using Contract-Based Design and Simulation-Based Testing. IFAC-PapersOnLine, 59 (22), 722–727. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.720

68. Xing, W. (2024). Contemplating Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) under the international law on ship-source pollution. Marine Pollution Bulletin, 207, 116884. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116884

69. Xu, Y., Peng, Z., Gu, N., Zhang, G., & Han, B. (2025). Anti-disturbance line-of-sight path following of dual-podded maritime autonomous surface ships: A case study of XIN HONG ZHUAN. Ocean Engineering, 341, 122468. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122468

70. Li, W., Cheng, K., Shi, G., Desrosiers, R., & Wang, X. (2025). Ship domain models: Reviewing the advancements and exploring the future directions in the maritime autonomous surface ships. Ocean Engineering, 326, 120935. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120935

71. Shi, Q., Mao, Y., He, J., Liang, Q., Xue, X., & Song, L. (2026). A compact magnetic rudder-wheel climbing robot for autonomous traversal and inspection of confined ship compartment surfaces. Robotics and Autonomous Systems, 201, 105435. https://doi.org/10.1016/j.robot.2026.105435

72. Zheng, J., Huang, Z., Wang, X., Qi, X., & Chen, X. (2025). Assessing feasibility of a human-like situation understanding method based on large language models for applying in maritime autonomous surface ships in encounter scenarios. Ocean Engineering, 341, 122559. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122559

73. Zhong, Y., Liu, B., Dong, J., Yin, F., & Zhang, J. (2026). Safety-critical autonomous ship navigation in narrow corridors: Geometry-integrated guidance and barrier-function control. Ocean Engineering, 355, 125024. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125024

74. Zhang, Z., Sun, Y., Zhao, T., Sun, L., & Kang, J. (2026). Graph-structured data analysis of component failure in autonomous cargo ships based on feature fusion. Information and Software Technology, 195, 108134. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2026.108134

75. Prabowo, Y. A., Hansen, P. N., Jensen, J. B., Papageorgiou, D., & Galeazzi, R. (2024). Good Seamanship Online Trajectory Planner for Autonomous Ship. IFAC-PapersOnLine, 59(22), 359–364. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.659

76. Wu, G., Li, D., Ding, H., Shi, D., & Han, B. (2023). An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing. Complex & Intelligent Systems, 10, 981–1003. https://doi.org/10.1007/s40747-023-01094-9

77. Guan, W., Han, H., & Cui, Z. (2024). Autonomous navigation of marine surface vessel in extreme encounter situation. Journal of Marine Science and Technology, 29, 167–180. https://doi.org/10.1007/s00773-023-00977-2

78. Волянська, Я. Б., & Волянський, С. М. (2017). Основи наукових досліджень. Миколаїв: Іліон. 216 с. ISBN 978-617-534-442-2.

79. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Лебедєва, Л. В., & Радченко, І. Г. (2025). Теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських технічних засобів при змінних умовах експлуатації. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 4 (1), 414–424. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.1.39

80. Volyanskyy, S. M., Melnyk, O. M., Onyshchenko, O. A., & Kotenko, O. O. (2025). Structural-functional modeling of autonomous maritime technical systems under operational disturbances. Наука і техніка сьогодні, 11(52), 1801–1814. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1801-1814

81. Kim, T. E., Perera, L. P., Sollid, M. P., Batalden, B. M., & Sydnes, A. K. (2022). Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments. WMU Journal of Maritime Affairs, 21 (2), 141. https://doi.org/10.1007/s13437-022-00277-z

82. Abaei, M. M., Hekkenberg, R., & BahooToroody, A. (2021). A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships. Reliability Engineering & System Safety, 210, 107484. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107484

83. Волянський, С. М., Шумило, О. О., Мельник, О. М., & Волянська, Я. Б. (2025). Алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ. Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія, 6 (194), 426–435. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-426-435

84. Ellefsen, A. L., Æsøy, V., Ushakov, S., & Zhang, H. (2019). A comprehensive survey of prognostics and health management based on deep learning for autonomous ships. IEEE Transactions on Reliability, 68 (2), 720–740. https://doi.org/10.1109/TR.2019.2907402

85. Volyanskyy, S., Melnyk, O., & Dobrovolska, L. (2026). Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling time-evolving risk topology in autonomous maritime platforms. Oceanography & Fisheries Open Access Journal, 19(2), 1–4. https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2026.19.556006

86. Abilio Ramos, M., Utne, I. B., & Mosleh, A. (2019). Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. Safety Science, 116, 33–44. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.038

87. Волянський, С., Волянська, Я., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Структурно-динамічна модель автономної морської платформи з кількісним аналізом міжсистемних впливів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 363 (2), 597–604. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-78

88. Akbar, A., A. Aasen, A. K., Msakni, M. K., Fagerholt, K., Lindstad, E., & Meisel, F. (2021). An economic analysis of introducing autonomous ships in a short-sea liner shipping network. International Transactions in Operational Research, 28(4), 1740–1764. https://doi.org/10.1111/itor.12788

89. Bao, J., Yu, Z., Li, Y., & Wang, X. (2021). A novel approach to risk analysis of automooring operations on autonomous vessels. Maritime Transport Research, 3, 100050. https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100050

90. Chang, C., Kontovas, C., Yu, Q., & Yang, Z. (2021). Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships. Reliability Engineering & System Safety, 207, 107324. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107324

91. De Vos, J., Hekkenberg, R. G., & Valdez Banda, O. A. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. Reliability Engineering & System Safety, 210, 107558. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107558

92. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Добровольська, Л. О., & Козачук, А. В. (2026). Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем. Вісник Херсонського національного технічного університету, 1 (96), 217–225. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.30

93. Волянський, С., Щенявський, Г., Мазур, О., & Очеретна, В. (2026). Причинний аналіз факторів ризику в автономних морських платформах з використанням методу DEMATEL. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, 2 (53), 179–186. https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359955

94. Букарос, А. Ю., Волянська, Я. Б., Волянський, С. М., та ін. (2022). Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології (В. А. Голіков & О. А. Онищенко, наук. ред.). Миколаїв: Іліон. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20279652

95. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2025). Оцінка ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ICO-2025) (матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 25–26 вересня 2025 р., с. 556–558). Миколаїв: НУК імені адмарала Макарова.

96. Fan, C., Wróbel, K., Montewka, J., Gil, M., Wan, C., & Zhang, D. (2020). A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships. Ocean Engineering, 202, 107188. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107188

97. Abudu, R., & Bridgelall, R. (2024). Autonomous Ships: A Thematic Review. World, 5(2), 276–292. https://doi.org/10.3390/world5020015

98. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Волошин, А. О. (2025). Вплив динаміки кліматичних підфакторів на інтегральну ефективність експлуатації автономних морських технічних засобів. У Modern Science, Economy and Digital Innovation (Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, Bucharest, September 10–12, 2025, pp. 126–129). Bucharest, Romania. https://doi.org/10.70286/isu-10.09.2025

99. Tusher, H.M., Munim, Z.H., Notteboom, T.E. *et al.* (2022). Cyber security risk assessment in autonomous shipping.Marit Econ Logist, 24, 208–227. https://doi.org/10.1057/s41278-022-00214-0

100. Volyanskyy, S., Bulgakov, M., Shchenyavskyi, H., & Kotenko, O. (2025). Structural and functional model of autonomous maritime systems management: Modeling and analytical interpretation. У Progressive Approaches in Science and Engineering (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical

Conference, Copenhagen, November 26–28, 2025, pp. 692–696). Copenhagen, Denmark. https://doi.org/10.70286/isu-26.11.2025

101. Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Kozlovska, P., & Ślączka, W. (2024). Enhancing Safety in Autonomous Maritime Transportation Systems with Real-Time AI Agents. Applied Sciences, 15(9), 4986. https://doi.org/10.3390/app15094986

102. Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., & Kostecki, T. (2023). Harnessing AI for Sustainable Shipping and Green Ports: Challenges and Opportunities. Applied Sciences, 14(14), 5994. https://doi.org/10.3390/app14145994

103. Yercan, F., Bolat, P. Lützhöft, M. and Earthy, J. (eds.) (2024) Human-Centred Autonomous Shipping. WMU J Marit Affairs, 24, 465–472 (2025). https://doi.org/10.1007/s13437-025-00386-5

104. Andrei, N., & Scarlat, C. (2024). Marine applications: The Future of Autonomous Maritime Transportation and Logistics. In Revolutionizing Earth Observation – New Technologies and Insights. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1004275

105. Park, H., Kim, J., Jung, M., Kang, S. Y., Kim, D., Kim, C., & Jang, U. (2024). Risk Management Challenges in Maritime Autonomous Surface Ships (MASSs): Training and Regulatory Readiness. Applied Sciences, 15(20), 10993. https://doi.org/10.3390/app152010993

106. Zhao, Y., Zhao, H., Miao, Z., Ai, D., & Wang, Q. (2022). A Numerical Study on the Smoke Dispersion and Temperature Distribution of a Ship Engine Room Fire Based on OpenFOAM. Sustainability, 15(20), 15093. https://doi.org/10.3390/su152015093

107. Roh, E. J., Song, I. S., Kim, S., & Park, S. (2025). Autonomous mission-oriented unmanned underwater vehicle control using directional policy optimization. Ocean Engineering, 320, 120242. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120242

108. Li, J., Zhang, G., Jiang, C., & Zhang, W. (2023). A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions. Ocean Engineering, 285, 115359. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115359

109. Cui, X., Wang, S., Li, B., Yang, D., Ji, Z., Ren, Y., & Xiao, Y. (2026). Joint optimization of support center location and USV-UAV collaborative routing for maritime network under uncertainty: A bilevel programming model. Computers & Industrial Engineering, 214, 111845. https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.111845

110. Yu, H., Ma, Y., & Zhang, Z. (2025). Cooperative search decision-making and path planning methods for multi-UUV search missions under uncertainties. Ocean Engineering, 342, 122875. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122875

111. Ji, X., Sun, K., Liang, H., Guo, X., Yang, X., & Shan, C. (2025). Energy management in hybrid energy system for long-duration stratospheric airship mission. Energy, 324, 136021. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136021

112. Han, M., Fu, X., & Qiu, Q. (2026). Joint optimization of maintenance and spare parts provisioning policies for multi-state protection systems considering mission failures. Expert Systems With Applications, 305, 130832. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130832

113. Hontvedt, M. (2015). Professional vision in simulated environments - Examining professional maritime pilots' performance of work tasks in a full-mission ship simulator. Learning, Culture and Social Interaction, 7, 71–84. https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2015.07.003

114. Mansouri, S. S., Reuthe, E., Boskabadi, M. R., & Savoie, C. J. (2026). AAOSC: Adaptive agent-oriented system control. Current Opinion in Chemical Engineering, 52, 101253. https://doi.org/10.1016/j.coche.2026.101253

115. Wei, S., & Zhang, D. (2026). Critic-only Q-learning for dynamic energy management in wave-powered autonomous surface vehicles. Results in Engineering, 29, 108670. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108670

116. Shehata, A., Zhang, M., Tsoulakos, N., & Kujala, P. (2025). A Transformer based task execution digital twin of 3-DOF maneuvering of Bulk Carrier for autonomous maritime systems. Ocean Engineering, 341, 122797. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122797

117. Han, W., Han, X., Wang, X., Wu, H., Guo, F., Cong, J., & Su, X. (2026). A novel flexible operation mode and mission planning method for shipborne helicopter groups. Defence Technology, 58, 207–232. https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.10.030

118. Martinez-Esteso, J. P., Castellanos, F. J., & Javier Gallego, A. (2026). Enhancing maritime search and rescue: Incremental unsupervised domain adaptation with synthetic data and pseudo-labeling. Expert Systems With Applications, 305, 130864. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130864

119. Волянський, С. М., Бичковський, Ю. В., Мельник, О. М., & Волошин, А. О. (2025). Системний аналіз причин навігаційних інцидентів під час швартування суден та шляхи вдосконалення міжнародної нормативно-правової бази. Системи управління, навігації та зв'язку, 4(82), 5–11. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.005

120. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., & Щербина, О. В. (2025). Методи врахування невизначеності в прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 5(2), 222–234. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.2.23

121. Волянський, С. М., Шумило, О. М., Мельник, О. М., & Котенко, О. В. (2025). Моделювання деградаційних процесів в технічних вузлах морських автономних платформ. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 36(75)(6, ч. 1). https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/36.

122. Melnyk, O., Shcheniavskyi, H., Volyanskyy, S., Koryakin, K., &Kucherenko, V. (2025). Risk-based planning of port network sustainability under conditions of operational uncertainty. Premier Journal of Science, 14, Article 100171. https://doi.org/10.70389/PJS.100171

123. Jia, J., & Lu, S. (2012). A Mission-oriented Risk Assessment Methodology for Naval Vessel Fire Caused by Non-contact Explosions Using Bayesian Networks. Procedia Engineering, 62, 573–580. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.102

124. Hinostroza, M., & Lekkas, A. (2024). Temporal mission planning for autonomous ships: Design and integration with guidance, navigation and control. Ocean Engineering, 297, 117104. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117104

125. Ligneul, C., Saux, É., Olivares, M., Ruichek, Y., & Haralambous, Y. (2026). Integrating ontology with automated action planning for autonomous drone mission management system. Robotics and Autonomous Systems, 202, 105460. https://doi.org/10.1016/j.robot.2026.105460

126. Волянський, С., Мазур, О., & Щенявський, Г. (2026). Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ. Central European Journal of Science and Research, 1(2). https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(1)-8

127. Kilic, K. I., Maity, S., Sung, I., & Nielsen, P. (2025). Challenges and AI-driven solutions in maritime search and rescue planning: A comprehensive literature review. Marine Policy, 178, 106692. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106692

128. Волянський, С. М., Корякін, К. С., Пастернак, О. Я., Щенявський, Г. С. (2025). Експлуатація автономних морських технічних засобів в умовах змінних режимів. У Science and Technology: New Horizons of Development (матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Прага, 13–15 серпня 2025 р., с. 219–222). Prague, Czech Republic. https://doi.org/10.70286/isu-13.08.2025

129. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Шумило, О. М., & Мельник, О. М. (2025). Моделювання сценаріїв деградації технічних вузлів морських автономних платформ. У Innovative Research in Science and Economy (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, December 3–5, 2025, pp. 785–789). Brussels, Belgium. https://doi.org/10.70286/isu-03.12.2025

130. Ding, Y., Meng, W., He, S., & Li, W. (2026). Towards COLREGs-aware ship collision avoidance with multi-agent PPO-LSTM in maritime IoT. Journal of Network and Computer Applications, 251, 104511. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2026.104511

131. Shi, M., Zhu, J., & Yang, X. (2026). A hierarchical heterogeneous cooperative learning framework for energy-constrained multi-agent search missions. Ocean Engineering, 357, 125480. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125480

132. YANG, Z., QI, H., GAO, X., & ZHU, R. (2026). A two-stage approach for multi-UAV mission planning in vessel logistics services. Chinese Journal of Aeronautics, 104157. https://doi.org/10.1016/j.cja.2026.104157

133. Wang, H., Yu, S., Chen, D., & Xiao, J. (2024). Mission-oriented situation awareness information requirements of submariners: A goal directed task analysis. Ocean Engineering, 299, 117200. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117200

134. Wei, F., Ma, X., Qiu, Q., Ma, Y., Wang, J., & Yang, L. (2026). Adaptive mission risk control under incomplete health information and resource limitation: A constrained multi-state predictive maintenance model. Reliability Engineering & System Safety, 266, 111697. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111697

135. Wu, Y., Chen, H., & Chen, J. (2026). A path planning method for USV in maritime SAR missions based on improved deep Q-network. Ocean Engineering, 353, 124795. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124795

136. Bergsma, J., Wiarda, M., Pruyn, J., & Van de Kaa, G. (2026). Anticipatory governance of a maritime mission using a real-time mission-oriented transition assessment. Environmental Innovation and Societal Transitions, 60, 101128. https://doi.org/10.1016/j.eist.2026.101128

137. Chen, H., Li, Y., Feng, B., Xu, Q., Zhang, X., Zheng, J., & Zhu, J. (2025). Mission-oriented secure semantic satellite communication. Physical Communication, 72, 102806. https://doi.org/10.1016/j.phycom.2025.102806

138. Dosi, G., Lamperti, F., Mazzucato, M., Napoletano, M., & Roventini, A. (2023). Mission-oriented policies and the «Entrepreneurial State» at work: An agent-based exploration. Journal of Economic Dynamics and Control, 151, 104650. https://doi.org/10.1016/j.jedc.2023.104650

139. Li Vigni, M., Governale, G., & Romano, M. (2026). A comprehensive review of tethered satellite system missions: Fundamentals, evolution and trend. Acta Astronautica. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2026.04.023

140. Fastenrath, S., Tavassoli, S., Sharp, D., Raven, R., Coenen, L., Wilson, B., & Schraven, D. (2023). Mission-Oriented Innovation Districts: Towards challenge-led, place-based urban innovation. Journal of Cleaner Production, 418, 138079. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138079

141. Beysens, D., & Chen, L. (2025). Thermal, mass and momentum transport phenomena as a necessary step to process wastes during long duration space missions by supercritical water oxidation. The Journal of Supercritical Fluids, 224, 106658. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106658

142. Grazioso, G., De Marco, A., Della Vecchia, P., Di Stasio, M., Trifari, V., & Nicolosi, F. (2025). A simulation-based mission optimization approach for regional transport hybrid-electric aircraft. Applied Energy, 402, 126869. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126869

143. Cai, Y., He, Y., Shi, R., Liao, R., Cao, H., Guo, H., & Lu, H. (2024). Resilience-oriented adaptive predictive maintenance optimization for continuous process manufacturing systems considering mission profile variation. Computers & Industrial Engineering, 197, 110532. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110532

144. García Casañas, C., & Kovacic, Z. (2025). Implementing the twin transitions: A critical perspective from the Spanish energy sector. Environmental Science & Policy, 164, 104012. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104012

145. Choi, S. C., Lee, Y., & Cho, S. W. (2025). Reinforcement learning-integrated evolutionary algorithm for enhanced unmanned aerial vehicle coverage path planning. Swarm and Evolutionary Computation, 97, 102051. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2025.102051

146. Ikonen, E., Andreassen, N., & Elvegård, R. (2026). Uncertainty under collaboration: A case of a maritime radiological and nuclear incident in the Arctic. Safety Science, 197, 107137. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107137

147. Yin, X., Yu, Q., Geng, X., & Yue, H. (2026). H-MAES: A hierarchical planner-controller framework for disturbance-aware maritime navigation. Ocean Engineering, 356, 125175. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125175

148. Jolly, S., Asheim, B., Benner, M., Calignano, G., Eadson, W., Gong, H., & Nilsen, T. (2025). Future-oriented green and just regional industrial path development: Towards a critical examination. Progress in Economic Geography, 3 (2), 100049. https://doi.org/10.1016/j.peg.2025.100049

149. Shao, Z., Yin, Y., Lyu, H., Jing, Q., & Cheng, T. (2025). A deep learning-driven network for joint low-light enhancement and deblurring in maritime surveillance systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 161, 112107. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112107

150. Huy, P. V. (2026). Structuring a national approach to maritime decarbonization in Vietnam: A conceptual framework. Case Studies on Transport Policy, 24, 101785. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2026.101785

151. Gao, Z., Li, Y., Shao, Y., Tao, F., Wang, Z., & Chen, G. (2026). HPRT-YOLO: Enhanced lightweight UAV maritime search and rescue model based on YOLOv11n. IScience, 29(4), 115366. https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.115366

152. Guo, J., Hou, Y., Liang, X., Yang, H., & Xiong, Y. (2022). Mission-driven path planning and design of submersible unmanned ship with multiple navigation states. Ocean Engineering, 263, 112363. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112363

153. Tranos, T., Chaysri, P., Spatharis, C., & Blekas, K. (2026). A multi-task reinforcement learning framework for resilient autonomous USV navigation. Ocean Engineering, 357, 125549. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125549

154. Ge, H., Li, M., Wen, G., & Lu, Y. (2026). Safety-assured decision support for ASV navigation via hybrid graph planning and timed automata verification. Expert Systems With Applications, 312, 131367. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.131367

155. Liu, Z., Luo, M., Ma, Y., Xing, C., Wang, R., Chen, D., & Wang, X. (2026). A methodology for constructing the system-of-systems environment to evaluate UAV decision systems. Defence Technology, 56, 337–351. https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.09.029

156. Sun, X., Liu, H., Wu, G., & Zhou, Y. (2018). Training effectiveness evaluation of helicopter emergency relief based on virtual simulation. Chinese Journal of Aeronautics, 31(10), 2000–2012. https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.011

157. Azofra, M., Pérez-Labajos, C., Blanco, B., & Achútegui, J. (2007). Optimum placement of sea rescue resources. Safety Science, 45(9), 941–951. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.09.002

158. Ma, Q., Zhang, D., Wan, C., Zhang, J., & Lyu, N. (2022). Multi-objective emergency resources allocation optimization for maritime search and rescue considering accident black-spots. Ocean Engineering, 261, 112178. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112178

159. Zhong, S., & Wang, L. (2025). Deprivation cost theory in humanitarian relief: A literature review and prospects. Socio-Economic Planning Sciences, 98, 102168. https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102168

160. Wang, X., Wu, Z., & Shao, J. (2024). Relief supply prepositioning strategies via option contract reserve fleet vehicles. Computers & Industrial Engineering, 191, 110152. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110152

161. Mura, E., Bay, C., Schito, E., Conti, P., Testi, D., & Raugi, M. (2026). Comparative analysis of model predictive control and MPC-informed Rule-Based control for thermal storage operation in Ultra-Low temperature 4th generation district heating networks. Energy Conversion and Management, 356, 121241. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121241

162. Vaughan, N., & Rashid, A. (2026). Comparison of model Predictive control (MPC) algorithms to optimise blood glucose in fully closed loop (FCL) systems. International Journal of Medical Informatics, 212, 106361. https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2026.106361

163. Hajialigol, P., Papadopoulos, P., Moazami, A., & Aghaei, M. (2026). A hierarchical energy management system for a cluster of buildings: Reinforcement learning and model predictive control (RL-MPC) approach. Energy and Buildings, 353, 116879. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116879

164. Zhu, Q., Zhao, Z., & Liu, F. (2025). Implementing quality-by-design latent-variable model predictive control (QbD-LV-MPC) for batch processes: An updating policy for batch profiles. Journal of Process Control, 156, 103576. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2025.103576

165. Hou, C. L., Yu, W., Chiang, M. H., & Cheng, P. W. (2025). Stochastic model predictive control of a 10-MW semi-submersible floating offshore wind turbine: A comparative study with gain-scheduled PI, LQR and MPC controllers. Ocean Engineering, 340, 122431. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122431

166. Morato, M. M., & Felix, M. S. (2024). Data Science and Model Predictive Control: A survey of recent advances on data-driven MPC algorithms. Journal of Process Control, 144, 103327. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2024.103327

167. Li, Y., Yao, H., Huang, C., Zhang, S., Su, Z., & Dai, H. (2024). MPC-SCBF: Model Predictive Control with Social Zone-Driven Control Barrier Function for Socially-Aware Following Robots. Procedia Computer Science, 271, 252-258. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.10.140

168. Qiao, R., & Fan, S. (2026). Human-machine interaction for maritime transport using a data-driven approach. Reliability Engineering & System Safety, 267, 111956. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111956

169. Fan, Y., Wang, X., Zhu, A., Shao, J., & Liang, L. (2024). Measuring the shortage cost through deprivation and envy in collaborating contract between the local authority and the enterprise. International Journal of Production Economics, 271, 109226. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109226

170. Zhang, Y., Liu, Y., & Wu, J. (2026). Multi-objective scheduling optimization for helicopter-vessel maritime joint rescue considering psychological panic. Applied Soft Computing, 198, 115254. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2026.115254

171. Lyimo, M., Mgawe, B., Leo, J., Dida, M., & Michael, K. (2026). LSTM-based deep reinforcement learning for ISI mitigation in maritime LoRaWAN. Physical Communication, 75, 103063. https://doi.org/10.1016/j.phycom.2026.103063

172. Singh, S., Emrouznejad, A., & Pratap, S. (2025). Achieving net zero: Enhancing maritime port efficiency through multi-objective integrated DEA-MORCOS. Case Studies on Transport Policy, 22, 101597. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101597

173. Lu, X., Zeng, S., Guo, J., Deng, W., He, M., & Che, H. (2024). An integrated method of extended STPA and BN for safety assessment of man-machine phased-mission system. Reliability Engineering & System Safety, 253, 110569. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110569

174. Xu, H., Xie, Z., Sheng, S., & Song, K. (2026). Balancing real-time and batch data collection for AoI minimization in UAV-assisted maritime networks. Robotics and Autonomous Systems, 202, 105474. https://doi.org/10.1016/j.robot.2026.105474

175. Song, Y., Wang, D., Che, J., Cai, C., Xiong, X., Zhang, Y., & Cheng, X. (2026). Double QMIX: A global optimization framework for multi-agent cooperative path planning in maritime SAR. Ocean Engineering, 353, 124822. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124822

176. Mahmoud Zadeh, S., & Yazdani, A. (2023). Distributed task allocation and mission planning of AUVs for persistent underwater ecological monitoring and preservation. Ocean Engineering, 290, 116216. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116216

177. Wang, X., Liu, J., Nugent, C. D., Xu, S., & Wu, G. (2026). Team collaboration-oriented multi-agent pathfinding and probabilistic verification. Information Fusion, 130, 104125. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2026.104125

178. Wang, H., Li, J., Tao, H., Liu, J., Li, C., Wang, K., & Xu, M. (2025). Autonomous dynamic formation for maritime target tracking using multi-agent reinforcement learning. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 154, 110904. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110904

179. Nosar, N. S. (2026). Megaprojects as regime transformers: Analyzing the role of Norway's carbon capture and storage megaproject on port transition to energy hubs. Energy Research & Social Science, 135, 104698. https://doi.org/10.1016/j.erss.2026.104698

180. O'Neil, R., Khatab, A., Diallo, C., & Venkatadri, U. (2022). Optimal joint maintenance and orienteering strategy for complex mission-oriented systems: A case study in offshore wind energy. Computers & Operations Research, 149, 106020. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106020

181. Zhang, Q., Liu, J., Lin, W., Yang, X., Yu, H., Zeng, Y., & Liu, Y. (2025). Dual-layer energy management strategy for offshore wind-solar off-grid hydrogen production system. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 83, 104646. https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104646

182. Rashid, M. T., Siddique, M. J., & Shaqur, A. (2025). MAVREN: A multilayered adaptive framework for deploying vision-language models on resource-constrained unmanned aerial vehicles for autonomous search and rescue. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 162, 112498. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112498

183. Zhao, H., Stansby, P., Liao, Z., & Li, G. (2024). Multi-objective optimal control of a hybrid offshore wind turbine platform integrated with multi-float wave energy converters. Energy, 312, 133547. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133547

184. Ahmadian, H., Arefi, M. M., Khayatian, A., & Montazeri, A. (2025). A barrier Lyapunov-based fast adaptive robust control system for 6-DOF autonomous submersible vehicles. Robotics and Autonomous Systems, 194, 105115. https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.105115

185. Zhao, T., Li, J., Zhang, C., & Pang, D. (2025). Vision-based active stabilization and autonomous docking for serial-parallel hybrid gangway systems. Ocean Engineering, 340, 122436. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122436

186. Hu, Y., Han, X., Wang, M., Lukinykh, V. F., Liu, J., & Zhuang, X. (2025). Optimization of ship-deployed AUVs synergistic scheduling for offshore wind turbines underwater foundations inspection. Computers & Operations Research, 181, 107080. https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107080

187. Chettri, A. P., & R, N. (2025). Comprehensive review of wireless power transfer for autonomous underwater vehicles: Technological innovations, challenges,

and future prospects. E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 13, 101079. https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101079

188. Li, G., Salem, M., Hamad, K. B., Senjyu, T., & Ueda, S. (2025). Adaptive-robust control for frequency and voltage stability in multi-terminal DC wind energy systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 170, 110957. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110957

189. Han, Z., Zhang, D., Fan, L., Zhang, J., & Zhang, M. (2023). A Dynamic Bayesian Network model to evaluate the availability of machinery systems in Maritime Autonomous Surface Ships. Accident Analysis & Prevention, 194, 107342. https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107342

190. Mitchell, D., et al. (2022). A review: Challenges and opportunities for artificial intelligence and robotics in the offshore wind sector. Energy and AI, 8, 100146. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100146

191. Sheng, L., Ye, H., Meng, Y., & Song, C. (2025). An adaptive output feedback formation control algorithm for multiple unmanned surface vehicles based on virtual structure and line-of-sight guidance. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 157, 111213. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111213

192. Chen, M., Li, S., Sun, Y., Zhao, Y., & Wang, R. (2025). MODWT-based multiscale wavelet LQR strategy and active-inerter tuned mass damper for structural vibration control of floating offshore wind turbines. Ocean Engineering, 336, 121678. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121678

193. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., & Voloshyn, A. (2022). Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 114, 91–101. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8

194. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Pavlova, N., Kravchenko, O., & Borovyk, S. (2022). Integrated ship cybersecurity management as a part of maritime safety and security system. International Journal of Computer Science and Network Security, 22, 135–140. https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18

195. Melnyk, O., & Onyshchenko, S. (2022). Ensuring safety of navigation in the aspect of reducing environmental impact. Lecture Notes in Networks and Systems, 463, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9

196. Volyanskyy, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianska, Y., Kurdiuk, S., Shcherbina, O., & Dobrovolska, L. Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling risk topology in autonomous maritime systems. Transportation Safety and Environment. https://doi.org/10.1093/tse/tdag040

197. Volyanskaya, Y., & Volyanskiy, S. (2017). Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9–85), 26–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91966

198. Miao, Z., Zhang, X., Ma, D., & Qiao, L. (2026). Fuzzy prescribed performance backstepping control for ship roll chaotic motion under actuator faults. Ocean Engineering, 359, 125909. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125909

199. Burmaka, I., Vorokhobin, I., Melnyk, O., Burmaka, O., & Sagin, S. (2022). Method of prompt evasive maneuver selection to alter ship's course or speed. Transactions on Maritime Science, 11(1). https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01

200. Wanderlingh, F., Simetti, E., & Indiveri, G. (2025). Marine robot control. In Encyclopedia of Systems and Control Engineering (Vol. 4, pp. 262–273). https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14081-5.00149-5

201. Yasir, M., Liu, S., Xu, M., Sheng, H., Aguilar, F. J., Do Lago Rocha, R., De Figueiredo, F. A., Isiacik Colak, A. T., & Hossain, M. S. (2026). SSGNet: A single-source generalization model for ship detection in UAV imagery under challenging maritime environments. Ocean Engineering, 348, 124120. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124120

202. Yang, R., & Utne, I. B. (2022). Towards an online risk model for autonomous marine systems (AMS). Ocean Engineering, 251, 111100. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111100

203. Sulkowski, B., & Collette, M. (2024). A comparison of machine learning classifiers in predicting safety for a multi-component dynamic system representation of an autonomous vessel. Applied Ocean Research, 154, 104368. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104368

204. Huang, M., Li, X., Li, Z., Zhang, D., & Chen, Y. (2025). Uncertainty-aware deep distributed reinforcement learning for autonomous navigation of unmanned surface vehicles in complex environments. Ocean Engineering, 342, 122899. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122899

205. Kumar, M., Rattan, N., & Mondal, S. (2026). Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. Measurement, 258, 119215. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119215

206. Christensen, K. A., Gusev, A., Tufte, A. G., Alsos, O. A., & Steinert, M. (2025). AI captain: Conversational mission planning and execution system for autonomous surface vehicles. Ocean Engineering, 338, 121988. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121988

207. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Сучасні системи автоматизованого керування електрорушіями автономних плавальних апаратів. У Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 24–25 березня 2022 р., с. 29–30). Одеса.

208. Chu, S., Lin, M., Li, D., Lin, R., & Xiao, S. (2025). Adaptive reward shaping based reinforcement learning for docking control of autonomous underwater vehicles. Ocean Engineering, 318, 120139. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120139

209. Chen, X., Bose, N., Brito, M., Khan, F., Millar, G., Bulger, C., & Zou, T. (2022). Risk-based path planning for autonomous underwater vehicles in an oil spill environment. Ocean Engineering, 266, 113077. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113077

210. Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., Vorokhobin, I., Mazur, O., & Onishchenko, O. (2022). Marine ship’s course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of the Naval Academy, 25(1), 23–35. https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-003

211. Khalil, S., Wang, Z., & Aouf, N. (2025). Hybrid deep learning based monocular pose estimation for autonomous space docking operations. Acta Astronautica, 238, 612–629. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.10.010

212. Liu, X., & Xie, S. (2024). Innovative strategy and practice of using underwater robot for marine cable inspection and operation and maintenance. Cognitive Robotics, 5, 226–239. https://doi.org/10.1016/j.cogr.2025.06.001

213. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Концепція побудови сучасних інтелектуальних систем управління автономними об’єктами, що функціонують в умовах невизначеності навколишнього середовища. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2022) (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 12 травня 2022 р., с. 29–30). Військова академія (м. Одеса).

214. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових безпілотних морських апаратів-дронів. У Національна безпека України в умовах воєнного стану: проблеми та шляхи їх вирішення (матеріали VIII Всеукраїнської курсантсько-студентської науково-практичної конференції, Одеса, 24 березня 2023 р., с. 15–17). Військова академія (м. Одеса).

215. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 5–6 квітня 2023 р., с. 46–49). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

216. Gomola, A., & Utne, I. B. (2024). A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. Heliyon, 10(10), e31483. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31483

217. Volyanskiy, S., Melnyk, O., Dobrovolska, L., & Kozachuk, A. (2026). Adaptive fault-tolerant control of an unmanned surface vehicle under actuator degradation and external disturbances. Advances in Oceanography & Marine Biology, 5(1), 1–6. https://doi.org/10.33552/AOMB.2026.05.000602

218. Abdulai, S. F., Zayed, T., Wuni, I. Y., Antwi-Afari, M. F., & Yussif, A. (2025). Cross-industry review of autonomous alignment technologies: Adaptation potential for modular construction. Journal of Cleaner Production, 495, 145101. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145101

219. Sardar, A., Islam, R., Anantharaman, M., & Garaniya, V. (2025). Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: A systematic review. Marine Pollution Bulletin, 214, 117688. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117688

220. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2025). Оцінка ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ICO-2025) (матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 25–26 вересня 2025 р., с. 556–558). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

221. Xia, X., Li, L., Volyanskyy, S., Zhang, Z., & Liu, W. (2025). Trajectory Tracking and Collision Avoidance Control for USV Swarm Based on Obstacle-Avoidance Yaw Reference Angle. Information and Control. https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2025.0762

222. Волянський, С. М., Галаган, С. М., Мазур, О. М., Налева, Г. В., Корбан, В. Х., Яременко, В. А., & Онищенко, О. А. (2024). Нечіткі системи управління електромеханічними системами малих безпілотних морських суден. Вісник Одеського національного морського університету, 75, 35-42. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

223. Волянський, С., Мельник, О., Волошин, А., & Добровольська, Л. (2026). Роль інформаційного забезпечення в експлуатації автономних морських платформ. Вісник Одеського національного морського університету, (79), 172–186. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2026-1-172-186

224. Волянський, С., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Спрощена 3-DOF динамічна модель керування автономною морською платформою в умовах хвильових перешкод. Central European Journal of Science and Research, 2 (2), 81–91. https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(2)-6

225. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Shibaev, O., & Volyanskaya, Y. (2024). A comprehensive approach to structural integrity analysis and maintenance strategy for ship's hull. Journal of Maritime Research, 21(1), 36–44.

226. Melnyk, O., Onishchenko, O., & Onyshchenko, S. (2020). Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. Technology Audit and Production Reserves, 6 (2), 66–70. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.221653

227. Melnyk, O., Kuznichenko, S., & Onishchenko, O. (2024). Impact of AIS manipulation on shipping safety and strategic countermeasures. Lex Portus, 10(4), 31–39. https://doi.org/10.62821/lp10403

228. Palbar Misas, J. D., Hopcraft, R., Tam, K., & Jones, K. (2024). Future of maritime autonomy: Cybersecurity, trust and mariner's situational awareness. Journal of Marine Engineering & Technology,23 (3), 224–235. https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2330176

229. Orye, E., Visky, G., Rohl, A., & Maennel, O. (2024). Enhancing the cyber resilience of sea drones. In C. Kwan, L. Lindström, D. Giovannelli, K. Podiņš, & D. Štrucl (Eds.), Proceedings of the 16th International Conference on Cyber Conflict: Over the Horizon (pp. 83–100). NATO CCDCOE Publications.

230. Lin, N., Yan, X., Liu, J., Li, S., & Li, C. (2024). Towards reliable control takeover in ship remote-control system: A cyber-physical fusion testing approach.

Journal of Marine Engineering & Technology, 24 (2), 108–120. https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2440171

231. Symes, S., Blanco-Davis, E., Graham, T., Wang, J., & Shaw, E. (2025). The survivability of autonomous vessels from cyber-attacks. Journal of Marine Engineering & Technology, 24(3), 194–216. https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2428022

232. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. (2025). Safety and efficiency of human–MASS interactions: Towards an integrated framework. Journal of Marine Engineering & Technology, 24(3), 159–178. https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2414959

233. Martelli, M., & Geertsma, R. D. (2024). Naval engineering and ship control special edition III. Journal of Marine Engineering & Technology, 23(3), 155–156. https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2345220

234. Onishchenko, O., Shumilova, K., Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., & Volianskyi, Y. (2022). Ensuring cyber resilience of ship information systems. TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 16(1), 43–50. https://doi.org/10.12716/1001.16.01.04

235. Kurdiuk, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskiy, S., Shevchenko, V., & Alieksieichuk, B. (2026). Practical aspects of creating a data transmission system for controlling unmanned surface vehicles in unstable communication channels. System Research and Information Technologies, (1), Article 05. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2026.1.05

236. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime autonomous surface ships using team cognitive work analysis. Regional Studies in Marine Science, 90, 104477. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477

237. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Мазур, О. М., & Онищенко, О. А. (2026). Інтеграція цифрових двійників у процес управління експлуатацією автономних морських платформ. Наука і техніка сьогодні, 2(56), 1659–1677. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2(56)-1659-1677

238. Sokol, M., Holuša, J., Volf, P., Buršík, D., Matějka, M., Adameková, K., Uxa, T., Luzzatto-Knaan, T., Szymszová, S., Leová, L., Lin, Y., Hsu, W., Huang, K., Hejda, J., & Kutílek, P. (2026). Antarctic expedition at J. G. Mendel Station: An operational and scientific overview and its potential as a space analog environment. Acta Astronautica, 239, 239–255. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.11.023

239. Zhu, F., Pan, B., & Im, N. (2025). DMODT: Dynamic maritime environment object detection and tracking model for MASS. Ocean Engineering, 340, 122270. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122270

240. Li, H., Meng, X., Zhang, W., Chen, G., & Yang, X. (2025). Towards the development of a systems-theoretic model for safety assessment of arctic offshore drilling activities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 98, 105731. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105731

241. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Мельник, О. М., & Добровольська, Л. О. (2026). Інтеграція інформаційних потоків для підвищення ефективності експлуатаційного управління автономними морськими платформами. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 1(1), 49–57. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.1.1.5

242. Волянський, С. М., Булгаков, М. П., Щенявський, Г. С., Котенко, О. В. (2025). Морські автономні технічні засоби як компонент кіберфізичних систем безпеки морського середовища. У Innovative Approaches in Modern Science and Technology (Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Lisbon, November 12–14, 2025, pp. 636–640). Lisbon, Portugal. https://doi.org/10.70286/ISU-12.11.2025

243. Волянський, С. М., Пуляєв, І. О., & Добровольска, Л. О. (2026). Інформаційні потоки та моніторинг технічного стану автономних морських платформ. У Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers with(Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference (с. 443–446). International Scientific Unity. Афіни, Греція, 11–13 лютого 2026. https://doi.org/10.70286/isu-11.02.2026

244. Zhang, H., Zang, W., Yao, P., Cao, J., & Song, D. (2025). A hierarchical reinforcement learning framework with imitation learning and Bayesian Actor–Critic for distributed unmanned underwater vehicle encirclement in dynamic maritime environments. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 162, 112214. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112214

245. Tsuji, T., Imam, T., Ahmad, A., Sakamoto, K., Kioka, A., Tsuru, T., Hutapea, F., Ueki, M., Kuo-Chen, H., Guan, Z., & Lin, C. (2026). A compact, low-impact seismic source reshapes monitoring of offshore CO2 storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 153, 104644. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2026.104644

246. Harris, C. B., Benjamins, S., Scott, B., & Williamson, B. J. (2025). Ecological impacts of floating offshore wind on marine mammals and associated trophic interactions: Current evidence and knowledge gaps. Marine Pollution Bulletin, 218, 118059. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118059

247. Chen, J., Hann, M., Rawlinson-Smith, R., Raji, M., & Greaves, D. (2026). Nearshore wind estimation from buoy wave spectra via physics-guided machine learning: A framework for offshore wind applications. Renewable Energy, 259, 125000. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.125000

248. Savari, A., Alnefaie, K., & Singh, N. S. S. (2026). A state of the art review on condition monitoring, defect evaluation, and failure prediction of offshore pipelines under extreme loading: Experimental, theoretical, and numerical techniques. Marine Structures, 109, 104060. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2026.104060

249. Wang, B., Xu, Q., & Yang, Y. (2026). An integrated systems engineering framework for collaborative control and autonomous operation of offshore wind turbines. Ocean Engineering, 348, 124060. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124060

250. Ambarita, E. E., Karlsen, A., Osen, O., & Hasan, A. (2023). Towards fully autonomous floating offshore wind farm operation and maintenance. *Energy* Reports, 9(4), 103–108. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.148

251. Noshchenko, O., Hagspiel, V., & Deshpande, P. C. (2025). Assessing the sustainability of offshore platform power supply alternatives using multi-criteria decision analysis: A case study of Norway. Science of the Total Environment, 973, 179053. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179053

252. Ahmad, A., Li, P., Piechocki, R., & Inacio, R. (2025). Anomaly detection in offshore open radio access network using long short-term memory models. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 161, 112274. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112274

253. Li, H., Hao, L., Zhu, Z., Xu, W., Feng, J., & Wei, H. (2025). Real-time gas dispersion model prediction on offshore platforms based on CNN–Transformer model. Process Safety and Environmental Protection, 107983. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107983

254. Li, Z., Mao, Z., Zhang, D., Fan, S., Lyu, W., Zhou, J., & Yang, H. (2025). Mental workload–performance relationships in maritime autonomous surface ship remote control scenarios. Ocean Engineering, 339, 122094. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122094

255. Zhang, M., Tao, L., Nuernberg, M., Rai, A., & Yuan, Z. (2024). Conceptual design of an offshore hydrogen platform. International Journal of Hydrogen Energy, 59, 1004–1013. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.077

256. Larsen, J. S., Pedersen, S., Liniger, J., & Sørensen, F. F. (2026). Offshore subsea IMR operations: Review of the automation potential. Robotics and Autonomous Systems, 105365. https://doi.org/10.1016/j.robot.2026.105365

257. Wang, Q. (2024). Maritime law enforcement concerning offshore energy platforms: Navigating international law constraints and challenges. Marine Policy, 170, 106370. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106370

258. Guo, D., Yin, Y., Jing, Q., Shao, Z., & Xu, H. (2026). LiDAR intensity-enhanced 3D object detection method for maritime autonomous navigation. Ocean Engineering, 343, 123586. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123586

259. Brushane, F., Jämsä, K., Lafond, S., & Lilius, J. (2020). An experimental research platform for maritime automation and autonomous surface ship applications. IFAC-PapersOnLine, 54(16), 390–394. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.121

260. Yu, H., Wu, D., Li, G., Lian, T., Li, Y., & Li, F. (2026). Collision avoidance for maritime autonomous surface ships in busy waterways based on improved deep reinforcement learning and K-means clustering. Ocean Engineering, 343, 123396. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123396

261. Xu, Y., Peng, Z., Gu, N., Zhang, G., & Han, B. (2025). Anti-disturbance line-of-sight path following of dual-podded maritime autonomous surface ships: A case study of XIN HONG ZHUAN. Ocean Engineering, 341, 122468. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122468

262. Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of human–machine cooperation in maritime autonomous surface ships. Autonomous Transportation Research. https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001

263. Othman, M. K., Mohd Sabri, N. S. A., Abdul Rahman, N. S. F., & Osnin, N. A. (2025). Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia. Case Studies on Transport Policy, 22, 101567. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567

264. Belabyad, M., Pyne, R., Paraskevadakis, D., Chang, C., & Kontovas, C. (2025). Technology evolution in maritime autonomous systems: A patent-based analysis. Ocean & Coastal Management, 267, 107744. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107744

265. Reshetkov, D., Bondaryuk, M., & Onyshchenko, S. (2023). Essence, advantages and existing experience of smart ports development. Transport Development, 4(15), 108–122. https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.09

266. Chymshyr, V. (2023). Conceptual principles of improving the safety and reliability of autonomous technical systems using a ship as an example. Transport Development, 1(16), 79–88. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.07

267. Melnyk, O., Onyshchenko, O., Voloshyn, A., Vasalatii, N., Lohinov, O., & Koriakin, K. (2022). Development of remote technologies of ship control as a factor for ensuring shipping safety. Transport Development, 3 (14), 179–191. https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13

268. Deo, I. K., Venkateshwaran, A., & Jaiman, R. K. (2026). A physics-guided probabilistic surrogate modeling framework for digital twins of underwater radiated noise. Ocean Engineering, 358, 125461. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125461

269. Korkut, T. B., & Rachid, A. (2026). Toward aquaponics digital twin: Standardized measurement protocols and dynamic modeling. IFAC Journal of Systems and Control, 36, 100421. https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2026.100421

270. Fratta, M., Floris, A., Porcu, S., & Atzori, L. (2026). The human digital twin for service management: Architecture and user modeling. Computer Communications, 253, 108526. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2026.108526

271. Al-Ghamdi, F. D., & Krarti, M. (2026). Review of digital twin modeling approaches and applications for building energy performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 238, 117077. https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117077

272. Li, W., Zhu, J., Zhang, J., Wu, J., Zhu, Q., & Dehbi, Y. (2026). Spatial modelling for bridge construction environment towards geospatial digital twin. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 149, 105296. https://doi.org/10.1016/j.jag.2026.105296

273. Hill, J., Vila-Concejo, A., & Lee, K. C. (2026). Toward a digital twin of the Great Barrier Reef: Impact of extreme model resolution on tidal simulations. Ocean Modelling, 202, 102723. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2026.102723

274. Chen, J., Wang, W., Liu, Z., Zheng, C., Liu, Y., & Wang, J. (2026). A Diffusion Model with Key Node Feature Guidance for Digital Twin of Rocket Engine Frames under Variable Working Conditions. Reliability Engineering & System Safety, 112831. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112831

275. Zhang, X., Cheng, Q., Lin, Z., Zhang, Y., Yan, J., Zhang, T., & Liu, Z. (2026). A method for constructing digital twins of production lines based on an

object-oriented distributed model-free adaptive algorithm. Applied Soft Computing, 193, 114857. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2026.114857

276. Jayabal, R. (2025). AI-driven revolution in subsurface gas storage: Addressing operational and environmental challenges. International Journal of Hydrogen Energy, 140, 298–314. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.260

277. Xu, D., Wu, L., Gao, Q., Liu, C., & Li, G. (2026). Application of small habitat collaborative ant colony optimization algorithm in the design of offshore platform pipe routing. Journal of Ocean Engineering and Science. https://doi.org/10.1016/j.joes.2026.04.002

278. Chen, B., Liu, K., Rong, H., & Ringsberg, J. W. (2025). Ship collision and offshore renewable energy: Challenges and innovations for structural resilience. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 226, 116510. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116510

279. Liu, K., Cai, B., Xie, Y., Kim, H. J., Mohd, M. H., Liu, Y., & Paik, J. K. (2026). Digital healthcare engineering for enhancing the safety and sustainability of aging jacket platforms: A comprehensive review and gap analysis. Safety Science, 199, 107175. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107175

280. Din, M. U., Akram, W., Bakht, A. B., & Hussain, I. (2026). LLM–VLM fusion framework for autonomous maritime port inspection using a heterogeneous UAV–USV System. Alexandria Engineering Journal, 141, 305–322. https://doi.org/10.1016/j.aej.2026.03.013

281. Pan, Y., Jin, Y., Yin, Z., Chen, W., Yang, D., & Chen, X. (2026). Digital twin framework with dynamic model updating for automated land reclamation. Automation in Construction, 187, 106959. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106959

282. Mei, X., Guo, C., Li, Z., Bo, T., Zhang, S., Chen, X., & Cheng, H. (2026). A digital twin model for top beam stress monitoring based on multi-source data fusion. Measurement, 277, 121606. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.121606

283. Sim, K., & Lee, K. (2026). A Structural Response Prediction of Multi-Linked Floating Offshore Structures for Digital Twin Implementation Using Krylov

Subspace-Based Model Order Reduction. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 100769. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100769

284. Azimi, M. S., Cheraghi, M., & Zaidi, H. (2026). A Digital Twin Framework for Modeling Multi-Organ Radiomics Stability in Total-Body PET Imaging. *Academic Radiology*. https://doi.org/10.1016/j.acra.2026.03.043

285. Liu, Z., Namaki-Araghi, S., Sarkar, A., Lakani, E., Archimede, B., & Karray, M. H. (2026). An ontology-driven approach to target manufacturing digital models' interoperability in developing digital twins. Information and Software Technology, 196, 108147. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2026.108147

286. Ali, M. U., Zafar, A., Masood, H., Dong, J. J., & Lee, S. W. (2026). A review of the emergence of AI-driven cognitive digital phenotyping: Multimodal sensing, foundation models, and the path toward digital twins for human cognition. Computer Science Review, 62, 100994. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2026.100994

287. Xiao, M., Cui, S., & Wang, L. (2026). Digital twin-based integrated modeling and maintenance framework in the power grid data center scenario. Cyber-Physical Energy Systems. https://doi.org/10.1016/j.cpes.2026.01.001

288. Guo, H., Liu, X., Wang, C., Wang, F., & Hui, C. (2026). A Merging-Assembly Strategy for Complex Scenario-Oriented Digital Twin Modeling. Digital Engineering, 100117. https://doi.org/10.1016/j.dte.2026.100117

289. Theivendren, P., Panneerselvam, S., Kunjiappan, S., Mani, D., & Parthasarathy, A. K. (2026). Medical digital twin insights: Enhancing cancer treatment through generative modeling. Computational Biology and Chemistry, 124, 109074. https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2026.109074

290. Sun, L., Wang, L., Jiang, Q., & Zhao, Z. (2026). AI-driven efficiency: Artificial intelligence patents and operational performance in China's fisheries industry. Aquaculture, 621, 743995. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2026.743995

291. Mohammadi, S., Berg, C. F., & Schümann, H. (2025). Low-emission offshore oil and gas production: A review of achievements and challenges. Journal of Cleaner Production, 525, 146504. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146504

292. Li, H., Meng, X., Zhang, W., Chen, G., & Yang, X. (2025). Towards the development of a systems-theoretic model for safety assessment of arctic offshore drilling activities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 98, 105731. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105731

293. He, H., Chen, Y., Ren, Q., Yu, Y., Shi, K., & Yuan, J. (2026). Data-mechanism hybrid-driven operational energy efficiency prediction model for cutter suction dredger: Balancing interpretability and accuracy. Ocean Engineering, 356, 125250. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125250

294. Ambarita, E. E., Karlsen, A., Osen, O., & Hasan, A. (2023). Towards fully autonomous floating offshore wind farm operation & maintenance. Energy Reports, 9, 103-108. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.148

295. Xu, D., Yang, J., Zheng, H., Chen, B., Yan, D., Fan, J., Tang, Q., & Zhou, Y. (2026). Digital twin system for deepwater well construction: Enhancing operational efficiency and safety. Ocean Engineering, 352, 124378. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124378

296. Volianskyi, S. M., Volianska, Ya. B., & Onyshchenko, O. A. (2020). Trends in the development of multipurpose autonomous dual-use underwater vehicles. In Proceedings of the XX Scientific and Technical Conference «Creation and Modernization of Armament and Military Equipment in Modern Conditions» (pp. 52–54). Chernihiv, Ukraine.

297. Volianska, Ya. B., Volianskyi, S. M., & Onyshchenko, O. A. (2020). Features of constructive decision-making in the creation of the propulsion complex of a dual-use autonomous underwater vehicle. In Proceedings of the II International Scientific and Practical Marine Conference MPP&O–2020 (pp. 119–123). Odesa, Ukraine.

298. Volianskyi, S. M., Volianska, Ya. B., Mazur, O. M., Sapiha, V. V., & Onyshchenko, O. A. (2021). Current state of development of multipurpose autonomous dual-use underwater vehicles and their automated control systems. In

Proceedings of the IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference «Military-Historical Work in the Naval Forces of *Ukraine*» (pp. 56–58). Odesa, Ukraine.

299. Sapiha, V. V., Onyshchenko, O. A., & Shumylo, O. M. (2023). Development of modern naval forces of the Armed Forces of Ukraine: Modular concepts. Water Transport, 2(36), 104–119. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.09

300. Volyanskaya, Ya., Volyanskyy, S., Vorokhobin, I., Mazur, O., & Onishchenko, O. (2022). Marine ship's course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of Naval Academy, 25(1), 23–35. https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-003

301. Tang, H., Ye, H., & Sheng, J. (2026). RIME-optimized rule-free fuzzy PID controller for ship heading control. Ocean Engineering, 354, 125033. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.125033

302. Holikov, V. A., Naleva, H. V., Mazur, O. M., & Onyshchenko, O. A. (2024). Fuzzy regulator of an autopilot for a small unmanned marine vessel. In Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Marine and River Fleet: Operation and Repair» (pp. 11–15). Odesa, Ukraine.

303. Naleva, H. V., & Onyshchenko, O. A. (2023). Simplified mathematical model of an asynchronous electric motor for marine unmanned vessels. In Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference «Ship Electrical Engineering, Electronics and Automation» (pp. 133–138). Odesa, Ukraine.

304. Mazur, O. M., Yarym, D. M., & Onyshchenko, O. A. (2023). Analysis of trends in the development of control systems for marine unmanned vessels. In Proceedings of the Scientific and Technical Conference «Navigation, Maritime Transportation and Technologies» (pp. 111–115). Odesa, Ukraine.

305. Onishchenko, O., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koskina, N., et al. (2023). Development of simplified mathematical models of asynchronous electric motor systems for multipurpose unmanned vessels. In Proceedings of the 1st Trunojoyo Madura International Conference of Science and Technology (pp. 456–460). Indonesia.

306. United Nations Conference on Trade and Development. (2019). Review of maritime transport. United Nations.

307. Lee, P. T. (2016). Transportation research trends in environmental issues: A literature review of methodology and key subjects. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 8(6), 612–631. https://doi.org/10.1504/IJSTL.2016.079249

308. Melnyk, O. M., Onyshchenko, S. P., Voloshyn, A. O., Kalinichenko,Ye.V., & Zaiats, S. V. (2021). Review of the main mechanisms of energy efficiency management and emission control from marine vessels. Collection of Scientific Works of UkrSURT, 197, 121–129. https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314

309. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., & Obertiur, K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. ScientificJournal of Silesian University of Technology. Series Transport, 116, 223–235. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14

310. Yuan, Y., Li, Z., Malekian, R., & Yan, X. (2017). Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts. Journal of Marine Engineering & Technology, 16 (3), 150–159. https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716

311. Volyanskyy, S., Volyanskaya, Ya., Volkov, V., & Onishchenko, O. (2017). Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electric motor of an autonomous swimming apparatus. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/8(90), 11–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118984

312. Serra, P., & Fancello, G. (2020). Towards the IMO's GHG goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping. Sustainability, 12 (8), Article 3220. https://doi.org/10.3390/su12083220

313. Acomi, N., & Acomi, O. C. (2014). The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. Energy Procedia, 59, 243–248. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.373

314. Yehorov, H. V., & Kolesnyk, D. V. (2012). Assessment of energy efficiency of mixed-navigation cargo ships. Automation of Ship Technical Equipment, 18, 27–43.

315. Никитюк, П. В., & Мельник, О. М. (2025). Створення інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 1 (30), 209–221. https://doi.org/10.33815/ 2313-4763.2025.1.30.209-221

316. Holikov, S. P., Chornyi, S. H., Zhuk, D. O., & Ivanovskyi, M. V. (2013). Ship electric power stations (Part 1). Kondor.

317. Krmek, I., Mrzljak, V., & Poljak, I. (2022). Analysis and comparison of ship propulsion systems. Journal of Maritime & Transportation Science, 62(1), 75–95. https://doi.org/10.18048/2022.62.05

318. State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy. (1999). Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality standards in general-purpose power supply systems (GOST 13109-97). Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

319. Volianska, Ya. B., & Onyshchenko, O. A. (2018). Simplified model of a brushless electric drive and its technical implementation for an autonomous underwater vehicle. Automation of Technological and Business Processes, 10(1), 64–68. https://doi.org/10.15673/atbp.v10i1.884

320. Karpovych, O. Ya., Naleva, H. V., & Onyshchenko, O. A. (2021). Analysis of switched reluctance motor drive circuits for their modeling in the MATLAB environment. Sciences of Europe, 1 (75), 42–49. https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-75-1-3-5

321. de Almeida, A. T., Fong, J., Falkner, H., & Bertoldi, P. (2017). Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU: Review article. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 1275–1286. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112

322. Волянський, С. М., & Волянська, Я. Б. (2018). Моделювання електромеханічних систем (О. А. Онищенко, ред.). Миколаїв: Іліон. 246 с. ISBN 978-617-534-483-5.

323. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nykul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(8–92), 25–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126144

324. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyanskyy, S., Bondar, A., & Cheredarchuk, N. (2023). Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 13(4), 3948–3957. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957

325. Archa, V. S., & Rajan, S. C. (2016). A comparison on the performance of BLDC motor drive with DBR, Luo and BL-Luo. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, 2(9), 1038–1042.

326. Arun Noyal Doss, M., Vijayakumar, S., Jamal Mohideen, A., Sathiah Kannan, K., Balaji Sairam, N. D., & Karthik, K. (2017). Reduction in cogging torque and flux per pole in BLDC motor by adapting U-clamped magnetic poles. International Journal of Power Electronics and Drive System, 8(1), 297–304. https://doi.org/10.11591/ijpeds.v8i1.pp297-304

327. Bhadani, A., Koladiya, D., Devani, J., & Tahiliani, A. (2016). Modeling and controlling of BLDC motor. International Journal of Advance Engineering and Research Development, 3(3), 139–144.

328. Ashry, T. A., Nasr, N. A., Fahim, N. S., & Marey, N. A. (2024). A field study onboard VLCCs for CO2 emission reduction considering EEDI and SEEMP. Alexandria Engineering Journal, 108, 662–675. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.09.051

329. Hanif Dewan, M., Ahmed Mustafi, M. A., Matos, F., & Godina, R. (2024). Exploring seafarers' knowledge, understanding, and proficiency in SEEMP: A strategic

training framework for enhancing seafarers' competence in energy-efficient ship operations. Heliyon, 10(17), e36505. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36505

330. Dewan, M. H., & Godina, R. (2023). Roles and challenges of seafarers for implementation of energy efficiency operational measures onboard ships. *Marine* Policy, 155, 105746. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105746

331. Farhani, F., Zaafouri, A., & Chaari, A. (2017). Real time induction motor efficiency optimization. Journal of the Franklin Institute, 354(8), 3289–3304. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.02.012

332. Giri, F. (2013). AC electric motors control: Advanced design techniques and applications. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118574263.ch18

333. Ozturk, O., & Kandemir, I. (2025). Analysis of single and double effect LiBr-H2O absorption cooling systems to meet the cooling requirements of surface ships. Applied Thermal Engineering, 262, 125206. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125206

334. Sanaye, S., Borzuei, D., & Akbari, A. (2026). Optimization of an integrated solar CCHPW system with hybrid heat pump and adsorption cooling, ORC and RO elements. Energy Reports, 15, 109347. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109347

335. Volyanskaya, Ya., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nikul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/8(92), 25–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126144

336. Li, Y., Wang, R., Wang, Z., Guo, Y., Chang, Z., & Gao, J. (2026). A production rule system based framework for fault root cause tracing of complex equipment driven by joint inference of fault knowledge and operational information. Reliability Engineering & System Safety, 274, 112408. https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112408

337. Ye, Y., González-Vidal, A., Cisterna-García, A., Pérez-Ruzafa, A., Zamora Izquierdo, M. A., & Skarmeta, A. F. (2026). Advancing toward a marine digital twin platform: Modeling a coastal lagoon ecosystem. Future Generation Computer Systems, 178, 108265. https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108265

338. Ali, Y., Elgammal, A., Heng, J., Dai, K., Saudi, G. N., & Salem, H. (2026). Corrosion–fatigue deterioration in offshore wind turbine structures using digital twin applications. Ocean Engineering, 343, 123514. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123514

339. Ai, T., Gao, L., Yin, X., Du, H., Li, Q., & Zhang, H. (2026). A digital twin for urban flood monitoring under extreme weather conditions. Environmental Modelling & Software, 197, 106870. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106870

340. Bhati, M., Goerlandt, F., & Pelot, R. (2025). Digital twin development for the blue economy: A bibliometric analysis. Ocean Engineering, 317, 119781. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119781

341. Mariniello, G., Gragnaniello, C., & Asprone, D. (2025). Enhancing structural health monitoring in digital twins with blockchain and smart contracts. Automation in Construction, 180, 106558. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106558

342. Leon-Medina, J. X., Tibaduiza, D. A., Parés, N., & Pozo, F. (2025). Digital twin technology in wind turbine components: A review. Intelligent Systems with Applications, 26, 200535. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200535

343. Ding, P., Liu, S. Q., Chiong, R., Dhakal, S., Chen, D., Li, D., Ma, H., & Chung, S. (2025). Digital twins in smart industries: Concepts, trends, and challenges. Computers in Industry, 174, 104398. https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104398

344. Zou, P. X., & Ma, S. (2025). Digital twin technology for improving safety management: A multi-industry perspective. Safety Science, 189, 106837. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106837

345. De las Morenas, J., Belmonte, L. M., & Morales, R. (2025). AI-driven digital twin architecture for building energy prediction. Journal of Building Engineering, 113, 113966. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113966

346. Mbasso, W. F., Harrison, A., Dagal, I., Jangir, P., Khishe, M., Kotb, H., Shaikh, M. S., Smerat, A., Donfack, E. F., & Kumar, R. (2025). Digital twins in renewable energy systems: A comprehensive review. Energy Strategy Reviews, 61, 101814. https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101814

347. Li, Y., Kong, Q., Xiong, B., Chi, F., Qu, Y., & Wang, C. (2025). Edge–fog–cloud digital twin network for distributed structural health monitoring. Automation in Construction, 172, 106050. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106050

348. Erturk, M. A., Al-Dubai, A., Gursu, K., & Canberk, B. (2025). Digital twin model for wind turbine performance prediction using federated learning. Energy, 337, 138644. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138644

349. Ebrahimian, P., & Bitaraf, M. (2025). Automated model updating of digital twins using deep Q networks for damage detection. Structures, 80, 109835. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109835

350. Chen, S., Turanoglu Bekar, E., Bokrantz, J., & Skoogh, A. (2025). AI-enhanced digital twins in maintenance: Challenges and research gaps. Journal of Manufacturing Systems, 82, 678–699. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.07.006

351. An, X., Xing, H., Li, H., Shi, H., & Gu, Y. (2025). Construction and verification of an autonomous underwater helicopter digital twin system for mission simulation. Ocean Engineering, 341, 122641. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122641

352. Ahmad, A., Li, P., Piechocki, R., & Inacio, R. (2025). Anomaly detection in offshore open radio access network using long short-term memory models on a novel artificial intelligence-driven cloud-native data platform. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 161, 112274. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112274

353. Mazloum, H., Doliveira, A., Roman, C., Graton, G., & Ouladsine, M. (2024). Implementation of an Operational Capability Model: Case Study on Offshore Support Vessel Fleet Management. Procedia Computer Science, 274, 392–401. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.12.039

354. Zhang, J., Dong, Y., Frangopol, D. M., Zhu, S., & Yang, H. (2026). Synergistic operation and maintenance enabling lifecycle-aware opportunistic management of offshore wind energy. Applied Energy, 408, 127424. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127424

355. Sun, T., Yin, Y., & Liu, C. (2026). AIS data-guided trajectory planning and control for ship autonomous berthing. Ocean Engineering, 350, 124270. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124270

356. Zhang, W., Wu, G., Zhou, X., Yang, X., & Meng, X. (2025). A function-triggered framework for feasibility analysis of autonomous ships in Arctic pendulum transport mode. Regional Studies in Marine Science, 93, 104665. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104665

357. Tatar, V. (2026). Optimization-based decision support model for risk assessment of autonomous ships: A spherical fuzzy FUCOM–ARTASI approach. Ocean Engineering, 345, 123486. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123486

358. Ozcan, A. B., Bayezit, I., Kinaci, O. K., & Khan, J. (2026). Nonlinear stability analysis of autonomous container ships under environmental disturbances using hardware-in-the-loop validation. Ocean Engineering, 351, 124201. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124201

359. Yang, D., Shi, W., Aliseda, J., Gerval, N., Rathakrishnan, S., Ibrahim, K., Lyu, X., Mi, C., & Huang, L. (2026). Digital twins for floating photovoltaic systems with experimental data mining and AI modeling. Solar Energy, 305, 114249. https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.114249

360. Simion, D., Postolache, F., Fleacă, B., & Fleacă, E. (2023). AI-driven predictive maintenance in modern maritime transport: Enhancing operational efficiency and reliability. Applied Sciences, 14(20), 9439. https://doi.org/10.3390/app14209439

361. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Онищенко, О. А., Унгаров, Д. В., & Шевченко, В. О. (2022). Проблеми підвищення енергетичного фактору суднових систем електропостачання. Водний транспорт: Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, 1 (35), 15–24. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.02

362. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. П., Ковальчук, М. С., & Волянський, Ю. С. (2023). Оцінка резервів підвищення енергоефективності об’єктів водного транспорту шляхом оптимізації суднових

систем. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34 (73)(2, ч. 2), 115–120. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/20

363. Волянський, С. М., Галаган, С. М., Мазур, О. М., Налева, Г. В., Корбан, В. Х., Яременко, В. А., & Онищенко, О. А. (2024). Нечіткі системи управління електромеханічними системами малих безпілотних морських суден. Вісник Одеського національного морського університету, 75, 35–42. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

364. Sapkota, S., & Paudyal, D. R. (2022). Growth monitoring and yield estimation of maize plant using unmanned aerial vehicle in a hilly region. Sensors, 23 (12), 5432. https://doi.org/10.3390/s23125432

365. Sha, J., Leng, J., Mao, H., et al. (2025). Research progress in predictive maintenance of offshore platform structures based on digital twin technology. Journal of Marine Science and Application, 24, 877–899. https://doi.org/10.1007/s11804-025-00649-w

366. Hwang, H., & Joe, I. (2024). An IoT-based cloud data platform with real-time connecting maritime autonomous surface ships. In R. Silhavy & P. Silhavy (Eds.), Lecture Notes in Networks and Systems (Vol. 909). https://doi.org/10.1007/978-3-031-53549-9_21

367. Xu, H., & Soares, C. G. (2026). Challenges for the development of maritime autonomous surface ships. Autonomous Transportation Research. https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.001

368. Seo, M., Paik, K., Yoo, W., Kim, S., & Kwon, S. (2025). A study on the avoidance timing of autonomous surface ships through machine learning. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 18, 100717. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100717

369. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Ященко, В. С., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2024). Можливості підвищення ефективності експлуатації систем управління енергетичними та загальносудновими установками. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE–

2024)(матеріали Міжнародної наукової конференції, Одеса, 15 травня 2024 р., с. 27–29). Одеса.

370. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2024). Вибір параметрів двигунів спеціального призначення для електрорушійних систем універсальних автономних плавальних апаратів. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ІСО–2024) (матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р., с. 318–320). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

371. Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskaya, Y., Yaremenko, N., & Volyanskyy, S. (2024). Increasing maneuverability and positioning of self-propelled drilling platforms using driving modules. In A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, & N. Zuievska (Eds.), Geomining (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 224, pp. 283–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_20

372. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В., Ковальчук, М. (2024). Загальні проблеми побудови електрорушіїв та інших електромеханічних систем малих автономних плавальних апаратів. У Автоматика та електротехніка (АЕ–2024) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Миколаїв, 20–21 листопада 2024 р., с. 96–98). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

373. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В. (2025). Оцінка впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів об’єктів морської робототехніки. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (СПАЕ–2025) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 29–30 квітня 2025 р., с. 24–26). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

374. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

375. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованого електроприводу». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

376. Fontenla-Carrera, G., Aldao Pensado, E., Veiga-López, F., & González-Jorge, H. (2025). Efficient offshore wind farm inspections using a support vessel and UAVs. Ocean Engineering, 332, 121416. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121416

377. Da Cunha Jácome Vidal, P., Aguirre González, M. O., Cassimiro de Melo, D., De Oliveira Ferreira, P., Vasconcelos Sampaio, P. G., & Lima, L. O. (2022). Conceptual framework for the decommissioning process of offshore oil and gas platforms. Marine Structures, 85, 103262. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103262

378. Zhang, Y., Li, Q., & Zang, F. (2017). Ship detection for visual maritime surveillance from non-stationary platforms. Ocean Engineering, 141, 53–63. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.022

379. Bose, P., Rafiq, G., & Orten, P. (2025). Maritime communications: A review of potential wireless communication technologies. Ocean Engineering, 341, Article 122527. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122527

380. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. (2024). Integrating situation-aware knowledge maps and dynamic window approach for safe path planning by maritime autonomous surface ships. Ocean Engineering, 311, Article 118882. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118882

381. Zhang, Z., Liu, S., Wang, H., & Wu, H. (2025). A cooperative control framework for path following of UAV-USV cooperative system in maritime scenarios. Ocean Engineering, 342, Article 122796. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122796

382. Lu, H., Zhang, Y., Zhang, C., Niu, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2025). A multi-sensor fusion approach for maritime autonomous surface ships berthing navigation perception. Ocean Engineering, 316 (6), Article 119965. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119965

383. Liu, C., Chu, X., Wu, W., Li, S., He, Z., Zheng, M., Zhou, H., & Li, Z. (2022). Human–machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration. Ocean Engineering, 246, Article 110555. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110555

384. Kim, H., Pal, A., Cho, J., Al-Kabbany, A. M., Kaswan, K., Joshi, R., Na, S., Lee, J., Choi, K., Kim, M., Choi, D., & Lin, Z. (2025). Thermochromic fiber-based self-powered detection system for maritime oil spill monitoring and fire safety applications. Nano Energy, 147, Article 111569. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111569

385. Ribeiro, J. A. E., Oliveira, L. B. D. S., de Oliveira, G. V. B., da Silva, D. C., Wanderley Neto, A. D. O., & Rodrigues, M. A. F. (2026). Technological advances and operational challenges of the FAWAG (Foam-Assisted Water Alternating Gas) method in enhanced oil recovery: A comprehensive review of principles, applications, and future perspectives. Geoenergy Science and Engineering, 257, Article 214206. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214206

386. Jayabal, R. (2025). AI-driven revolution in subsurface gas storage: Addressing operational and environmental challenges. International Journal of Hydrogen Energy, 140, 298–314. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.260

387. Yang, T., Jiang, L., Guo, Y., Han, Q., & Li, X. (2024). LTFM-net framework: Advanced intelligent diagnostics and interpretability of insulated bearing faults in offshore wind turbines under complex operational conditions. Ocean Engineering, 309(2), Article 118533. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118533

388. Mudhafar, M. A., Zayed, M. E., & Rehman, S. (2025). Offshore wind-to-green hydrogen: A comprehensive review on current challenges, techno-economic analyses, environmental implications, and potential risks. Process Safety and Environmental Protection, 201, Article 107631. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107631

389. Yu, S., Li, Y., & Gong, J. (2026). Expert-guided and action-compensated deep reinforcement learning for robust multi-ship collision avoidance in dynamic and uncertain maritime environments. Ocean Engineering, 351, 124354. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124354

390. Li, P., Wang, Y., & Yang, Z. (2024). Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model. Ocean Engineering, 309, 118444. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118444

391. Lopez, J. C., & Kolios, A. (2024). An autonomous decision-making agent for offshore wind turbine blades under leading edge erosion. Renewable Energy, 227, Article 120525. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120525

392. Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang, Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. Ocean Engineering, 279, Article 114577. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114577

393. Zhang, Y., Wang, M., & Wang, L. (2026). A grey-DEMATEL based collaborative quality value network model for nuclear power equipment intelligent manufacturing. Nuclear Engineering and Technology, 58 (3), Article 104010. https://doi.org/10.1016/j.net.2025.104010

394. Zhou, Z., Mao, H., Yang, B., & Sun, S. (2026). A novel method for risk identification and quantitative assessment in shale gas development phase based on STPA-FTA-DEMATEL. Unconventional Resources, 10, Article 100301. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100301

395. Isiaku, L., & Shishah, W. (2026). An analytical framework for uncovering risk interdependencies in sustainable supply chains using fuzzy DEMATEL. Decision Analytics Journal, 18, Article 100676. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2026.100676

396. Niu, D., Wang, Y., Li, X., Zhang, Z., Li, W., Wang, L., Wu, J., & Xing, W. (2026). Full life cycle risk evaluation of the Weiyan high-speed railway based on the DEMATEL-FT-BN method. KSCE Journal of Civil Engineering, Article 100535. https://doi.org/10.1016/j.kscej.2026.100535

397. Ragazou, K., Sklavos, G., Zournatzidou, G., & Sariannidis, N. (2025). Modeling governance innovation under ESG pressure: A DEMATEL–ANP approach to institutional complexity. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 11(3), Article 100617. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100617

398. Gamal, Y. A., Seghier, M. E. A. B., Abdelfattah, A. M., Ahmed, A. I. A., & Hussein, M. (2025). Fuzzy DEMATEL-based risk assessment framework for natural gas pipeline shutdown operations. Journal of Pipeline Science and Engineering, Article 100378. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100378

399. Shi, J., Liu, Z., Feng, Y., Wang, X., Zhu, H., Yang, Z., Wang, J., & Wang, H. (2024). Evolutionary model and risk analysis of ship collision accidents based on complex networks and DEMATEL. Ocean Engineering, 305, Article 117965. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117965

400. Alsugair, A. M., Al-Gahtani, K. S., Alsanabani, N. M., Hommadi, G. M., & Alawshan, M. I. (2024). An integrated DEMATEL and system dynamic model for project cost prediction. Heliyon, 10 (4), Article e26166. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26166

401. Phan, Q., Le, T., Nguyen, P., Thi Nguyen, L., & Vu, T. (2025). Toward sustainable logistics in emerging economies: Identifying ESG barriers using neutrosophic Delphi-DEMATEL model. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 11(3), Article 100601. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100601

402. Khot, S. B., Patil, S. S., Hu, Y., & Mulla, J. M. (2026). Exploring barriers to metaverse-enabled healthcare 4.0 patient monitoring using interval-valued Pythagorean fuzzy DEMATEL. Applied Soft Computing, 192, Article 114737. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2026.114737

403. Onyshchenko, S., & Melnyk, O. (2020). Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. Technology Audit and Production Reserves, 6 (2), 66–70. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.221653

404. Kurdiuk, S., Dremliuk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píštěk, V., & Kučera, P. (2025). Development of a high reliability hybrid data transmission system for unmanned surface vehicles under interference conditions. Drones, 9(3), Article 179. https://doi.org/10.3390/drones9030174

405. Melnyk, O., Drozdov, O., & Kuznichenko, S. (2025). Cybersecurity in maritime transport: An international perspective on regulatory frameworks and countermeasures. Lex Portus, 11(1), 7–19. https://doi.org/10.62821/lp11101

406. Melnyk, O., Onishchenko, O., Mykhailova, I., Zaiets, A., & Kotenko, O. (2024). Safety management in maritime transport within the framework of current challenges, trends, risks and settlement strategies. In Studies in Systems, Decision and Control (Vol. 561, pp. 459–475). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_25

407. Wang, S., Li, L., Wang, X., Wang, H., & Mao, W. (2026). Modeling the decision-making trigger for autonomous ship collision avoidance via imitating human social cognitive process. Regional Studies in Marine Science, 95, Article 104852. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2026.104852

408. Li, H., Ou, H., Ni, S., Zhou, J., & Wang, X. (2026). Ship autonomous collision avoidance: Improving sparrow search algorithm for complex multi-ship encounters. Ocean Engineering, 344, Article 123621. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123621

409. Zheng, K., Zhang, X., Liu, W., Ma, J., & Cui, J. (2025). World model-based reinforcement learning for autonomous ship safe collision avoidance. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 162, Article 112732. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112732

410. Yu, S., Li, Y., & Gong, J. (2025). Hierarchical reinforcement learning for dynamic collision avoidance of autonomous ships under uncertain scenarios. Knowledge-Based Systems, 330, Article 114528. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.114528

411. Méndez, B., & Lamo, P. (2026). IoT node for monitoring and traceability of live plants in maritime transport. Array, 29, 100621. https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100621

412. Lai, L., Liu, C., He, Z., Li, M., Fu, Z., & Chu, X. (2025). A novel waterway navigability assessment method based on encounter safety analysis of ship autonomous navigation. Ocean Engineering, 342, Article 121388. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121388

413. Liu, X., He, Y., Zhang, K., Mou, J., Zhang, K., & Zhao, X. (2025). Research on the decision-making method for autonomous navigation for the ocean-going ship in the ships' routeing waters. Ocean Engineering, 323, Article 120641. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120641

414. Xin, X., Liu, K., Yu, Y., & Yang, Z. (2025). Developing robust traffic navigation scenarios for autonomous ship testing: An integrated approach to scenario extraction, characterization, and sampling in complex waters. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 178, Article 105246. https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105246

415. Palmer, K. P., & Irani, R. A. (2025). Neural networks for high accuracy short term ship motion predictions with applications to autonomous UAVs. Aerospace Science and Technology, 168, Article 110964. https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.110964

416. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. (2025). Experimental trust dynamics modelling in supervised autonomous ship navigation in collision avoidance scenarios. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 34, Article 101634. https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101634

417. Fan, C., Chen, Y., Fan, S., Fu, S., Wan, C., Xi, Y., & Yang, Z. (2025). A novel arithmetic operation function utilizing height of interval type-2 fuzzy sets to express risk preference: Case study of remotely controlled autonomous ship. Ocean Engineering, 342, Article 122940. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122940

418. Zhang, Z., Yang, X., Sun, L., Sun, Y., & Kang, J. (2025). Research on constructing and reasoning the collision knowledge graph of autonomous navigation ship based on enhanced BERT model. Expert Systems With Applications, 278, Article 127429. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127429

419. Lian-fa, R., & Hong-wei, F. (2011). Analysis of influence factors of the popularization of green buildings based on fuzzy DEMATEL method. In 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet) (pp. 2935–2938). IEEE. https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5769393

420. Malviya, R. K., & Kant, R. (2014). Identifying critical success factors for green supply chain management implementation using fuzzy DEMATEL method. In

2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 214–218). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058631

421. Liu, C., Zhu, Y., Zhou, J.-H., & Xia, J. (2022). Construction of a quality evaluation index system for construction land reduction projects based on DEMATEL and entropy power method. In 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 1114–1118). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989914

422. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., & Melnyk, O. (2023). Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 120, 137–149. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.120.9

423. Patil, S. K., & Kant, R. (2012). Identify critical success factor of knowledge management in supply chain: Fuzzy DEMATEL approach. In 2012 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 217–221). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEEM.2012.6837733

424. Zhao, C., Ma, L., Huo, L., Liu, Y., & Zhao, X. (2016). Important degree evaluation of test equipment based on fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS. In 2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS) (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICRMS.2016.8050162

425. Xu, C., & Zhu, Y. (2016). Research on improved DEMATEL method considering preference consistency. In 2016 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM) (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2016.7538577

426. Liu, R. (2019). Research on risk assessment model of unsalable agricultural products based on DEMATEL method. In 2019 International Conference on Economic Management and Model Engineering (ICEMME) (pp. 351–355). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEMME49371.2019.00076

427. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Koskina, Y., Lohinov, O., Veretennik, O., & Stukalenko, O. (2024). Fundamental concepts of deck cargo

handling and transportation safety. European Transport – Trasporti Europei, 98. https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1

428. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Shyshkin, O. V., Volkov, O. M., Volyanskyy, S. M., Maulevych, V. O., & Kreitser, K. O. (2024). Enhancing shipboard technical facility performance through the utilization of low-sulfur marine fuel grades. Journal of Chemistry and Technologies, 32 (1), 233–245. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.297916

429. Veltsin, N., Chountalas, P. T., Koutsouki, E., Karvounidi, M. D., & Fousteris, A. E. (2025). Modeling human critical success factors for maritime safety: A DEMATEL approach. Safety Science, 189, Article 106886. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106886

430. Wang, X., Zhao, G., Cao, L., Yu, J., Li, Y., Wang, H., & Cao, W. (2026). Structural causality hierarchy analysis: A novel data-driven integrated method for assessing occupational accidents in maritime transportation. Safety Science, 196, Article 107086. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.107086

431. Tahsin, R., Rantu, S. B. A., Rahman, M., Salman, S., & Karim, M. R. (2025). Towards the adoption of AI, IoT, and Blockchain technologies in Bangladesh's maritime industry: Challenges and insights. Results in Engineering, 25, Article 103825. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103825

432. Xing, M., Luo, X., Zan, Y., Yang, L., Jin, H., & Luo, J. (2023). Identification of factors affecting hoisting quality of large offshore structures and analysis of their coupling relationship based on grey-DEMATEL-ISM-MICMAC. Ocean Engineering, 280, Article 114805. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114805

433. Bairami-Khankandi, S., Bolbot, V., BahooToroody, A., & Goerlandt, F. (2025). A systems-theoretic approach using association rule mining and predictive Bayesian trend analysis to identify patterns in maritime accident causes. Reliability Engineering & System Safety, 258, Article 110911. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110911

434. Muerza, V., Milenkovic, M., Larrodé, E., & Bojovic, N. (2024). Selection of an international distribution center location: A comparison between stand-alone ANP and DEMATEL-ANP applications. Research in Transportation Business & Management, 56, Article 101135. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101135

435. Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang,Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. Ocean Engineering, 279, Article 114577. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114577

436. Zhao, G., Xie, X., Wang, Y., Liu, S., Jones, P., & Lopez, C. (2024). Barrier analysis to improve big data analytics capability of the maritime industry: A mixed-method approach. Technological Forecasting and Social Change, 203, Article 123345. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123345

437. Nalluri, V., Meghana Chowdary, K., & Chen, L. (2025). Risk evaluation in the implementation of sustainable measures in the supply chain operations: A fuzzy Delphi-DEMATEL approach. Cleaner Logistics and Supply Chain, 17, Article 100262. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100262

438. Khan, M. S., Naseem, A., Shahzad, A., Ahmad, Y., & Naseem, F. (2025). Integrating cloud model theory and DEMATEL to identify causal efficiency enablers for effective decision making in public goods procurement: A Pakistan case study. Results in Engineering, 28, Article 107030. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107030

439. Gamal, Y. A., Seghier, M. E. A. B., Abdelfattah, A. M., Ahmed, A. I. A., & Hussein, M. (2025). Fuzzy DEMATEL-based risk assessment framework for natural gas pipeline shutdown operations. Journal of Pipeline Science and Engineering, Article 100378. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100378

440. Guo, M., Chen, M., Yuan, L., Zhang, Z., Lv, J., & Cai, Z. (2025). Investigation of ship collision accident risk factors using BP-DEMATEL method based on HFACS-SCA. Reliability Engineering & System Safety, 257, Article 110875. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110875

441. Jia, Z., Xiu, J., Liu, K., Zhao, L., Zhang, W., Song, Z., Xiao, N., & Du, T. (2026). Influencing factors and mechanisms of super high-rise buildings safety risks: A fuzzy-DEMATEL-AISM analysis. Journal of Safety Science and Resilience, 7(2), Article 100232. https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2025.100232

442. Sumrit, D., & Jongprasittiphol, O. (2025). Analyzing readiness factors for organizational disaster management in upstream automotive supply chains based on neutrosophic DEMATEL model. Results in Engineering, 28, Article 108254. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108254

443. Wang, S., Wang, J., & Wang, X. (2024). Risk analysis of human evacuation aboard passenger ships based on fuzzy DEMATEL-ISM-BN. Ocean Engineering, 313, Article 119520. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119520

444. Kang, J., Wang, H., Jin, H., Wang, Z., & Zhang, J. (2025). Risk analysis and management of hydrogen station fire and explosion accidents using DEMATEL-ISM and complex network models. International Journal of Hydrogen Energy, 136, 1230–1241. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.141

445. Ayyaz, M., Naseem, A., Shahzad, A., Ahmad, Y., & Shah, S. T. H. (2026). A novel hybrid approach for determinants of construction projects failure: An application of Delphi-DEMATEL methodology. Results in Engineering, 29, Article 109057. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109057

446. Akbar, M. A., Naseem, A., Ahmad, Y., & Zaman, U. K. U. (2024). Production risk analysis and prioritization in manufacturing industry: A hybrid approach using Monte Carlo simulation and DEMATEL analysis. Ain Shams Engineering Journal, 15(7), Article 102756. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102756

447. Pakdel, J., Erol, I., & Oztel, A. (2025). Advancing digital transformation in the mining industry: A novel rough interval-valued neutrosophic DEMATEL approach to challenge interdependencies. Resources Policy, 107, Article 105663. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105663

448. Ay, C. (2025). Human reliability analysis in inert gas operations with fuzzy CREAM-based Bayesian networks. Ocean Engineering, 339, Article 122196. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122196

449. Zhao, L., & He, Z. (2026). Global maritime embedded carbon flow network: Key factors and formation mechanism. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 207, 104647. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104647

450. Veltsin, N., Chountalas, P. T., Koutsouki, E., Karvounidi, M. D., & Fousteris, A. E. (2025). Modeling human critical success factors for maritime safety: A DEMATEL approach. Safety Science, 189, 106886. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106886

451. Budashko, V. V. (2021). Prospektive globale wissenschaftliche Trends: Modern technologies and concepts of researching for ship power plants of combined propulsion complexes. ScientificWorld-NetAkhatAV Lußstr 13, Karlsruhe, Germany in conjunction with Institute «SE&E», 7 (7), 152. https://doi.org/10.30890/2709-2313.2021-07-07

452. Budashko, V., Sandler, A., Khniunin, S., & Bogach, V. (2024). Design of the predictive management and control system for combined propulsion complex. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (2 (131)), 90–102. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313627

453. Bulgakov, M. & Melnyk, O. (2025). Intelligent digital twin utilization for real-time forecasting and optimization of the ship’s power system. Transport Systems and Technologies, 45, 121–131. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2025-45-9

454. Vychuzhanin, V. V., & Vychuzhanin, A. V. (2026). Integrated digital twin of ships: cyber-physical architecture for intelligent operational management: monograph, Odesa: Astroprint, 356. https://doi.org/10.67324/978-617-8714-33-8-356

455. Vychuzhanin, V. V., & Vychuzhanin, A. V. (2026). Integration of the dynamic state classification model into the digital twin architecture of complex technical systems. Informatics and Mathematical Methods in Simulation, 16 (2026), 3, 439–456. https://doi.org/imms.v16.no3.439 UDC 004.9

456. Vychuzhanin, V., & Vychuzhanin, A. (2025). Intelligent Diagnostics of Ship Power Plants: Integration of Case-Based Reasoning, Probabilistic Models, and ChatGPT. A Universal Approach to Fault Diagnosis and Prognostics in Complex Technical Systems:monograph, Lviv–Torun: Liha-Pres, 412 p. https://doi.org/10.36059/978-966-397-516-0

457. Bilka, M., Gritsuk, I., Holovan, A., Volska, O., Honcharuk, I., Kohutiar, M., & Krbaťa, M. (2026). Digital Twin-Based Assessment and Forecasting of Marine Plate Heat Exchanger Performance Under Variable Operating Conditions. Machines, 14 (487). https://doi.org/10.3390/machines14050497

458. Golovan, A., Mateichyk, V., Gritsuk, I., Lavrov, A., Smieszek, M., Honcharuk, I., & Volska, O. (2024). Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework. Computers, 13 (10), 261. https://doi.org/10.3390/computers13100261

459. Flammini, F. (2021). Digital twins as runtime predictive resilience models. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physica land Engineering Sciences, 379 (2207), Article 20200369. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0369

460. Berg, H. S. B., Menges, D., Tengesdal, T., & Rasheed, A. (2025). Digital twin syncing for autonomous surface vessels. Scientific Reports, 15, Article 9344 (orpreprintversion, arXiv:2411.03465).

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

монографії:

1. Букарос, А. Ю., Волянська, Я. Б., Волянський, С. М., та ін. (2022). Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології (В. А. Голіков & О. А. Онищенко, наук. ред.). Миколаїв: Іліон. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20279652

Автором узагальнено сучасні концепції, методи та технології технічної експлуатації морського і річкового флоту.

статті у фахових періодичних виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science:

2. Volyanskyy, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianska, Y., Kurdiuk, S., Shcherbina, O., & Dobrovolska, L. (2026). Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling risk topology in autonomous maritime systems. Transportation Safety and Environment. https://doi.org/10.1093/tse/tdag040 (Scopus Q1)

Автором запропоновано динамічний сценарний метод (Dynamic scenario-based DEMATEL) для моделювання топології ризиків у морських автономних системах.

3. Volyanskaya, Y., & Volyanskiy, S. (2017). Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9–85), 26–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91966 (Scopus Q3)

Автором створено спеціалізований моделювальний комплекс для дослідження систем керування рухомими морськими об'єктами.

4. Volyanskaya, Y., Volyanskiy, S., Onishchenko, O., & Nykul, S. (2018). Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (8–92), 25–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126144 (Scopus Q3)

Автором проведено аналіз шляхів підвищення енергетичних показників асинхронних електродвигунів автономних плавальних апаратів.

5. Onishchenko, O., Shumilova, K., Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., & Volianskyi, Y. (2022). Ensuring cyber resilience of ship information systems. TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 16 (1), 43–50. https://doi.org/10.12716/1001.16.01.04 (Scopus Q3)

Автором запропоновано підходи до забезпечення кіберстійкості суднових інформаційних систем в умовах зовнішніх кіберзагроз.

6. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyanskyy, S., Bondar, A., & Cheredarchuk, N. (2023). Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 13 (4), 3948–3957. https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957 (Scopus Q2)

Автором проведено аналіз застосування нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом суден та оцінено їх ефективність.

7. Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskaya, Y., Yaremenko, N., & Volyanskyy, S. (2024). Increasing maneuverability and positioning of self-propelled drilling platforms using driving modules. In A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, & N. Zuievska (Eds.), Geomining (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 224, pp. 283–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_20 (Scopus Q4)

Автором розроблено підходи до підвищення маневреності самохідних бурових платформ шляхом використання рушійних модулів.

8. Melnyk, O., Onishchenko, O., Shyshkin, O., Volkov, O., Volyanskyy, S., Maulevych, V., & Kreitser, K. (2024). Enhancing shipboard technical facility performance through the utilization of low-sulfur marine fuel grades. Journal of Chemistry and Technologies, 32 (1), 233–245. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.297916 (Scopus Q3)

Автором досліджено вплив використання низькосірчистих палив на ефективність функціонування суднових технічних засобів.

9. Melnyk, O., Onishchenko, O., Ternovsky, V., Volyanskyy, S., & Koryakin, K. (2024). Safe and reliable operation of maritime transport based on integrated systematic safety model. In V. Babak & A. Zaporozhets (Eds.), Systems, Decision and Control in Energy VI (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 561, pp. 403–421). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_22 (Scopus Q4)

Автором запропоновано інтегровану системну модель забезпечення безпечної та надійної експлуатації морського транспорту.

10. Melnyk, O., Onishchenko, O., Borovyk, S., Volyanskyy, S., Bychkovsky, Y., Zaporozhets, A., & Shcheniavskyi, H. (2025). Survey of ship energy autonomy technologies and development perspectives. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, I. Shkilniuk, & A. Yakovlieva (Eds.), Modern Technologies in Energy and Transport II (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 574, pp. 37–48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76650-3_3 (Scopus Q4)

Автором проведено огляд сучасних технологій енергетичної автономності суден та визначено перспективи їх розвитку.

11. Kurdiuk, S., Melnyk, O., Onishchenko, O., Volianskiy, S., Shevchenko, V., & Alieksieichuk, B. (2026). Practical aspects of creating a data transmission system for controlling unmanned surface vehicles in unstable communication channels. System Research and Information Technologies, (1), 76–91. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2026.1.05 (Scopus Q4)

Автором розроблено підходи до створення систем передачі даних для керування безекіпажними надводними апаратами в умовах нестабільних каналів зв'язку.

статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, та статті у наукових періодичних виданнях інших держав за напрямом, з якого підготовлено дисертацію:

12. Xia, X., Li, L., Volyanskyy, S., Zhang, Z., & Liu, W. (2025). Trajectory Tracking and Collision Avoidance Control for USV Swarm Based on Obstacle-

Avoidance Yaw Reference Angle. Information and Control. https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2025.0762

Автором запропоновано метод траєкторного керування та уникнення зіткнень групи безекіпажних надводних суден.

13. Volyanskyy, S., Volyanskaya, Y., Vorokhobin, I., Mazur, O., & Onishchenko, O. (2022). Marine ship's course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of the Naval Academy, 25 (1), 23–35. https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-003

Автором розроблено алгоритм стабілізації курсу морського судна на основі простого нечіткого регулятора.

14. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Онищенко, О. А., Унгаров, Д. В., & Шевченко, В. О. (2022). Проблеми підвищення енергетичного фактору суднових систем електропостачання. Водний транспорт: Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій, 1 (35), 15–24. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.02

Автором досліджено проблеми підвищення енергетичної ефективності суднових систем електропостачання та запропоновано шляхи їх удосконалення.

15. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. П., Ковальчук, М. С., & Волянський, Ю. С. (2023). Оцінка резервів підвищення енергоефективності об'єктів водного транспорту шляхом оптимізації суднових систем. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 34 (73) (2, ч. 2), 115–120. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/20

Автором проведено оцінку резервів підвищення енергоефективності об'єктів водного транспорту шляхом оптимізації суднових систем.

16. Волянський, С. М., Галаган, С. М., Мазур, О. М., Налева, Г. В., Корбан, В. Х., Яременко, В. А., & Онищенко, О. А. (2024). Нечіткі системи управління електромеханічними системами малих безпілотних морських суден. Вісник Одеського національного морського університету, 75, 35–42. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

Автором розроблено нечіткі системи керування електромеханічними комплексами малих безпілотних морських суден.

17. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Лебедєва, Л. В., & Радченко, І. Г. (2025). Теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських технічних засобів при змінних умовах експлуатації. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 4 (1), 414–424. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.1.39

Автором сформовано теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських технічних засобів в умовах змінної експлуатації.

18. Volyanskyy, S. M., Melnyk, O. M., Onyshchenko, O. A., & Kotenko, O. O. (2025). Structural-functional modeling of autonomous maritime technical systems under operational disturbances. Наука і техніка сьогодні, 11 (52), 1801–1814. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1801-1814

Автором розроблено структурно-функціональну модель автономних морських технічних систем в умовах експлуатаційних збурень.

19. Волянський, С. М., Бичковський, Ю. В., Мельник, О. М., & Волошин, А. О. (2025). Системний аналіз причин навігаційних інцидентів під час швартування суден та шляхи вдосконалення міжнародної нормативно-правової бази. Системи управління, навігації та зв’язку, 4 (82), 5–11. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.005

Автором проведено системний аналіз причин навігаційних інцидентів під час швартування суден та запропоновано напрями вдосконалення нормативної бази.

20. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Волянський, Ю. С., Ященко, В. С., & Мицик, А. І. (2026). Оцінка ефективності функціонування сонячних електростанцій з урахуванням сезонних та добових коливань сонячної радіації та навантаження. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 37 (76) (1), 115–120. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/25

Автором проведено оцінку ефективності функціонування сонячних електростанцій з урахуванням сезонних та добових коливань навантаження.

21. Волянський, С. М., Шумило, О. О., Мельник, О. М., & Волянська, Я. Б. (2025). Алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ. Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія, 6 (194), 426–435. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-426-435

Автором розроблено алгоритмічне забезпечення адаптивного управління режимами функціонування морських автономних платформ.

22. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., & Щербина, О. В. (2025). Методи врахування невизначеності в прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 5 (2), 222–234. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.2.23

Автором запропоновано методи врахування невизначеності у прогнозуванні експлуатаційної ефективності морських автономних платформ.

23. Волянський, С. М., Шумило, О. М., Мельник, О. М., & Котенко, О. В. (2025). Моделювання деградаційних процесів в технічних вузлах морських автономних платформ. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 36 (75) (6, ч. 1), 245–251. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/36

Автором проведено моделювання деградаційних процесів у технічних вузлах морських автономних платформ.

24. Волянський, С., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Спрощена 3-DOF динамічна модель керування автономною морською платформою в умовах хвильових перешкод. Central European Journal of Science and Research, 2 (2), 81–91. https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(2)-6

Автором розроблено спрощену тривимірну динамічну модель керування морською автономною платформою в умовах хвильових збурень.

25. Volyanskyy, S., Melnyk, O., & Dobrovolska, L. (2026). Dynamic scenario-based DEMATEL for modeling time-evolving risk topology in autonomous maritime

platforms. Oceanography & Fisheries Open Access Journal, 19 (2), 1–4. https://doi.org/10.19080/OFOAJ.2026.19.556006

Автором запропоновано сценарно-орієнтований DEMATEL-підхід для моделювання ризиків морських автономних платформ.

26. Melnyk, O., Shcheniavskyi, H., Volyanskyy, S., Koryakin, K., & Kucherenko, V. (2025). Risk-based planning of port network sustainability under conditions of operational uncertainty. Premier Journal of Science, 14, Article 100171. https://doi.org/10.70389/PJS.100171

Автором розроблено ризик-орієнтований підхід до планування стійкості портових мереж в умовах експлуатаційної невизначеності.

27. Волянський, С., Мазур, О., & Щенявський, Г. (2026). Аналітична оцінка технічного стану морських автономних платформ. Central European Journal of Science and Research, 1 (2). https://doi.org/10.65237/2336-3630-2026-2(1)-8

Автором виконано аналітичну оцінку технічного стану морських автономних платформ.

28. Волянський, С. М., Мельник, О. М., Мазур, О. М., & Онищенко, О. А. (2026). Інтеграція цифрових двійників у процес управління експлуатацією автономних морських платформ. Наука і техніка сьогодні, 2 (56), 1659–1677. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2(56)-1659-1677

Автором запропоновано підходи до інтеграції цифрових двійників у процес управління експлуатацією морських автономних платформ.

29. Volyanskiy, S., Melnyk, O., Dobrovolska, L., & Kozachuk, A. (2026). Adaptive fault-tolerant control of an unmanned surface vehicle under actuator degradation and external disturbances. Advances in Oceanography & Marine Biology, 5 (1), 1–6. https://doi.org/10.33552/AOMB.2026.05.000602

Автором розроблено метод адаптивного відмовостійкого керування безекіпажним надводним судном в умовах деградації виконавчих механізмів.

30. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Мельник, О. М., & Добровольська, Л. О. (2026). Інтеграція інформаційних потоків для підвищення ефективності

експлуатаційного управління автономними морськими платформами. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 1 (1), 49–57. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.1.1.5

Автором запропоновано модель інтеграції інформаційних потоків для підвищення ефективності управління морськими автономними платформами.

31. Волянський, С., Волянська, Я., Добровольська, Л., & Козачук, А. (2026). Структурно-динамічна модель автономної морської платформи з кількісним аналізом міжсистемних впливів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 363 (2), 597–604. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-78

Автором розроблено структурно-динамічну модель морської автономної платформи з кількісним аналізом міжсистемних взаємодій.

32. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Добровольська, Л. О., & Козачук, А. В. (2026). Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем. Вісник Херсонського національного технічного університету, 1 (96), 217–225. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.30

Автором сформовано функціонально-операторну методологію динамічного моделювання автономних морських технічних систем.

33. Волянський, С., Щенявський, Г., Мазур, О., & Очеретна, В. (2026). Причинний аналіз факторів ризику в автономних морських платформах з використанням методу DEMATEL. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, 2 (53), 179–186. https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359955

Автором проведено причинний аналіз факторів ризику морських автономних платформ із застосуванням методу DEMATEL.

34. Волянський, С., Мельник, О., Волошин, А., & Добровольська, Л. (2026). Роль інформаційного забезпечення в експлуатації автономних морських платформ.

Вісник Одеського національного морського університету, (79), 172–186. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2026-1-172-186

Автором обґрунтовано доцільність виділення окремого інформаційного рівня в структурі управління експлуатацією морських автономних платформ.

наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів докторської дисертації на наукових конференціях, конгресах, симпозіумах

35. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Сучасні системи автоматизованого керування електрорушіями автономних плавальних апаратів. У Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 24–25 березня 2022 р., с. 29–30). Одеса: НУ «ОМА».

Автором досліджено сучасні системи автоматизованого керування електрорушіями автономних плавальних апаратів.

36. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б. (2022). Концепція побудови сучасних інтелектуальних систем управління автономними об’єктами, що функціонують в умовах невизначеності навколишнього середовища. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE–2022) (матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 12 травня 2022 р., с. 29–30). Одеса: Військова академія (м. Одеса)

Автором запропоновано концепцію побудови інтелектуальних систем управління автономними об’єктами в умовах невизначеності.

37. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових безпілотних морських апаратів-дронів. У Національна безпека України в умовах воєнного стану: проблеми та шляхи їх вирішення (матеріали VIII Всеукраїнської курсантсько-студентської науково-практичної конференції, Одеса, 24 березня 2023 р., с. 15–17). Одеса: Інститут ВМС НУ «ОМА»

Автором проведено аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових безпілотних морських апаратів-дронів.

38. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Баланський, В. О., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2023). Особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 5-6 квітня 2023 р., с. 46–49). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором досліджено особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів.

39. Волянський, С. М., Волянська, Я. Б., Ященко, В. С., Ковальчук, М. С., Волянський, Ю. С. (2024). Можливості підвищення ефективності експлуатації систем управління енергетичними та загальносудновими установками. У Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE–2024) (матеріали Міжнародної наукової конференції, Одеса, 15 травня 2024 р., с. 27–29). Одеса: Військова академія (м. Одеса)

Автором визначено можливості підвищення ефективності експлуатації систем управління енергетичними та загальносудновими установками.

40. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2024). Вибір параметрів двигунів спеціального призначення для електрорушійних систем універсальних автономних плавальних апаратів. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ICO–2024) (матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 26–27 вересня 2024 р., с. 318–320). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором обґрунтовано вибір параметрів двигунів спеціального призначення для електрорушійних систем автономних плавальних апаратів.

41. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В., Ковальчук, М. (2024). Загальні проблеми побудови електрорушіїв та інших електромеханічних систем малих автономних плавальних апаратів. У Автоматика та електротехніка (АЕ–2024) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Миколаїв, 20–21 листопада 2024 р., с. 96–98). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором досліджено проблеми побудови електрорушіїв та електромеханічних систем малих автономних плавальних апаратів.

42. Волянський, С., Волянська, Я., Волянський, Ю., Ященко, В. (2025). Оцінка впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів об’єктів морської робототехніки. У Сучасні проблеми автоматики та електротехніки (СПАЕ–2025) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв, 29–30 квітня 2025 р., с. 24–26). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором проведено оцінку впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів морської робототехніки.

43. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором розробили методичне забезпечення навчального процесу, яке містить алгоритми виконання, приклади розрахунків та рекомендації щодо практичного застосування теоретичних знань.

44. Волянський, С. М., Грудініна, Г. С., Волянська, Я. Б. (2024). Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованого електроприводу». Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором розроблено методичне забезпечення навчального процесу, яке містить алгоритми виконання, приклади розрахунків та рекомендації щодо практичного застосування теоретичних знань.

45. Волянський, С. М., Корякін, К. С., Пастернак, О. Я., Щенявський, Г. С. (2025). Експлуатація автономних морських технічних засобів в умовах змінних режимів. У Science and Technology: New Horizons of Development (матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, Прага, 13–15 серпня 2025 р., с. 219–222). Prague, Czech Republic. https://doi.org/10.70286/isu-13.08.2025

Автором досліджено особливості експлуатації автономних морських технічних засобів в умовах змінних режимів роботи.

46. Волянський, С. М., Ященко, В. С. (2025). Оцінка ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна. У Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (ІСО–2025) (матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Миколаїв, 25–26 вересня 2025 р., с. 556–558). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором проведено оцінку ефективності нечітких регуляторів у системах автоматичного керування рухом судна.

47. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Волошин, А. О. (2025). Вплив динаміки кліматичних підфакторів на інтегральну ефективність експлуатації автономних морських технічних засобів. У Modern Science, Economy and Digital Innovation (Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference, Bucharest, September 10–12, 2025, pp. 126–129). Bucharest, Romania. https://doi.org/10.70286/isu-10.09.2025

Автором досліджено вплив динаміки кліматичних підфакторів на інтегральну ефективність експлуатації автономних морських технічних засобів.

48. Волянський, С. М., Булгаков, М. П., Щенявський, Г. С., Котенко, О. В. (2025). Морські автономні технічні засоби як компонент кіберфізичних систем безпеки морського середовища. У Innovative Approaches in Modern Science and Technology (Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Lisbon, November 12–14, 2025, pp. 636–640). Lisbon, Portugal. https://doi.org/10.70286/ISU-12.11.2025

Автором обґрунтовано роль автономних морських технічних засобів як компонентів кіберфізичних систем безпеки морського середовища.

49. Volyanskyy, S., Bulgakov, M., Shchenyavskyi, H., & Kotenko, O. (2025). Structural and functional model of autonomous maritime systems management: Modeling and analytical interpretation. У Progressive Approaches in Science and

Engineering (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Copenhagen, November 26–28, 2025, pp. 692–696). Copenhagen, Denmark. https://doi.org/10.70286/isu-26.11.2025

Автором розроблено структурно-функціональну модель управління автономними морськими системами та виконано її аналітичну інтерпретацію.

50. Волянський, Ю. С., Ященко, В. С., Мицик, А. І., Волянська, Я. Б., Волянський, С. М. (2025). Модернізація архітектури сонячної електростанції шляхом застосування акумуляторних систем зберігання енергії. У Автоматика та електротехніка (АЕ–2025) (матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Миколаїв, 4–5 грудня 2025 р., с. 3–4). Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова.

Автором запропоновано модернізацію архітектури сонячної електростанції із застосуванням акумуляторних систем зберігання енергії.

51. Волянський, С. М., Руденко, С. В., Шумило, О. М., & Мельник, О. М. (2025). Моделювання сценаріїв деградації технічних вузлів морських автономних платформ. У Innovative Research in Science and Economy (Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, December 3–5, 2025, pp. 785–789). Brussels, Belgium. https://doi.org/10.70286/isu-03.12.2025

Автором розроблено моделі сценаріїв деградації технічних вузлів морських автономних платформ.

52. Volyanskiy, S., Mazur, O., & Shcheniavskiy, G. (2026). Analytical assessment of the technical condition of maritime autonomous platforms. International Scientific and Practical Conference «Geneva Strategic Insights 2026: Global Summit on Multidisciplinary Science, Diplomacy and Future Technologies». Geneva, Switzerland: International University in Geneva, February 4.

Автором проведено аналітичну оцінку технічного стану морських автономних платформ.

53. Волянський, С. М., Пуляєв, І. О., & Добровольска, Л. О. (2026). Інформаційні потоки та моніторинг технічного стану автономних морських

платформ. У Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference (с. 443–446). International Scientific Unity. Афіни, Греція, 11–13 лютого 2026. https://doi.org/10.70286/isu-11.02.2026

Автором запропоновано підходи до організації інформаційних потоків та моніторингу технічного стану морських автономних платформ.

54. Volyanskiy, S., Dobrovolska, L., & Kozachuk, A. (2026). Simplified 3-DOF dynamic model for controlling an autonomous maritime platform in wavy conditions. International Scientific and Practical Conference «Tokyo Quantum Leap 2026: International Forum on Integrative Science, High-Tech and Global Sustainability», University of Tokyo, Japan, 18 February 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.18686308

Автором розроблено спрощену 3-DOF динамічну модель керування морською автономною платформою в умовах хвильових перешкод.

ДОДАТОК Б

СПРОЩЕНИЙ СИМУЛЯЦІЙНИЙ СЦЕНАРІЙ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КООПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ КОМУНІКАЦІЙНИХ ПРОТОКОЛІВ У ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ БАГАТОАГЕНТНИХ МЕРЕЖАХ АМТЗ

```
importtorch
importtorch.nnasnn
importtorch.optimasoptim
importnumpyasnp
importmatplotlib
matplotlib.use('Agg')
importmatplotlib.pyplotasplt
importseabornassns
importos
importshutil

# Setrandomseedsforstrictreproducibility
torch.manual_seed(42)
np.random.seed(42)

# Parameters
T_steps = 150
dx = 1.0
x = np.linspace(0, 150, T_steps)
dt = 0.1

# GenerateCurvedChannel
y_center_np = 3.5 * np.sin(2 * np.pi * x / 100.0) + 1.2 * np.cos(2 * np.pi * x / 50.0)
# ChannelWidthnarrowsinthemiddle (bottleneck)
W_np = 6.0 - 1.5 * np.exp(-((x - 75.0) / 25.0) ** 2)

y_left_np = y_center_np - W_np / 2.0
y_right_np = y_center_np + W_np / 2.0

# ConverttoPyTorchtensors
device = torch.device('cuda' iftorch.cuda.is_available() else 'cpu')
x_t = torch.tensor(x, dtype=torch.float32, device=device)
y_center_t = torch.tensor(y_center_np, dtype=torch.float32, device=device)
y_left_t = torch.tensor(y_left_np, dtype=torch.float32, device=device)
y_right_t = torch.tensor(y_right_np, dtype=torch.float32, device=device)
W_t = torch.tensor(W_np, dtype=torch.float32, device=device)

classDIALSystem(nn.Module):
def __init__(self):
super(DIALSystem, self).__init__()
        # Agent 1 Encoder (mapslocalobservationtomessage)
        self.enc1 = nn.Sequential(
nn.Linear(1, 8),
nn.Tanh(),
nn.Linear(8, 1)
        )
        # Agent 2 Encoder
        self.enc2 = nn.Sequential(
nn.Linear(1, 8),
nn.Tanh(),
nn.Linear(8, 1)
        )
        # Agent 1 Decoder (mapslocalobservationandreceivedmessagetosteeringaction)
        self.dec1 = nn.Sequential(
```

```
nn.Linear(2, 16),
nn.Tanh(),
nn.Linear(16, 1)
        )
        # Agent 2 Decoder
        self.dec2 = nn.Sequential(
nn.Linear(2, 16),
nn.Tanh(),
nn.Linear(16, 1)
        )

defforward(self, comm_noise_std=0.3, drift_std=0.05, enable_comm=True):
        y1 = torch.zeros(T_steps, device=device)
        y2 = torch.zeros(T_steps, device=device)

        # Initialpositions (deviatedfromcenter)
        y1[0] = y_center_t[0] - 1.2
        y2[0] = y_center_t[0] + 1.2

loss = torch.tensor(0.0, device=device)
        u1_list = []
        u2_list = []
        m1_list = []
        m2_list = []

for t inrange(T_steps - 1):
            # Localobservations
            # Agent 1 onlyseesdistancetoleftboundary
            o1 = y1[t] - y_left_t[t]
            # Agent 2 onlyseesdistancetorightboundary
            o2 = y_right_t[t] - y2[t]

            # Messageencoding
            m1 = self.enc1(o1.unsqueeze(0)).squeeze()
            m2 = self.enc2(o2.unsqueeze(0)).squeeze()

            m1_list.append(m1.item())
            m2_list.append(m2.item())

            # CommunicationChannelwithInterference (Noise)
ifenable_comm:
                noise1 = torch.normal(0.0, comm_noise_std, size=(), device=device)
                noise2 = torch.normal(0.0, comm_noise_std, size=(), device=device)
                hat_m1 = m1 + noise1
                hat_m2 = m2 + noise2
else:
                hat_m1 = torch.tensor(0.0, device=device)
                hat_m2 = torch.tensor(0.0, device=device)

            # Decoder / Controller
            # Agent 1 takesitsobservationandAgent 2's receivedmessage
            in1 = torch.stack([o1, hat_m2])
            u1 = self.dec1(in1).squeeze()

            # Agent 2 takesitsobservationandAgent 1's receivedmessage
            in2 = torch.stack([o2, hat_m1])
            u2 = self.dec2(in2).squeeze()

            u1_list.append(u1.item())
            u2_list.append(u2.item())

            # Environmentdynamicswithdrift (wind/waves)
            drift1 = torch.normal(0.0, drift_std, size=(), device=device)
            drift2 = torch.normal(0.0, drift_std, size=(), device=device)

            # Updatepositions (Eulerstep)
            y1[t+1] = y1[t] + u1 * dt + drift1
            y2[t+1] = y2[t] + u2 * dt + drift2
```

```
            # Accumulateloss (trackingerror + controleffortpenalty)
    loss = loss + (y1[t+1] - y_center_t[t+1])**2 + (y2[t+1] - y_center_t[t+1])**2
    loss = loss + 0.05 * (u1**2 + u2**2)

    return y1, y2, loss / T_steps, u1_list, u2_list, m1_list, m2_list

    # InstantiateandTrain DIAL System
    model = DIALSystem().to(device)
    optimizer = optim.Adam(model.parameters(), lr=0.01)

    num_epochs = 250
    loss_history = []

    print("Starting DIAL training...")
    forepochinrange(num_epochs):
    optimizer.zero_grad()
        _, _, loss, _, _, _, _ = model(comm_noise_std=0.4, drift_std=0.05, enable_comm=True)
    loss.backward()
    optimizer.step()
    loss_history.append(loss.item())

    if (epoch + 1) % 50 == 0:
    print(f"Epoch {epoch+1:03d}/{num_epochs} | JointLoss: {loss.item():.4f}")

    # Simulateaftertraining
    model.eval()
    withtorch.no_grad():
        y1_dial, y2_dial, loss_dial, u1_dial, u2_dial, m1_dial, m2_dial = model(comm_noise_std=0.4, drift_std=0.05,
enable_comm=True)
        y1_dial = y1_dial.cpu().numpy()
        y2_dial = y2_dial.cpu().numpy()

    # Simulate NO COMMUNICATION case
    # (Wesetenable_comm=Falsetomimicagentswithzerocommunicationweights, actingindependently)
    withtorch.no_grad():
        y1_nocomm, y2_nocomm, loss_nocomm, _, _, _, _ = model(comm_noise_std=0.4, drift_std=0.05,
enable_comm=False)
        y1_nocomm = y1_nocomm.cpu().numpy()
        y2_nocomm = y2_nocomm.cpu().numpy()

    # Simulate UNOPTIMIZED COMMUNICATION case
    # (Weinstantiate a freshmodelwithrandomweightsrepresentingactivecommunicationbutnoestablishedprotocol)
    random_model = DIALSystem().to(device)
    withtorch.no_grad():
        y1_unopt, y2_nopt, loss_unopt, _, _, _, _ = random_model(comm_noise_std=0.4, drift_std=0.05,
enable_comm=True)
        y1_unopt = y1_unopt.cpu().numpy()
        y2_unopt = y2_nopt.cpu().numpy()

    # Savefinalmetricsandgenerateplottingscript
    print(f"DIALLoss: {loss_dial.item():.4f}")
    print(f"No-CommLoss: {loss_nocomm.item():.4f}")
    print(f"UnoptimizedCommLoss: {loss_unopt.item():.4f}")

    # Visualizationsetup
    sns.set_theme(style='whitegrid', palette='colorblind', font='DejaVuSans')

    fig = plt.figure(figsize=(16, 12))
    gs = fig.add_gridspec(2, 2, hspace=0.3, wspace=0.25)

    ax1 = fig.add_subplot(gs[0, 0]) # Trajectories: NoCommvs DIAL
    ax2 = fig.add_subplot(gs[0, 1]) # TrainingConvergence
    ax3 = fig.add_subplot(gs[1, 0]) # Cross-TrackErrorCompare
    ax4 = fig.add_subplot(gs[1, 1]) # DIAL MessageSynchronization

    # 1. Trajectoriesplot
    ax1.plot(x, y_left_np, color='gray', linestyle='--', label='Ліва межа каналу')
    ax1.plot(x, y_right_np, color='gray', linestyle='--', label='Права межа каналу')
    ax1.plot(x, y_center_np, color='black', alpha=0.5, linestyle=':', label='Осьова лінія (Ціль)')
```

```
    # Fillthechannelregionforvisualrichness
    ax1.fill_between(x, y_left_np, y_right_np, color='lightblue', alpha=0.1)

    # HighlightBottleneckArea
    ax1.axvspan(50, 100, color='red', alpha=0.05, label='Вузьке місце (Пляшкове горло)')

    # PlotNoCommtrajectories
    ax1.plot(x, y1_nocomm, color='purple', linestyle=':', label='АМТЗ 1 (Без зв\'язку)', alpha=0.7)
    ax1.plot(x, y2_nocomm, color='magenta', linestyle=':', label='АМТЗ 2 (Без зв\'язку)', alpha=0.7)

    # Plot DIAL trajectories
    ax1.plot(x, y1_dial, color='teal', linewidth=2.5, label='АМТЗ 1 (Кооперативний DIAL)')
    ax1.plot(x, y2_dial, color='darkgreen', linewidth=2.5, label='АМТЗ 2 (Кооперативний DIAL)')

    ax1.set_title("1. Порівняння траєкторій руху у вигнутому фарватері", fontsize=12, fontweight='bold', pad=10)
    ax1.set_xlabel("Поздовжня відстань x (м)")
    ax1.set_ylabel("Поперечне зміщення y (м)")
    ax1.legend(fontsize=9, loc='upperleft')

    # 2. Convergenceplot
    ax2.plot(range(1, num_epochs+1), loss_history, color='green', linewidth=2, label='Епохи навчання DIAL')
    ax2.axhline(loss_nocomm.item(), color='purple', linestyle='--', label='Рівень втрат без зв\'язку')
    ax2.axhline(loss_unopt.item(), color='orange', linestyle='--', label='Рівень неоптимізованого зв\'язку')
    ax2.set_yscale('log')
    ax2.set_title("2. Збіжність алгоритму навчання DIAL за епохами", fontsize=12, fontweight='bold', pad=10)
    ax2.set_xlabel("Епоха навчання")
    ax2.set_ylabel("Сукупний функціонал втрат J (логарифмічний масштаб)")
    ax2.legend(fontsize=9)

    # 3. Cross-trackerrorovertimesteps
    cte_dial = np.abs(y1_dial - y_center_np) + np.abs(y2_dial - y_center_np)
    cte_nocomm = np.abs(y1_nocomm - y_center_np) + np.abs(y2_nocomm - y_center_np)
    cte_unopt = np.abs(y1_unopt - y_center_np) + np.abs(y2_unopt - y_center_np)

    ax3.plot(x, cte_nocomm, color='purple', linestyle=':', label='Без зв\'язку (Похибка =
{:.2f}м)'.format(np.mean(cte_nocomm)))
    ax3.plot(x, cte_unopt, color='orange', linestyle='--', label='Неоптимізований зв\'язок (Похибка =
{:.2f}м)'.format(np.mean(cte_unopt)))
    ax3.plot(x, cte_dial, color='green', linewidth=2, label='Кооперативний DIAL (Похибка =
{:.2f}м)'.format(np.mean(cte_dial)))
    ax3.set_title("3. Сумарна похибка утримання осі каналу (Cross-TrackError)", fontsize=12, fontweight='bold',
pad=10)
    ax3.set_xlabel("Поздовжня відстань x (м)")
    ax3.set_ylabel("Абсолютна похибка відхилення |dy1| + |dy2| (м)")
    ax3.legend(fontsize=9)

    # 4. Messagevaluesovertimesteps
    ax4.plot(x[:-1], m1_dial, color='teal', label='Повідомлення m1 (АМТЗ 1)')
    ax4.plot(x[:-1], m2_dial, color='darkgreen', linestyle='--', label='Повідомлення m2 (АМТЗ 2)')
    ax4.set_title("4. Динаміка повідомлень DIAL в умовах завад", fontsize=12, fontweight='bold', pad=10)
    ax4.set_xlabel("Поздовжня відстань x (м)")
    ax4.set_ylabel("Амплітуда неперервного сигналу m(t)")
    ax4.legend(fontsize=9)

    # Visualpolishandtitles
    fig.suptitle("Імітація багатоагентного навчання DIAL для кооперативного проходження вузького каналу
АМТЗ", fontsize=15, fontweight='bold', y=0.96)
    sns.despine(fig=fig)
    plt.tight_layout(pad=2.0)

    # Saveimage
    chart_path = '/workspace/scratch/trajectory_dial_simulation.png'
    fig.savefig(chart_path, dpi=150, bbox_inches='tight')
    plt.close()

    # Copytoworkspaceout
    shutil.copy(chart_path, '/workspace/out/trajectory_dial_simulation.png')
    print("Successfully!")
```

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД
ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

КАЗЕННЕ ПІДПРИЄМСТВО
«МОРСЬКА ПОШУКОВО-
РЯТУВАЛЬНА СЛУЖБА»

Україна, 65114 м. Одеса,
вул. Люстдорфська дорога, 140 а
Тел.: +380 48 785 07 17
Факс: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

MINISTRY FOR DEVELOPMENT OF
COMMUNITIES AND TERRITORIES
OF UKRAINE

STATE ENTERPRISE
"MARITIME SEARCH AND
RESCUE SERVICE"

140 a, Lustdorfska Doroha Str., Odesa
65114, Ukraine
Tel: +380 48 785 07 17
Fax: +380 48 785 07 18
e-mail: semsrs@sar.gov.ua

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
«Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності»
Волянського Сергія Миколайовича

Результати дисертаційної роботи Волянського Сергія Миколайовича, присвяченої розробленню методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності, були впроваджені у діяльність Казенного підприємства «Морська пошуково-рятувальна служба» та використані для вдосконалення процесів аналізу експлуатаційних даних, оцінювання технічного стану морських технічних засобів, прогнозування режимів функціонування та підтримки прийняття управлінських рішень.

У процесі апробації особливу увагу було приділено запропонованим автором підходам до інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів з урахуванням впливу технічних, енергетичних, навігаційних, інформаційних та зовнішніх факторів невизначеності. Використання розроблених моделей дозволило здійснювати комплексний аналіз результативності функціонування морських систем та формувати обґрунтовані управлінські рішення на основі сукупності експлуатаційних показників.

Практичне застосування запропонованих у роботі методів адаптивного управління та сценарного моделювання забезпечило можливість прогнозування змін технічного стану обладнання, оцінювання впливу зовнішніх умов на виконання місійних завдань та визначення раціональних режимів функціонування морських технічних систем. Це дозволило підвищити обґрунтованість прийняття рішень в умовах неповноти інформації, змінності зовнішнього середовища та ресурсних обмежень.

Особливу практичну цінність становлять розроблені автором інформаційні механізми інтеграції даних, концепція цифрового двійника та елементи системи підтримки прийняття рішень, які забезпечують безперервний моніторинг параметрів функціонування, прогнозування можливих відхилень від штатних режимів роботи та формування рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації морських технічних засобів.

Використання результатів дисертаційного дослідження сприяло підвищенню якості аналізу експлуатаційної інформації, удосконаленню процедур контролю технічного стану, покращенню процесів планування та управління ресурсами, а також підвищенню ефективності функціонування морських систем в умовах невизначеності.

Т.в.о директора Руслан МІКРУХ

Дементій БУРЛАЧЕНКО
+38 (048) 774-42-15

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

«МАРІН ТЕХ СЕРВІС»

ДРПОУ 41738536, адреса: 65091, місто Одеса, вулиця Комітетська, будинок 14, офіс 210
E-mail: marin.servis.2017@gmail.com Телефон: +380935665375

м. Одеса «__23__» січня__2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Волянського Сергія Миколайовича
на тему:
«Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності»

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «МАРІН ТЕХ СЕРВІС», склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Волянського Сергія Миколайовича впроваджені та використовуються у практичній діяльності компанії під час аналізу технічного стану суднових систем, оцінювання ефективності функціонування морських технічних засобів, прогнозування режимів експлуатації та підтримки прийняття технічних рішень.

У діяльності підприємства використано розроблені автором моделі інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, які забезпечують комплексне врахування технічних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних факторів впливу. Застосування запропонованого підходу дозволило підвищити якість аналізу експлуатаційних процесів та обґрунтованість управлінських рішень щодо функціонування морських технічних систем.

Практичне значення для підприємства мають розроблені методи адаптивного управління та прогнозування режимів функціонування технічних комплексів. Їхнє використання забезпечує можливість своєчасного виявлення потенційних відхилень від штатних режимів роботи, прогнозування змін у технічному стані обладнання та оцінювання впливу зовнішніх факторів на ефективність експлуатації морських транспортних систем.

Особливу цінність становлять запропоновані у дисертаційній роботі підходи до створення цифрових двійників та інтеграції неоднорідних інформаційних потоків у межах єдиного інформаційного середовища. Це дозволило покращити процеси моніторингу технічного стану обладнання, підвищити оперативність аналізу експлуатаційних даних та забезпечити інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо технічного обслуговування і планування експлуатації.

Впровадження результатів дослідження сприяло удосконаленню процедур контролю технічного стану морських технічних засобів, підвищенню ефективності використання ресурсів, покращенню процесів планування технічного обслуговування та зниженню ризиків виникнення критичних режимів функціонування обладнання.

Результати дисертаційної роботи рекомендуються до подальшого використання під час розвитку інтелектуальних систем моніторингу, цифрових технологій управління експлуатацією морських технічних засобів, систем підтримки прийняття рішень та засобів прогнозування технічного стану обладнання.

З повагою

Директор **Олексій БУЛАТОВ**



QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
IS CERTIFIED IN COMPLIANCE
WITH ДСТУ ISO 9001:2015
by Shipping Register of Ukraine

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження

м. _Одеса ___ «4» _лютого_ 2026 р.

Ми, що нижче підписалися, представники _____ТОВ «БСК БОТС»_____
(назва підприємства / організації)

в особі _____Літвінчука М.В._____, склали цей акт про те, що результати
(посада, ПІБ)

дисертаційної роботи Волянського Сергія Миколайовича на тему: «**Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності**»

впроваджені та використовуються у діяльності нашого підприємства під час технічного супроводу, модернізації, діагностування та оцінювання працездатності морських технічних систем, а також при виконанні робіт, пов'язаних з аналізом функціонування суднових інформаційних і керуючих комплексів.

У діяльності підприємства використано запропоновані автором моделі інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів та методи аналізу впливу технічних, інформаційних, енергетичних і зовнішніх факторів на результати функціонування морських систем. Застосування зазначених підходів дозволяє здійснювати комплексну оцінку технічного стану обладнання та визначати фактори, які найбільше впливають на ефективність його роботи.

Практичне значення для підприємства мають розроблені методи адаптивного управління та прогнозування режимів функціонування технічних комплексів, які забезпечують можливість раннього виявлення ознак деградації обладнання, оцінювання ризиків виникнення критичних режимів роботи та формування рекомендацій щодо вибору раціональних експлуатаційних рішень.

Особливу цінність становлять розроблені в дисертаційній роботі інформаційні механізми інтеграції даних та концепція цифрового двійника, які дозволяють поєднувати результати моніторингу, діагностування та аналізу експлуатаційних параметрів у межах єдиного інформаційного середовища. Це підвищує оперативність прийняття рішень щодо технічного обслуговування, модернізації та подальшої експлуатації морських технічних засобів.

Окреме практичне значення мають результати, пов'язані зі сценарним моделюванням режимів функціонування морських систем та прогнозуванням їхньої ефективності в умовах невизначеності, що дозволяє оцінювати наслідки можливих змін технічного стану обладнання ще на етапі планування робіт.

Результати дисертаційного дослідження рекомендуються до подальшого використання під час технічного супроводу, модернізації та розвитку суднових інформаційних систем, засобів моніторингу технічного стану, цифрових технологій управління та систем підтримки прийняття рішень у морській галузі.

Представник підприємства: Директор _____/Літвінчук М.В./

М.П.

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
ЄВРО ГРАСКОР
Організація та проведення суднoремонтних робіт
65013, м. Одеса, вул. Локомотивна буд. 38.
Код ЄДРПОУ 40174331
Тел. +380937093999 E-mail: eurograskor@ukr.net

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Волянського Сергія Михайловича

м. Чорноморськ «_16_» __лютого__ 2026 р.

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «ЄВРО ГРАСКОР», склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Волянського Сергія Миколайовича на тему **«Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності»** впроваджені та використовуються у діяльності підприємства під час технічного супроводу, оцінювання технічного стану, планування ремонтних робіт та аналізу ефективності функціонування морських технічних систем.

У діяльності підприємства використано запропоновані автором методи інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, що базуються на комплексному врахуванні технічних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних факторів впливу. Використання зазначених підходів дозволило підвищити обґрунтованість оцінювання поточного технічного стану обладнання та визначення пріоритетності проведення ремонтних і профілактичних робіт.

Практичне значення для підприємства мають розроблені моделі прогнозування ефективності експлуатації та методи сценарного аналізу, які забезпечують можливість оцінювання наслідків зміни технічного стану обладнання, впливу зовнішніх умов експлуатації та ресурсних обмежень на результати функціонування морських транспортних систем. Це сприяє підвищенню ефективності планування технічного обслуговування та модернізації обладнання.

Особливу цінність становлять запропоновані у дисертаційній роботі підходи до створення цифрових двійників та інтеграції експлуатаційних даних у межах єдиного інформаційного середовища. Їх використання дозволяє здійснювати безперервний моніторинг технічного стану обладнання, прогнозувати можливі відмови окремих вузлів та формувати рекомендації щодо вибору раціональних режимів експлуатації і технічного обслуговування.

Впровадження результатів дослідження сприяло удосконаленню процедур технічного супроводу морських технічних систем, підвищенню ефективності використання ресурсів, покращенню якості планування ремонтних робіт та зниженню ризиків виникнення критичних режимів функціонування обладнання.

Результати дисертаційної роботи рекомендуються до подальшого використання під час розвитку цифрових технологій технічного обслуговування, систем моніторингу технічного стану, засобів прогнозування залишкового ресурсу обладнання та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у морській галузі.

З Повагою,
Директор **В.В. Гнатенко**

УКРАЇНА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЄВРО ГРАСКОР» ІДЕНТ. КОД 40174331

СВІДОТСТВО ПРО ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ ПІДПРИЄМСТВА № СВП-22-3-84-23

ОТСТВО ПРО ВИЗНАННЯ № СВ-32-3-3-24

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ СЕРТИФІКОВАНА ВІДПОВІДНО ДО ДСТУ ISO 9001-2015

ТОВ «ЛЕМА КАРГО СЕРВІС»
87510, Україна, м.Маріуполь,
пр-т Луніна, 21-7
+38 096 0 53 00 50
+38 096 0 53 00 49
info@lemalcs.com

LEMA CARGO SERVICE LLC
87510, Ukraine, Mariupol,
Lunin ave., 21-7
+38 096 0 53 00 50
+38 096 0 53 00 49
info@lemalcs.com

Исх. № __4568-21__
От___14.12.2021_

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Волянського Сергія Миколайовича

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «LEMA CARGO SERVICE», склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Волянського Сергія Миколайовича на тему «**Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності**» впроваджені та використовуються у практичній діяльності підприємства під час планування транспортних операцій, оцінювання ефективності виконання виробничих завдань, аналізу експлуатаційних ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень.

У діяльності підприємства використано запропоновані автором методи інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, які дозволяють комплексно враховувати вплив технічних, інформаційних, енергетичних та зовнішніх факторів на результати виконання транспортних операцій. Застосування зазначених підходів забезпечує підвищення обґрунтованості оцінювання результативності функціонування транспортних систем та ефективності використання наявних ресурсів.

Практичне значення для підприємства мають розроблені моделі прогнозування ефективності експлуатації та сценарного аналізу, які дозволяють оцінювати можливі варіанти розвитку експлуатаційних ситуацій, визначати вплив невизначеності на результати виконання транспортних завдань та формувати раціональні стратегії управління ресурсами в умовах змінного зовнішнього середовища.

Особливу цінність становлять запропоновані у дисертаційній роботі інформаційні механізми підтримки прийняття рішень та підходи до інтеграції експлуатаційних даних у межах єдиного інформаційного простору. Їх використання сприяє підвищенню оперативності аналізу інформації, своєчасному виявленню ризиків та формуванню обґрунтованих управлінських рішень щодо організації транспортних процесів.

Використання результатів дослідження дозволило удосконалити процедури планування транспортних операцій, підвищити ефективність використання ресурсів, покращити контроль виконання виробничих завдань та підвищити стійкість функціонування транспортних систем в умовах невизначеності.

Результати дисертаційної роботи рекомендуються до подальшого використання під час розвитку інформаційно-аналітичних систем управління транспортними процесами, систем підтримки прийняття рішень, засобів прогнозування експлуатаційної ефективності та цифрових технологій управління у сфері морських перевезень.

З повагою,
Директор ТОВ "Лема Карго Сервіс" Косарев Ф.В.

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут морського флоту

Кафедра «Судноводіння і морська безпека»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи
_____ Шумило О.М.
«08» 06 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Волянського Сергія Михайловича, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора наук зі спеціальності 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Комісією у складі: в.о. директора ННІМФ к.т.н. доц. Кирнаца В.І., завідувача кафедри «Судноводіння і морська безпека» д.т.н. проф. Мельника О.М., начальника навчально-методичного відділу ОНМУ доц. Россомахи О.А., складено акт про те, що результати дисертаційного дослідження Волянського Сергія Михайловича на тему «Методологія управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності» впроваджені в навчальний процес у межах дисциплін «Мережева та інформаційна безпека в морському секторі» та «Організація безпеки морських перевезень» для студентів, які навчаються за спеціальністю 125 – Кібербезпека та 271 – Морський та внутрішній водний транспорт.

В.О. директора ННІМФ
к.т.н. доцент _____ Владислав КИРНАЦ

Зав. каф. СМБ
д.т.н. професор _____ Олексій МЕЛЬНИК

Начальник НМВ
доцент _____ Олег РОССОМАХА