

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

ВОЛЯНСЬКИЙ СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ



УДК 629.5.083

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ
МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ В УМОВАХ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2026

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана в Національному університеті кораблебудування
імені адмірала Макарова.

Робота виконана самостійно.

Офіційні опоненти: **ГРИЦУК Ігор Валерійович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівського національного політехнічного університету МОН України

МЕЛЕНЧУК Тетяна Михайлівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та логістики Національного університету «Одеська політехніка» МОН України

ФОМІН Олексій Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць Національного транспортного університету МОН України, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться «03» листопада 2026 р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65052, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зала засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8 та за електронною адресою: <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Реферат розісланий 1 жовтня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01,
доктор технічних наук, професор



Віталій НІКОЛЬСЬКИЙ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку морського транспорту характеризується активним впровадженням автономних морських транспортних засобів, безкіпажних платформ та інтелектуальних систем управління, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності експлуатації транспортних систем, зниження впливу людського чинника та забезпечення стійкого функціонування морських технічних комплексів. Водночас зростання рівня автономності супроводжується ускладненням структури морських транспортних систем, збільшенням обсягів інформації, необхідністю функціонування в умовах стохастичних збурень, ресурсних обмежень та багатофакторної невизначеності морського середовища.

Теоретичні та прикладні аспекти управління складними технічними системами, транспортними процесами, адаптивними системами керування, методами підтримки прийняття рішень, нечіткою логікою та багатокритеріальним аналізом висвітлені у працях В. Глушкова, В. Кунцевича, Ю. Зайченка, Л. Заде, Р. Беллмана, Р. Калмана, Т. Сааті та інших учених. Значний внесок у розвиток теорії та практики експлуатації морського транспорту, суднових технічних систем, енергоефективності та інформаційного забезпечення морської галузі зробили В. Голіков, О. Онищенко, В. Будашко, О. Мельник, В. Вичужанін, І. Грицук та інші науковці. Разом із тим результати виконаних досліджень переважно орієнтовані на вирішення окремих задач навігації, керування рухом, енергозабезпечення, технічної діагностики або інформаційної підтримки експлуатації морських систем.

Аналіз сучасного стану наукових досліджень свідчить про наявність низки наукових протиріч. З одного боку, підвищення рівня автономності морських транспортних засобів потребує забезпечення високої ефективності виконання автономних місій в умовах невизначеності, а з іншого – існуючі моделі управління переважно базуються на детермінованих підходах і недостатньо враховують стохастичний характер морського середовища. Поряд із цим спостерігається протиріччя між необхідністю комплексного врахування технічного стану, енергетичних ресурсів, ризиків, інформаційного забезпечення та результативності місії і відсутністю інтегрованих методів оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів.

Водночас потреба у прогностичному та адаптивному управлінні автономними морськими транспортними засобами вступає у суперечність із переважним використанням реактивних схем контролю та моніторингу, орієнтованих на аналіз уже наявних відхилень. Додатково ускладнює проблему необхідність оброблення значних обсягів неоднорідної інформації в режимі реального часу, тоді як сучасні підходи недостатньо інтегрують можливості цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, адаптивних алгоритмів управління та засобів прогнозування технічного стану в межах єдиного контуру експлуатаційного управління.

Таким чином, існуючі наукові підходи не забезпечують формування цілісної методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка б поєднувала інтегральне оцінювання ефективності, адаптивне управління, цифрові двійники, інформаційно-аналітичне забезпечення, сценарне моделювання та механізми підтримки прийняття рішень в умовах

багатофакторної невизначеності. Це зумовлює актуальність теми дисертаційного дослідження, визначає його мету, завдання та наукову спрямованість.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до пріоритетних напрямів розвитку транспортної науки, цифровізації транспортних систем та впровадження інтелектуальних технологій управління на морському транспорті. Тематика роботи узгоджується з положеннями Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, Морської доктрини України на період до 2035 року, а також відповідає пріоритетним напрямам наукової та науково-технічної діяльності Міністерства освіти і науки України у сфері транспортних систем, інформаційних технологій, енергоефективності та інтелектуального управління.

Наукові результати дисертації отримані в межах виконання науково-дослідних робіт, пов'язаних із забезпеченням ефективності функціонування морських транспортних систем, розвитком інформаційних технологій управління та створенням перспективних морських автономних платформ, а саме:

- «Комплексне забезпечення безпеки експлуатації морських транспортних суден» (№ державної реєстрації 0123U100791), у межах якої автором досліджувалися питання оцінювання експлуатаційної ефективності та стійкості функціонування морських транспортних систем;

- «Інформаційні системи управління та підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури морських перевезень в умовах воєнного стану» (№ державної реєстрації 0124U001164), де автор брав участь у розробленні інформаційно-аналітичних механізмів підтримки прийняття рішень та архітектур інтелектуальних систем управління;

- «Актуальні проблеми управління системними властивостями морських транспортних засобів в різних умовах експлуатації» (№ державної реєстрації 0122U200859), у межах якої автором досліджувалися питання адаптивного управління, оцінювання технічного стану та функціонування автономних морських систем в умовах невизначеності;

- науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи «Енергетична установка, пропульсивний комплекс і система управління автономного плавального апарата подвійного призначення» (№ державної реєстрації 0120U102577), що виконувалася за конкурсним фінансуванням МОН України (секція «Енергетика та енергоефективність»), у межах якої здобувач брав участь у дослідженнях, пов'язаних із розробленням систем управління, енергетичного забезпечення та підвищення ефективності експлуатації морських автономних платформ.

Отримані в дисертації результати є складовою виконаних досліджень та спрямовані на розвиток теоретико-методологічних засад управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності.

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 морських транспортних засобів у динамічному стохастичному морському середовищі.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі задачі:

- проведено аналіз сучасного стану розвитку автономних морських транспортних засобів, існуючих підходів до управління їх експлуатацією та визначено основні наукові проблеми і напрями підвищення ефективності функціонування автономних морських систем;

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

- сформовано концепцію місійно-орієнтованого оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів та розроблено інтегральні критерії оцінювання результативності автономних місій;

- розроблено математичні моделі оцінювання та прогнозування ефективності функціонування автономних морських транспортних засобів з урахуванням стохастичних збурень, змін технічного стану та ресурсних обмежень;

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

- розроблено інтегровану архітектуру адаптивного управління на основі поєднання прогнозного керування, нечіткої логіки, сценарного аналізу та механізмів адаптивного коригування параметрів функціонування системи;

- введено та формалізовано поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику автономних морських транспортних систем і досліджено її вплив на ефективність функціонування автономних морських транспортних засобів;

- розроблено методологічні засади інтеграції цифрових двійників, інформаційно-аналітичних засобів та систем підтримки прийняття рішень у контур управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів;

- розроблено інтелектуальні методи управління електромеханічними комплексами морських автономних платформ та досліджено їх вплив на енергоефективність і стійкість функціонування системи;

- розроблено структурно-сценарні моделі функціонування автономних морських транспортних засобів та механізми прогнозування критичних режимів експлуатації в умовах невизначеності;

- виконано математичне та імітаційне моделювання запропонованих моделей, методів і алгоритмів та оцінено їх ефективність у різних сценаріях функціонування автономних морських транспортних засобів.

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 процесів функціонування автономних морських транспортних засобів у стохастичному середовищі; методи теорії ймовірностей і випадкових процесів – для опису невизначеності та зовнішніх збурень; методи нечіткої логіки – для побудови інтелектуальних систем адаптивного управління; методи багатокритеріального аналізу – для інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів; методи сценарного аналізу та структурного моделювання – для прогнозування режимів функціонування та оцінювання ризиків; методи цифрового моделювання й обробки даних – для реалізації цифрових двійників, інтеграції інформаційних потоків і підтримки прийняття рішень.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розв’язанні важливої науково-прикладної проблеми розроблення теоретико-методологічних засад управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності на основі інтеграції адаптивного управління, систем підтримки прийняття рішень та сценарного моделювання.

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 багатфакторної 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 багатфакторного 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.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених теоретико-методологічних засад, математичних моделей, методів, алгоритмів та інформаційних механізмів для створення і вдосконалення систем управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, комплексів адаптивного управління та засобів прогнозування технічного стану морських транспортних систем.

Запропоновані у дисертації методи інтегрального оцінювання ефективності експлуатації, адаптивного управління, сценарного моделювання, прогнозування технічного стану та інформаційної підтримки прийняття рішень 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, що підтверджується відповідними актами впровадження.

Результати дослідження використано під час розроблення програмних засобів підтримки прийняття рішень, призначених для вибору раціональних режимів функціонування автономних морських транспортних засобів, прогнозування технічного стану, оцінювання експлуатаційних ризиків та формування адаптивних стратегій управління в умовах невизначеності.

Окремі результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес Одеського національного морського університету під час викладання дисциплін, пов'язаних із системами управління морським транспортом,

інтелектуальними транспортними технологіями, адаптивними системами керування, математичним моделюванням та інформаційно-аналітичним забезпеченням транспортних процесів.

Отримані результати сприяють розвитку науково-методичних засад управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, підвищенню рівня автоматизації інформаційних потоків в морській галузі, впровадженню інтелектуальних транспортних технологій та створюють підґрунтя для подальшого розвитку автономного судноплавства, цифрових двійників і систем підтримки прийняття рішень нового покоління.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, теоретичні положення, моделі, методи, алгоритми, висновки та рекомендації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать постановка окремих наукових завдань, розроблення моделей і методів дослідження, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів і формулювання висновків. Особистий внесок здобувача у спільних публікаціях наведено у списку праць за темою дисертації.

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. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 54 наукових працях, серед яких монографія, 33 наукові статті у фахових вітчизняних та закордонних рецензованих виданнях, у тому числі 10 статей у наукових періодичних виданнях, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, а також тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях.

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

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, зазначено методи дослідження, а також наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Представлено інформацію щодо апробації та публікації результатів дослідження, а також структуру дисертаційної роботи.

У *першому розділі «Теоретико-методологічні основи управління ефективністю автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності»* досліджено сучасний стан наукових підходів до управління автономними морськими транспортними засобами, проаналізовано існуючі концепції автономного судноплавства, адаптивного керування, систем підтримки прийняття рішень та цифрових двійників, а також визначено основні проблеми оцінювання ефективності функціонування автономних морських систем в умовах невизначеності.

У результаті аналізу встановлено, що сучасні наукові дослідження переважно орієнтовані на розв'язання окремих задач навігації, енергетичного менеджменту, безпеки руху та адаптивного керування, однак не забезпечують комплексного місійно-орієнтованого управління ефективністю автономних морських транспортних засобів. Виявлено відсутність єдиної методології, яка б інтегрувала процеси оцінювання ефективності, управління ризиками, цифрового моделювання та підтримки прийняття рішень у межах єдиного контуру управління.

Особливу увагу приділено дослідженню природи невизначеності, що супроводжує функціонування автономних морських транспортних засобів (рис. 1). Запропоновано розглядати простір невизначеності як багатокомпонентну систему, що включає екологічну, технічну, алгоритмічну та інформаційну складові:

$$U = u_e + u_t + u_a + u_i, \quad u_e, u_t, u_a, u_i \in U \quad (1)$$

де u_e – екологічна невизначеність; u_t – технічна невизначеність; u_a – алгоритмічна невизначеність; u_i – інформаційна невизначеність. Запропонований підхід дозволяє формалізувати вплив невизначеності на процес управління автономними місіями та враховувати ризики, пов'язані з функціонуванням адаптивних алгоритмів управління.

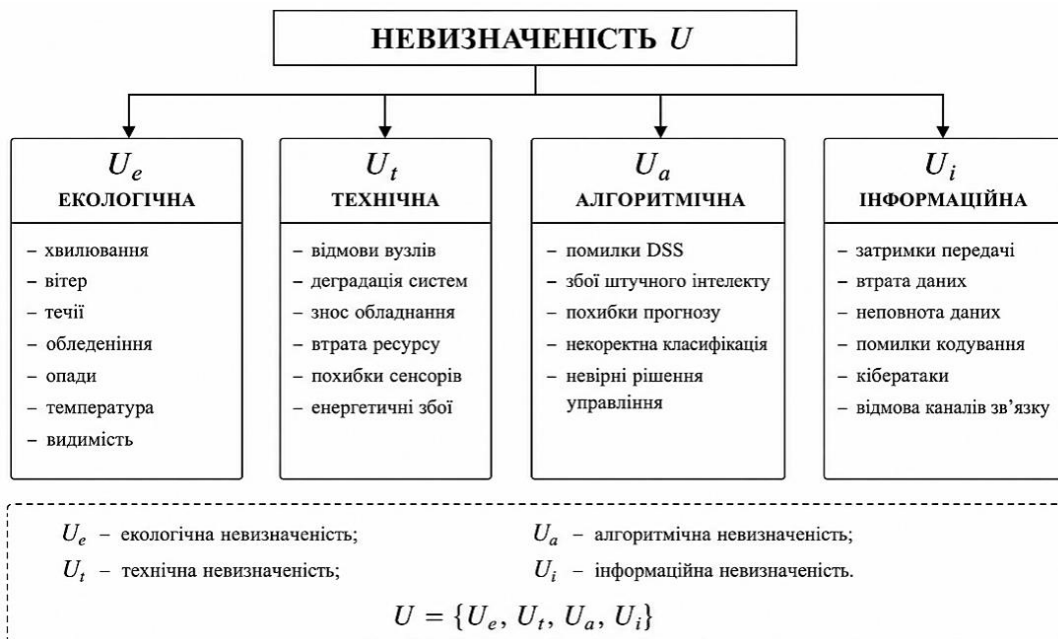


Рисунок 1 – Структура простору невизначеності автономного морського транспортного засобу

У роботі обґрунтовано доцільність використання місійно-орієнтованого підходу до оцінювання ефективності автономних морських транспортних засобів, відповідно до якого результативність функціонування системи визначається не окремими технічними характеристиками, а рівнем виконання цільової місії.

Ефективність автономної платформи представлено як функцію успішності виконання місії, надійності, енергоефективності, стабільності навігації та повноти виконання поставлених завдань:

$$M_s = \int_0^T (w_1 R(t) + w_2 E(t) + w_3 N(t) + w_4 T(t)) dt, \quad (2)$$

де M_s – успішність виконання місії; R – надійність; E – енергоефективність; N – стабільність процесу навігації; T – коефіцієнт виконання завдань.

На основі системного аналізу сформовано концептуальну модель управління ефективністю автономних морських транспортних засобів, яка інтегрує простір невизначеності, місійно-орієнтовану модель функціонування, адаптивне керування, системи підтримки прийняття рішень та механізми забезпечення операційної стійкості:

$$R(t) = F_{AMT3}(U(t), M(t), C(t), D(t)) \quad (3)$$

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.

У межах розробленої методології виконано класифікацію факторів, що впливають на ефективність експлуатації автономних морських транспортних засобів, та встановлено їхню відносну значущість із використанням методу аналізу ієрархій (рис. 2). Визначено, що найбільший вплив на результативність функціонування мають технічні, енергетичні та кліматичні фактори, які формують основу подальшого інтегрального оцінювання (рис. 3).

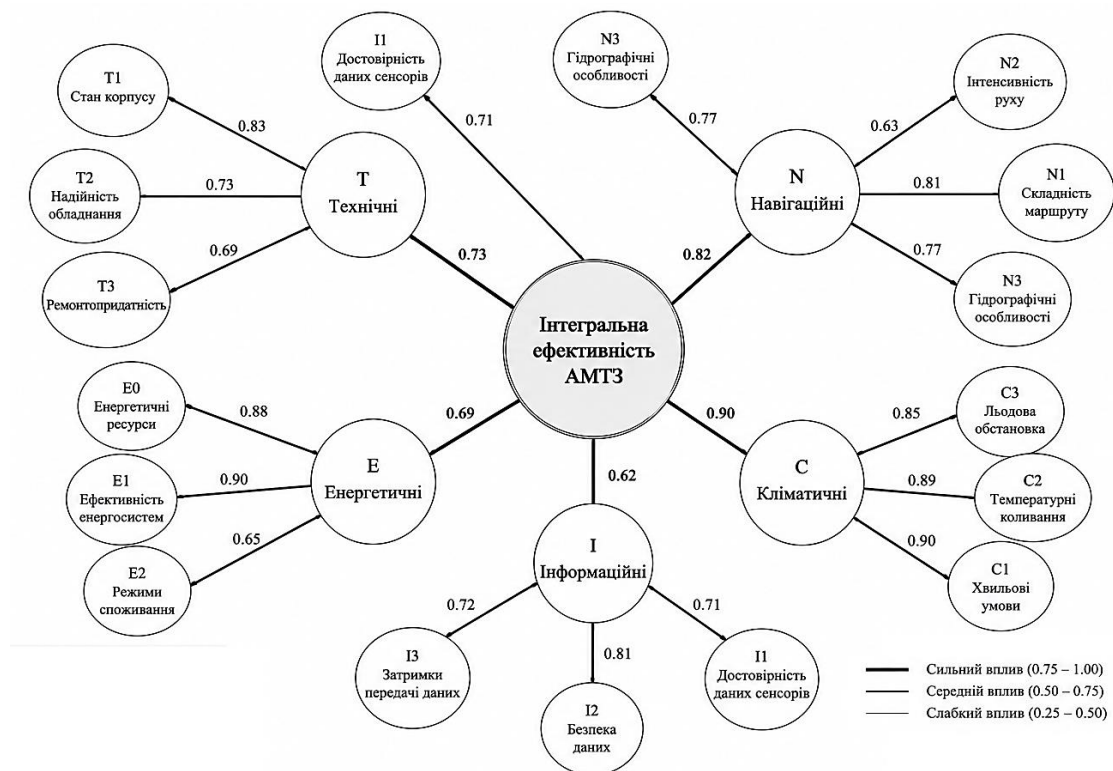


Рисунок 2 – Ієрархія факторів впливу на ефективність експлуатації АМТЗ

Для кількісної оцінки ефективності запропоновано інтегральний показник, який враховує вагові коефіцієнти груп факторів та їх локальні характеристики:

$$E_{\text{INT}} = \sum_{i=1}^n w_{g_i} \left(\sum_{j=1}^{m_i} w_{ij} \cdot K_{ij} \right), \quad (4)$$

де $E_{\text{інт}}$ – інтегральний показник ефективності; w_{gi} – вага i -тої групи факторів (визначається за методом АНР); 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 .



Рисунок 3 – Блок-схема етапів розрахунку інтегрального показника ефективності АМТЗ

Розглянуто архітектуру автономної платформи як когнітивного агента у складі морських роботизованих комплексів, що розширює межі місійно-орієнтованого підходу. При цьому 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.

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.

Ключовим результатом першого розділу є формування багаторівневої адаптивної архітектури управління ефективністю автономних морських транспортних засобів, що поєднує стратегічний, тактичний та операційний рівні управління. На стратегічному рівні визначаються цілі та критерії місії, на тактичному здійснюється аналіз даних і підтримка прийняття рішень, а на операційному реалізується адаптивне керування параметрами функціонування системи в реальному часі (рис. 4).

Для формалізації процесу управління ефективністю автономних морських транспортних засобів запропоновано узагальнену модель інтегральної ефективності, яка враховує місійну результативність, технічний стан, інформаційну забезпеченість, енергетичну ефективність та вплив ризиків:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n w_i K_i(t) \cdot S(t) - R(t), \quad (5)$$

де $E(t)$ – інтегральна ефективність експлуатації автономного морського транспортного засобу; $K_i(t)$ – нормалізовані показники функціонування окремих підсистем; w_i – вагові коефіцієнти показників; $S(t)$ – коефіцієнт успішності виконання автономної місії; $R(t)$ – інтегральний ризик функціонування в умовах невизначеності.

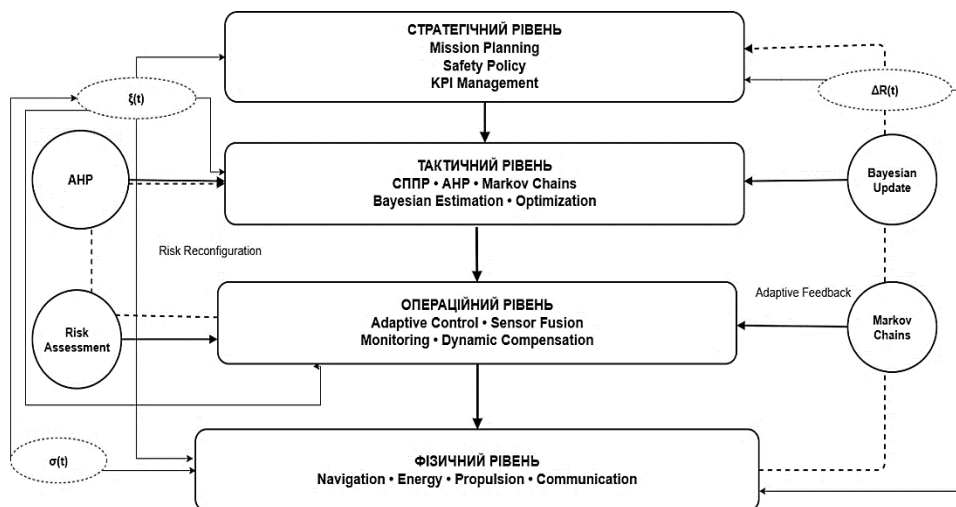


Рисунок 4 – Ієрархічна система адаптивного управління ефективністю АМТЗ

Запропонована залежність відображає місійно-орієнтований характер оцінювання ефективності та демонструє необхідність одночасного врахування технічних, інформаційних, енергетичних та ризик-утворюючих факторів у межах єдиного контуру управління.

Для узагальнення отриманих результатів та відображення логіки формування запропонованої методології розроблено концептуальну карту дослідження управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності (рис. 5).

Концептуальна карта відображає послідовність переходу від аналізу джерел невизначеності та проблемної області до формування теоретико-методологічного базису, розроблення інтегрованої системи адаптивного управління ефективністю АМТЗ, вибору аналітичного та цифрового інструментарію дослідження й практичної реалізації отриманих результатів. Центральним елементом методології виступає інтегрована система адаптивного управління ефективністю АМТЗ, яка поєднує механізми інтегрального оцінювання, сценарного моделювання, адаптивного управління, цифрових двійників та систем підтримки прийняття рішень. Реалізація запропонованого підходу забезпечує підвищення ефективності експлуатації, операційної стійкості, надійності та результативності автономних місій в умовах багатфакторної невизначеності.

У результаті проведених досліджень сформовано теоретико-методологічне підґрунтя для розроблення методології адаптивного управління ефективністю автономних морських транспортних засобів, що базується на місійно-орієнтованому принципі, інтегральному оцінюванні ефективності, врахуванні алгоритмічної невизначеності та використанні багаторівневих механізмів підтримки прийняття рішень. Отримані результати стали основою для подальшого розроблення математичних моделей, методів адаптивного управління та інформаційно-аналітичних засобів, представлених у наступних розділах дисертації.

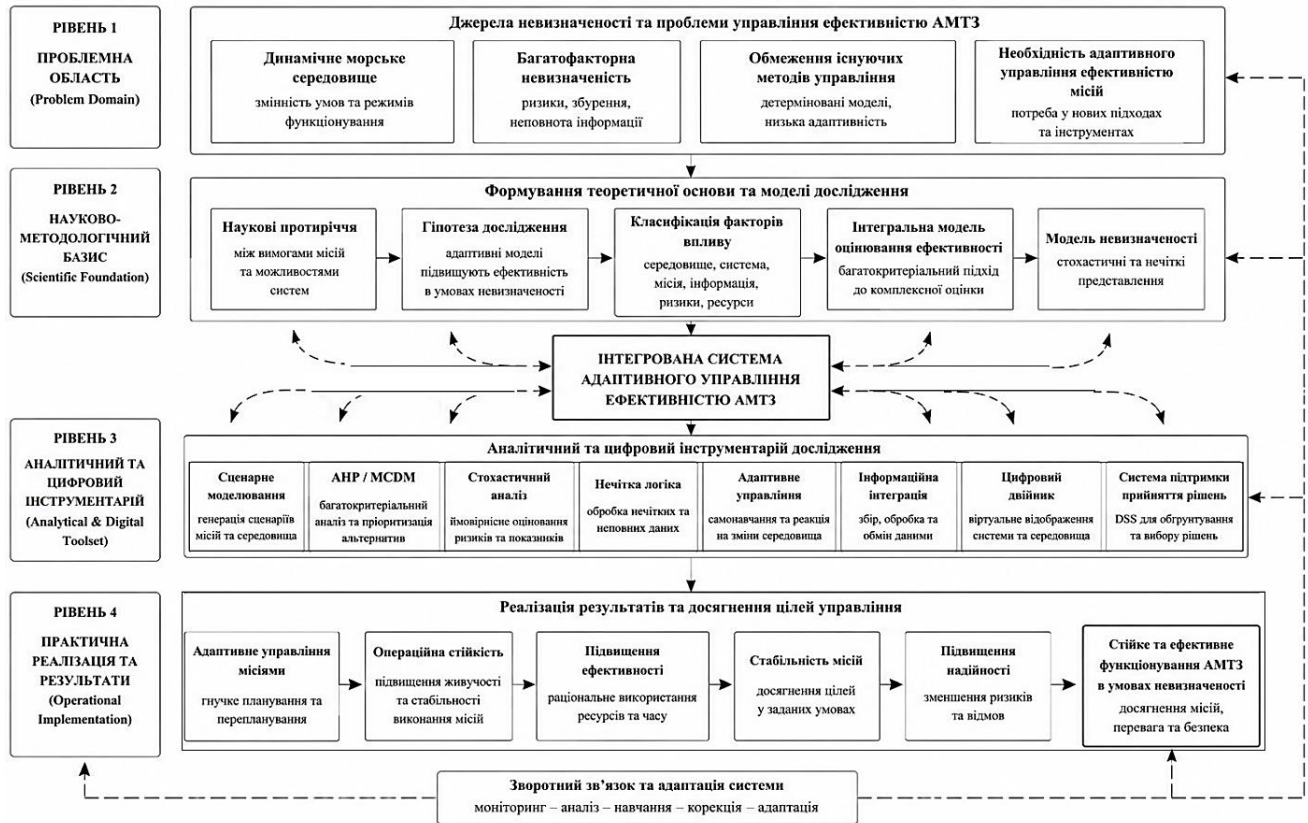


Рисунок 5 – Концептуальна карта дослідження методології управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів

У другому розділі «**Методологія оцінювання та прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів**» розроблено методологічні засади оцінювання та прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів на основі місійно-орієнтованого підходу (рис. 6). На відміну від традиційних транспортних систем, де результатом функціонування є виконання рейсу або отримання економічного ефекту, для АМТЗ основною одиницею аналізу запропоновано автономну місію, що характеризується набором завдань, часовими та ресурсними обмеженнями.

У роботі сформульовано умову ефективного виконання автономної місії: $M_i \geq m_i$, $T \leq T^*$, $R \leq R^*$, де M_i – рівень виконання завдання місії; m_i – допустимий рівень його виконання; T та R – фактичні витрати часу та енергоресурсів; T^* і R^* – їх планові значення.

Показано, що ефективність автономної місії визначається взаємодією трьох основних складових результативності виконання завдань, часових витрат і енергетичних витрат.

При цьому додаткові витрати ресурсів формуються під впливом зовнішнього середовища, технічних факторів та помилок функціонування систем автономного керування (рис. 7).

Для кількісної оцінки результативності місії введено інтегральний показник виконання місії $I_M = \sum_{i=1}^n \alpha_i M_i$, де α_i – ваговий коефіцієнт важливості завдання, I_{Mi} –

показник його виконання. Для визначення вагових коефіцієнтів використано нормування експертних оцінок $\alpha_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i}$.

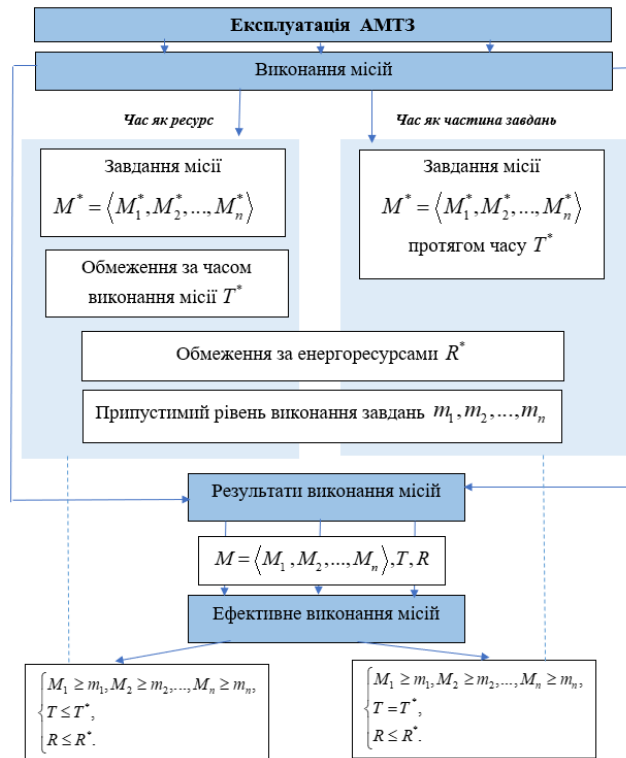


Рисунок 6 – Концепція ефективної експлуатації АМТЗ

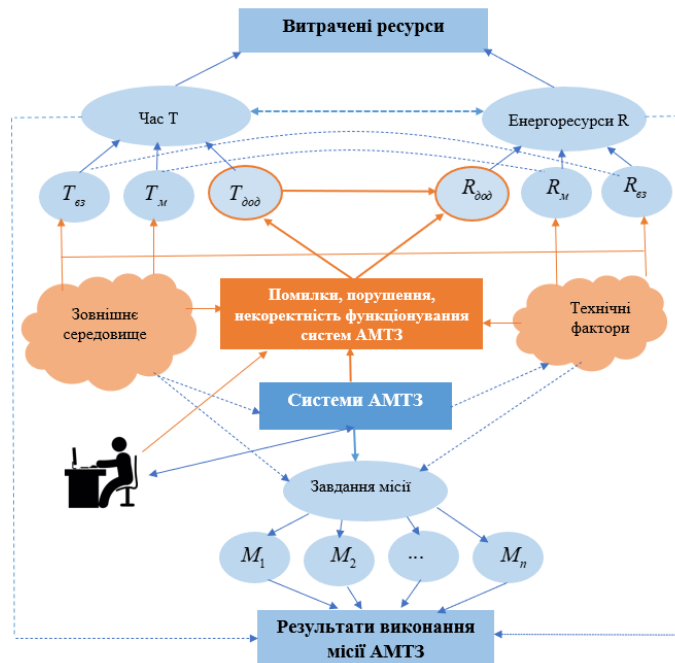


Рисунок 7 – Концепція оцінки ефективності експлуатації АМТЗ

Ключовим результатом розділу стало розроблення нового інтегрального показника ефективності автономної місії $I_E = I_M \cdot \frac{T^*}{T} \cdot \frac{R^*}{R}$.

Нехай автономна місія визначається множиною завдань $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$. Кожне завдання характеризується фактичним рівнем виконання M_i , мінімально допустимим рівнем виконання m_i , витратами часу T_i та ресурсів R_i .

Умовою успішного виконання місії $\epsilon M_i \geq m_i$, $i=1, \dots, n$. Для місій із жорсткими ресурсними обмеженнями додатково повинні виконуватись умови $T \leq T^*$, $R \leq R^*$.

Інтегральна оцінка виконання місії. Для врахування різної важливості завдань введено вагові коефіцієнти $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, $0 < \alpha_i < 1$. Тоді інтегральна оцінка

виконання місії визначається як $I_M = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_{M_i}$, де $I_{M_i} = \begin{cases} \frac{M_i}{m_i}, & M_i < m_i, \\ 1, & M_i \geq m_i \end{cases}$, а цільова

функція задачі управління буде мати вигляд

$$E = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \min \left(1, \frac{M_i}{m_i} \right) \right) \cdot \frac{T^*}{T} \cdot \frac{R^*}{R}. \quad (6)$$

Інтегральний показник ефективності місії. Ефективність автономної місії визначається співвідношенням результату та витрачених ресурсів $I_E = I_M \cdot \frac{T^*}{T} \cdot \frac{R^*}{R}$.

(рис. 8). Узагальнення для довільної кількості ресурсів має вигляд $I_E = I_M \prod_{j=1}^J \frac{R_j}{R_j^*}$, де R_j – фактичні витрати ресурсу j -го типу.

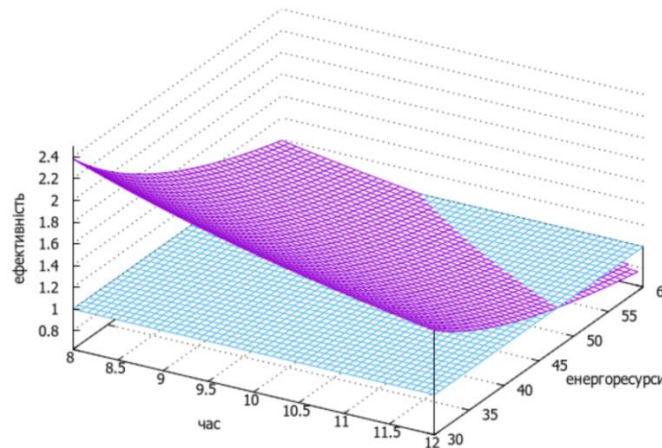


Рисунок 8 – Залежність ефективності місії від часу та енергоресурсів

Урахування складності місії. Для врахування впливу зовнішнього середовища введено коефіцієнт складності $\mu_k = \sum_{l=1}^L \varphi_l \lambda_l$, де $\sum_{l=1}^L \varphi_l = 1$, і тут λ_l – рівень впливу фактора; φ_l – його вагомість.

Отримані результати показали існування області раціонального функціонування АМТЗ, у межах якої забезпечується максимальне значення інтегрального показника ефективності. Зростання тривалості місії або перевищення планового рівня енергоспоживання призводить до монотонного зниження ефективності (рис. 9).

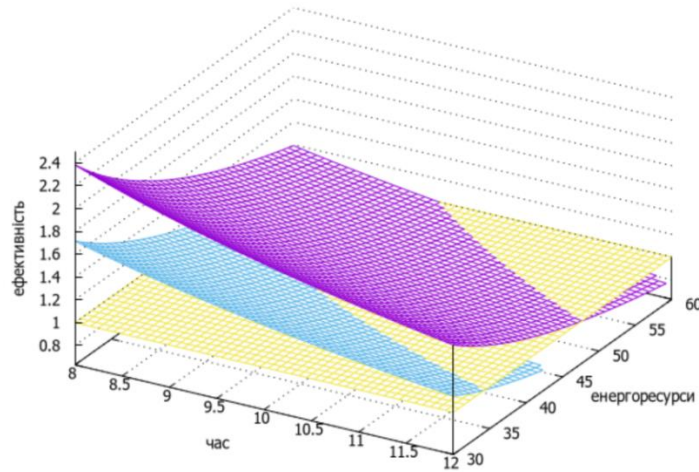


Рисунок 9 – Порівняння поверхонь ефективності для різних місій

Порівняльний аналіз підтвердив, що однакові витрати ресурсів можуть забезпечувати різний рівень ефективності залежно від структури завдань місії та рівня їх виконання. Це обґрунтовує необхідність використання інтегрального місійно-орієнтованого підходу до оцінювання результативності автономних платформ (рис. 10).

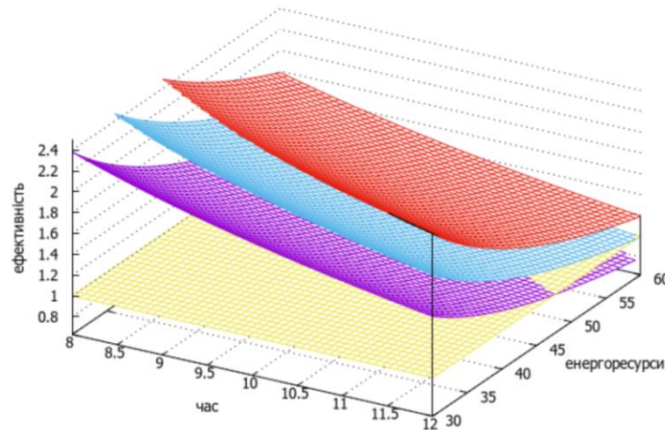


Рисунок 10 – Вплив ресурсних обмежень на ефективність місії

Показано, що зміна нормативних значень часу та енергоспоживання істотно впливає на область допустимих режимів функціонування АМТЗ та формує різні сценарії досягнення цільового рівня ефективності.

Ефективність експлуатації АМТЗ за період часу. Для множини місій $\mathcal{M} = \{M^{(1)}, M^{(2)}, \dots, M^{(K)}\}$ узагальнений показник ефективності визначається як

$$I_E(t) = \frac{\sum_{k=1}^K T_k I_{E_k}}{\sum_{k=1}^K T_k}. \quad (7)$$

З урахуванням складності експлуатаційних умов

$$I_E(t) = \frac{\sum_{k=1}^K \mu_k I_{E_k}}{\sum_{k=1}^K \mu_k}. \quad (8)$$

Узагальнена модель прогнозування ефективності $\hat{I}_E(t + \Delta t) = F(X(t), U(t), W(t))$, де $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ – вектор стану АМТЗ; $U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$ – вектор керуючих впливів; $W(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_p(t)]^T$ – вектор зовнішніх збурень.

Динаміка системи описується рівнянням $\dot{X}(t) = f(X, U, W, t)$, а прогнозована ефективність формується як $\hat{I}_E = I_E - \Delta I_R - \Delta I_T - \Delta I_U$, де ΔI_R – втрати через перевищення ресурсів; ΔI_T – втрати часу; ΔI_U – втрати від невизначеності (рис. 11).

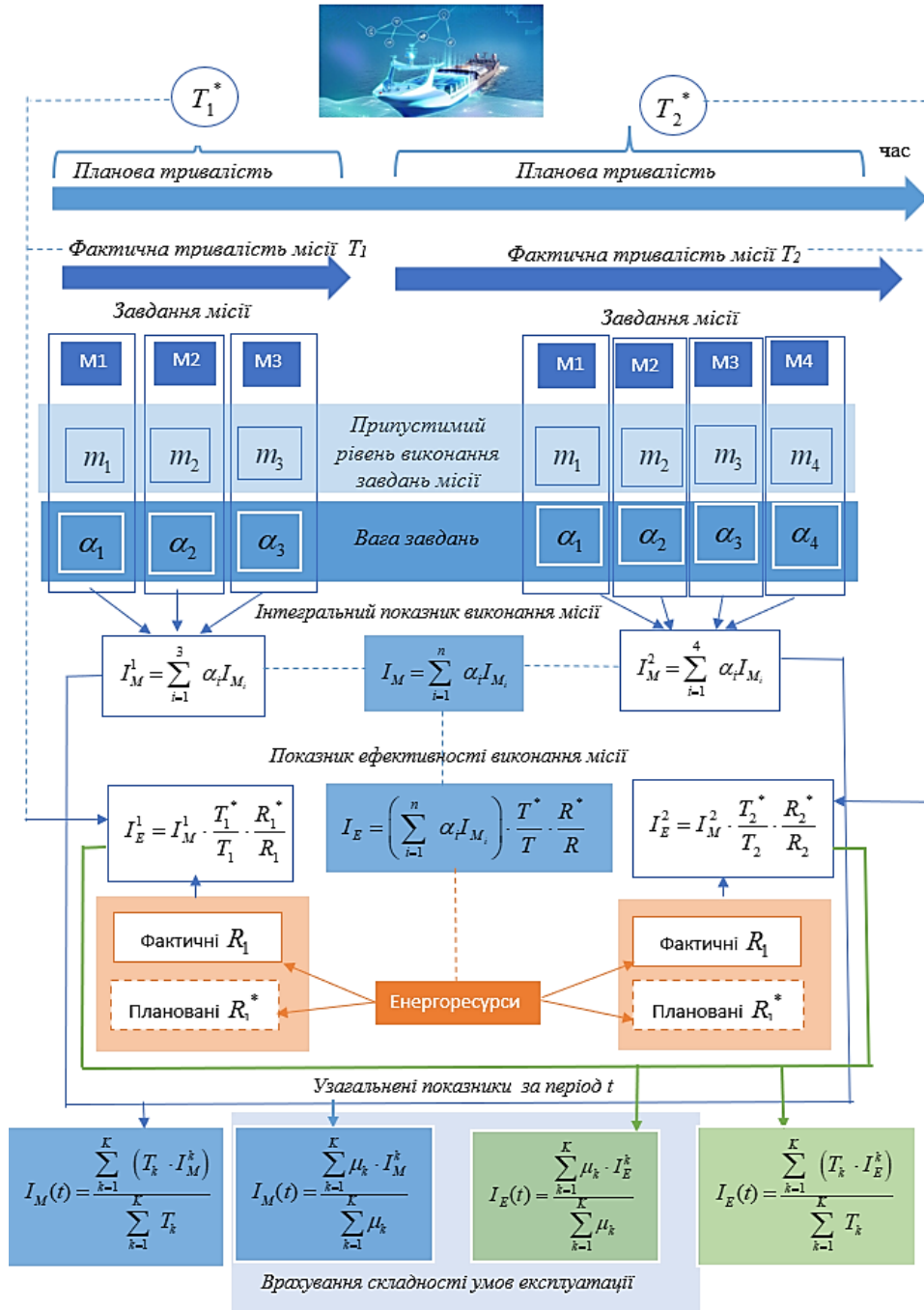


Рисунок 11 – Логіка формування показників ефективності експлуатації АМТЗ

На рис. 11 представлено повний цикл формування інтегральних показників ефективності – від декомпозиції місії на окремі завдання до оцінювання результативності функціонування автономної платформи за визначений період експлуатації.

На основі розроблених моделей сформовано узагальнену структуру прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, яка поєднує оцінювання виконання місії, прогнозування ресурсних витрат, аналіз зовнішніх факторів та підтримку прийняття рішень щодо коригування режимів функціонування АМТЗ (рис. 12). Отримані результати стали основою для подальшого розроблення моделей адаптивного управління та цифрових двійників, представлених у наступних розділах дисертації.

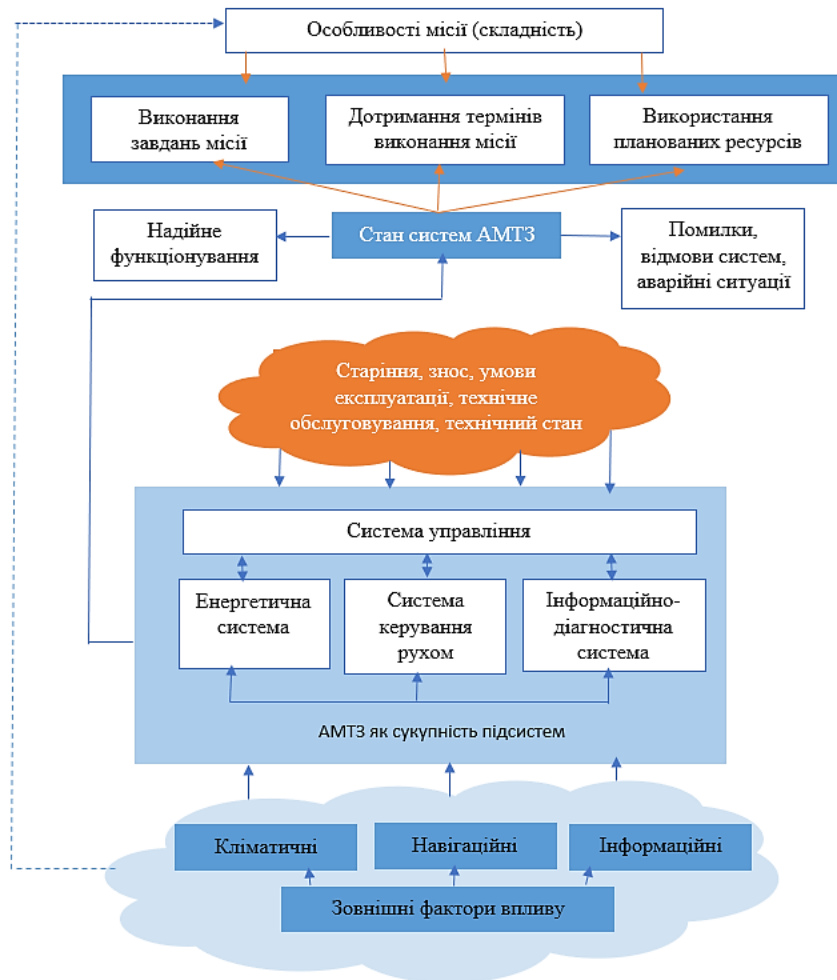


Рисунок 12 – Вплив системи факторів на результати виконання місії

Для переходу від оцінювання ефективності до її прогнозування розроблено ймовірнісну модель надійного експлуатаційного стану автономного морського транспортного засобу протягом місії. При цьому ймовірність ефективного виконання місії визначається через імовірність збереження працездатного стану всіх основних систем АМТЗ за умови впливу багаторівневої системи зовнішніх та внутрішніх факторів.

Ймовірність надійного експлуатаційного стану АМТЗ визначається як

$$P(C|A) = 1 - P(\bar{C}|A), \quad (9)$$

де A – сукупність факторів впливу; C – подія надійного функціонування АМТЗ протягом місії.

Порушення надійного стану АМТЗ пов'язується з переходом хоча б однієї із систем у ненадійний стан

$$P(\bar{C} | A) = P\left(\bigcup_{v=1}^{17} \bar{C}_v\right), \quad (10)$$

де $\bar{C}_v$ – ненадійний стан v -ї системи АМТЗ.

Для оцінювання впливу окремих факторів запропоновано визначати повну ймовірність надійного стану системи через розподіл можливих значень факторів впливу

$$P(C_v | a_i) = \sum_{j=1}^{q_i} \gamma_{ij}^{(v)} P(a_{ij}), \quad (11)$$

де $P(a_{ij})$ – ймовірність реалізації j -го значення фактора a_i ; $\gamma_{ij}^{(v)}$ – коефіцієнт впливу відповідного значення фактора на надійність v -ї системи.

На рівні груп факторів ймовірність надійного стану системи визначається виразом

$$P(C_v | A_k) = \sum_{i=1}^{n_k} \beta_i^{(v)} P(C_v | a_i), \quad (12)$$

де $\beta_i^{(v)}$ – вагові коефіцієнти факторів у межах групи.

Інтегральна оцінка надійного стану системи під впливом усіх груп факторів має вигляд

$$P(C_v | A) = \sum_{k=1}^K \alpha_k^{(v)} P(C_v | A_k), \quad (13)$$

де $\alpha_k^{(v)}$ – вагові коефіцієнти груп факторів впливу.

Тоді ймовірність порушення надійного функціонування АМТЗ протягом місії визначається співвідношенням

$$P(\bar{C} | A) = 1 - \prod_{v=1}^V P(C_v | A), \quad (14)$$

а кінцева ймовірність надійного експлуатаційного стану АМТЗ набуває вигляду

$$P(C | A) = 1 - P(\bar{C} | A). \quad (15)$$

Отримана система залежностей (9)–(15) формує багаторівневу модель прогнозування ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів через оцінювання ймовірності збереження їх працездатного стану протягом виконання місії. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель враховує не лише технічний стан окремих підсистем, але й сукупний вплив кліматичних, навігаційних, інформаційних та техніко-технологічних факторів, а також їх ієрархічну взаємодію.

Особливістю підходу є послідовне агрегування впливу факторів на чотирьох рівнях: окремий фактор - група факторів - система АМТЗ - автономний морський транспортний засіб у цілому. Така структура дозволяє формувати прогноз

надійного експлуатаційного стану АМТЗ з урахуванням зміни зовнішнього середовища, поточного технічного стану обладнання та сценаріїв виконання місії.

Запропонована модель створює математичне підґрунтя для реалізації ризик-орієнтованого управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів та забезпечує можливість своєчасного виявлення критичних режимів функціонування, прогнозування втрати працездатності окремих підсистем і формування адаптивних керуючих впливів у процесі виконання автономної місії.

Узагальнена послідовність реалізації запропонованого методу прогнозування надійного експлуатаційного стану автономного морського транспортного засобу протягом місії наведена на рис. 13.

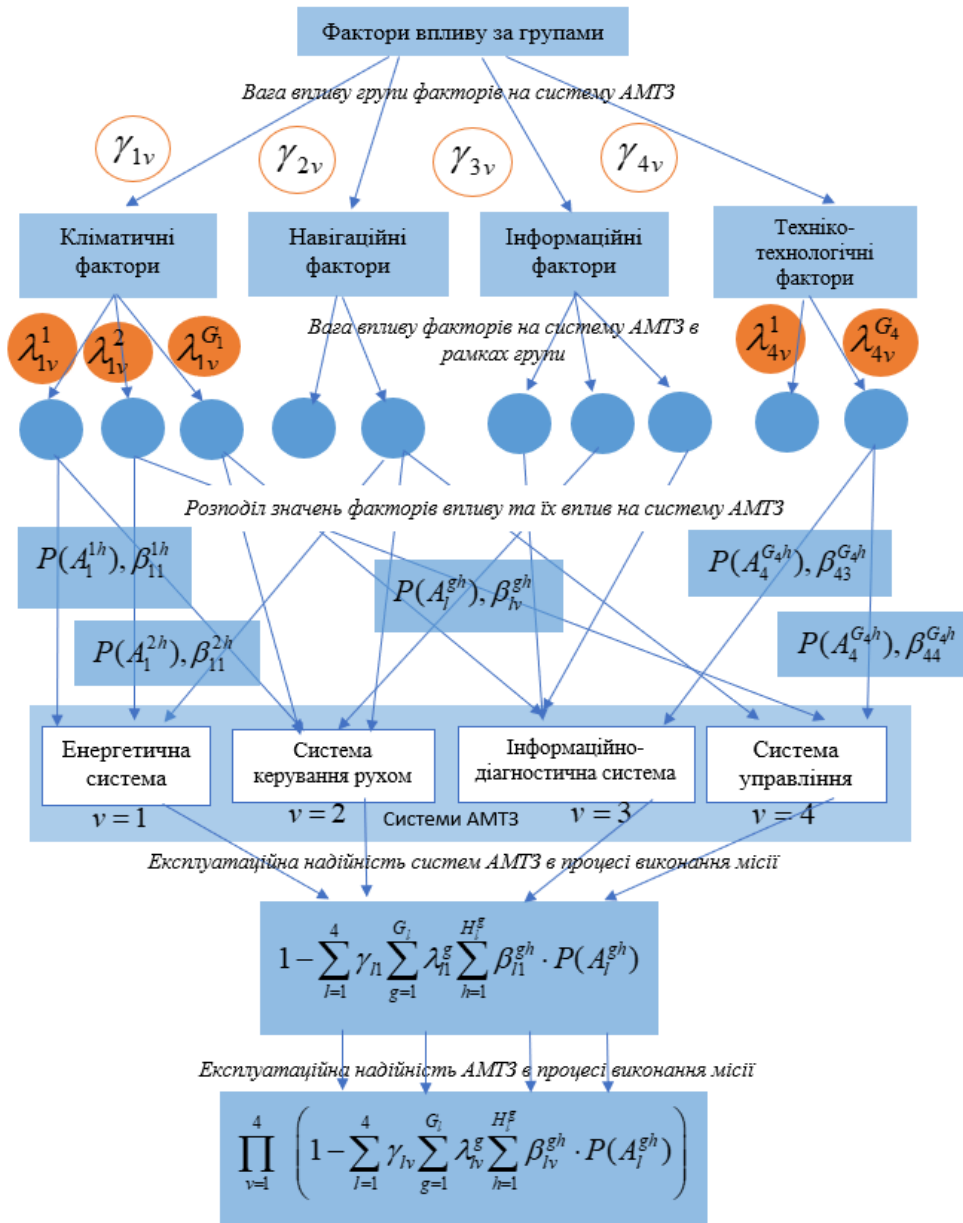


Рисунок 13 – Метод прогнозування надійного експлуатаційного стану автономного морського транспортного засобу протягом місії

У розділі вперше сформовано місійно-орієнтовану методологію оцінювання ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів. Розроблено інтегральні показники виконання місії та ефективності функціонування АМТЗ, які враховують результативність виконання завдань,

часові витрати, енергоспоживання та складність умов експлуатації. Запропоновані моделі забезпечують формалізацію процесів оцінювання та прогнозування ефективності автономних платформ і створюють математичне підґрунтя для побудови адаптивних систем управління в умовах невизначеності.

У третьому розділі «Методи та алгоритми адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами в умовах невизначеності» розроблено математичний апарат і алгоритмічне забезпечення адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами в умовах стохастичної невизначеності. Формалізовано задачу місійно-орієнтованого управління, розроблено багаторівневу архітектуру адаптивної системи керування, запропоновано інтегровану MPC–FLC–RL структуру прийняття рішень, а також виконано теоретичне дослідження стійкості системи.

Стан морської автономної платформи описується вектором стану $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T \in R^n$, а керуючі впливи визначаються як $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_m(t)]^T \in R^m$. Зовнішні збурення подаються вектором $w(t) \in R^p$, де враховуються хвильові впливи, течії, вітрові навантаження, похибки навігаційних вимірювань та алгоритмічна невизначеність.

Динаміка системи описується нелінійною моделлю $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w_d(t), w_s(t))$ де $w_d(t)$ – детерміновані, а $w_s(t)$ – стохастичні збурення.

Для забезпечення ефективного функціонування автономної платформи задача управління формулюється як мінімізація інтегрального функціоналу

$$J(u) = \int_0^T (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda R^*(t))dt \quad (16)$$

де Q і R – вагові матриці, а $R^*(t)$ – інтегральний показник ризику функціонування автономної місії.

Для реалізації адаптивного управління запропоновано багаторівневу архітектуру алгоритмічної системи, яка поєднує контури швидкого керування, оцінювання стану, цифровий двійник, механізми адаптації параметрів та стратегічного прийняття рішень. Структура системи, функціональна взаємодія її компонентів та алгоритм роботи менеджера режимів наведені на рис. 14.

Запропонована архітектура забезпечує інтеграцію механізмів модельно-прогнозного керування, нечіткої логіки, навчання з підкріпленням та цифрового двійника в межах єдиного адаптивного контуру управління. Це дозволяє здійснювати динамічне коригування режимів функціонування АМТЗ залежно від зміни умов експлуатації, рівня ризику та поточного технічного стану автономної платформи.

Подальший розвиток отримала концепція багаторівневого управління, відповідно до якої функції системи розподілено між трьома часовими рівнями:

- швидкий контур стабілізації (1–10 мс);
- контур оцінювання стану (50–200 мс);
- стратегічний контур прийняття рішень (0,5–5 с).

Для реалізації стратегічного адаптивного управління використано марковський процес прийняття рішень $M = (S, A, P, R, \gamma)$, де S – множина станів системи, A – множина допустимих дій, P – матриця ймовірностей переходів, R – функція винагороди, γ – коефіцієнт дисконтування.

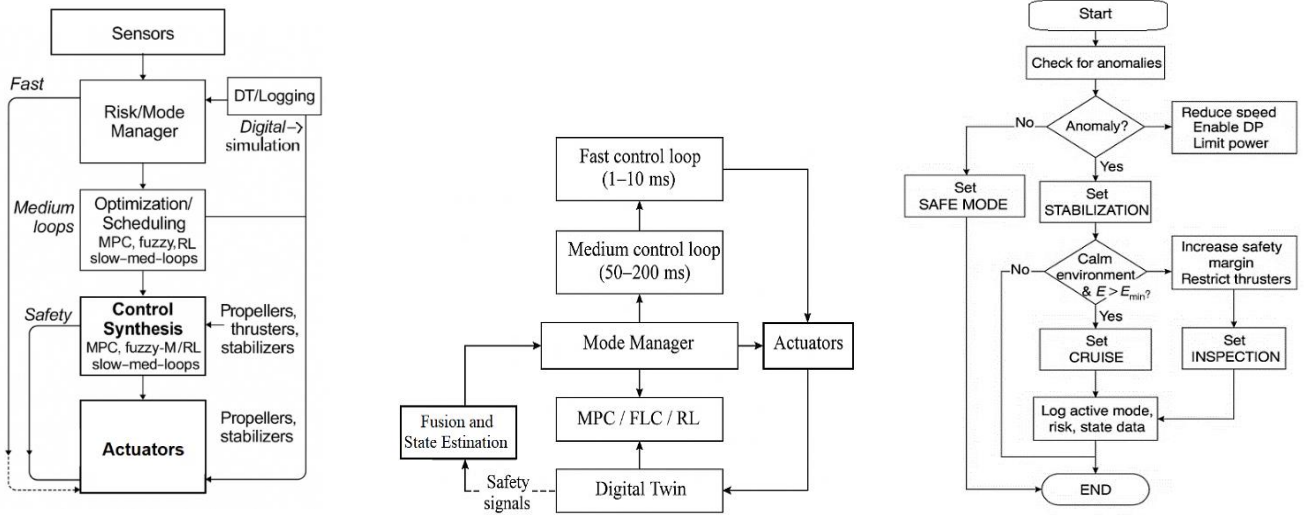


Рисунок 14 – Інтегрована архітектура адаптивного управління автономним морським транспортним засобом

Ймовірність переходу між станами визначається виразом $P(s'|s, a)$, а функція винагороди формується як $R(s, a) = -(x^T Q x + u^T R u + \lambda R^*)$. Оптимальна політика прийняття рішень визначається з умови

$$\pi^* = \arg \max \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R(s_t, a_t) \right]. \quad (17)$$

Прийняття рішень щодо вибору режиму роботи автономної платформи реалізовано за допомогою менеджера режимів.

Рішення про зміну режиму функціонування приймається на основі оцінювання інтегрального ризику $R^* \in [0;1]$ та показників енергетичного стану платформи. Синтез керувальних впливів здійснюється на основі інтегрованої MPC–FLC–RL архітектури.

На рівні модельно-прогнозного управління розв'язується задача оптимізації

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\|x_k - x_{ref,k}\|_Q^2 + \|u_k\|_R^2 \right), \quad (18)$$

за умов

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u_k \leq u_{\max}, \\ x_{\min} &\leq x_k \leq x_{\max}, \\ d(x_k, x_{obs}) &\geq d_{\text{safe}}, \end{aligned} \quad (19)$$

де d_{safe} – безпечна дистанція до перешкод.

Для підвищення адаптивності системи використано механізм нечіткої логіки, який виконує автоматичне коригування вагових коефіцієнтів MPC: $Q = f(H_w, V_w, R^*)$, $R = g(H_w, V_w, R^*)$, де H_w – висота хвилювання моря, V_w – швидкість вітру.

Стратегічна оптимізація здійснюється агентом навчання з підкріпленням, який максимізує функціонал

$$J_{RL} = \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_t \right]. \quad (20)$$

Для кількісного оцінювання стійкості функціонування автономної платформи введено інтегральний показник ризику

$$R^* = \frac{\int_0^T (e^T(t) Q e(t) + \dot{x}^T(t) \dot{x}(t)) dt}{E_{safe}}, \quad (21)$$

де E_{safe} – еталонне значення енергоспоживання безпечного режиму функціонування.

Результати моделювання показали, що використання інтегрованої MPC–FLC–RL архітектури забезпечує зниження інтегрального ризику функціонування автономної платформи на 25–30 % порівняно з традиційними PID-регуляторами.

Для оцінювання результативності запропонованої архітектури адаптивного управління виконано імітаційне моделювання процесів функціонування автономного морського транспортного засобу в умовах стохастичних збурень зовнішнього середовища (рис. 15). Досліджено зміну інтегральної ефективності системи, енергетичних витрат, сценарної невизначеності та ризику місії в реальному масштабі часу.

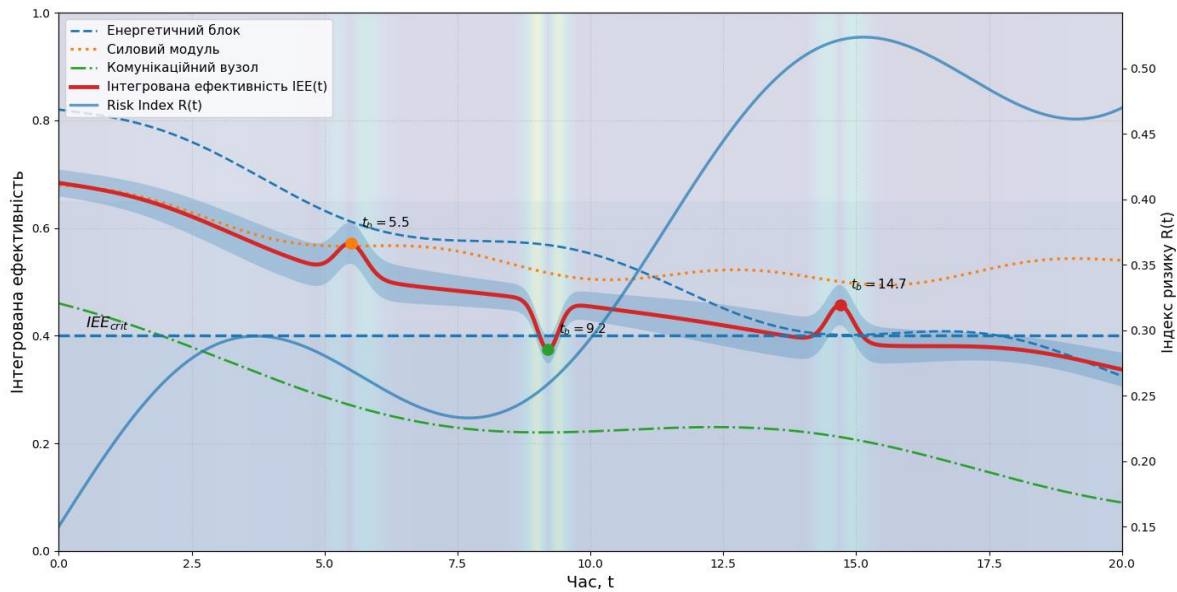


Рисунок 15 – Динаміка інтегральної ефективності АМТЗ в умовах стохастичних збурень та адаптивної компенсації

Отримані результати підтвердили здатність запропонованої системи адаптивного управління компенсувати вплив зовнішніх збурень і підтримувати заданий рівень ефективності функціонування автономного морського транспортного засобу. У критичних часових інтервалах спостерігається автоматичне коригування режимів роботи системи, що забезпечує локальне зниження ризику місії та стабілізацію інтегрального показника ефективності. Результати моделювання підтвердили підвищення стійкості функціонування АМТЗ та ефективності використання енергетичних ресурсів в умовах невизначеності.

Теоретичне обґрунтування стійкості запропонованої системи виконано на основі другого методу Ляпунова. Динаміка системи описується рівнянням $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Delta(x, t)$, а адаптивний закон керування задається співвідношенням $u(t) = -Kx(t)$. Після замикання системи отримано $\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + \Delta(x, t)$. Для аналізу стійкості використано функцію Ляпунова $V(x) = x^T Px$, $P = P^T > 0$. Її похідна має вигляд $\dot{V}(x) = x^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)]x$. Умовою асимптотичної стійкості є виконання нерівності $(A - BK)^T P + P(A - BK) < 0$. Для випадку обмежених зовнішніх збурень отримано узагальнену умову $(A - BK)^T P + P(A - BK) + \alpha P < 0$, $\alpha > 0$.

Отримані результати доводять існування області асимптотичної стійкості та підтверджують працездатність запропонованої адаптивної архітектури управління в умовах стохастичної невизначеності.

Таким чином, у третьому розділі розроблено математичні моделі, алгоритми та багаторівневу архітектуру адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами, що поєднує МРС-керування, нечітку логіку, навчання з підкріпленням, цифрові двійники та ризик-орієнтоване прийняття рішень, а також отримано умови стійкості системи, які забезпечують її ефективне функціонування в умовах невизначеності.

У четвертому розділі «Інформаційне забезпечення та цифрові двійники в системі управління автономними морськими транспортними засобами» досліджено інформаційне забезпечення процесів управління автономними морськими транспортними засобами та розроблено архітектуру цифрового двійника як основного елемента інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

Показано, що ефективність функціонування АМТЗ значною мірою визначається якістю обробки навігаційної, енергетичної, технічної та середовищної інформації, яка надходить із різних джерел та характеризується асинхронністю, неоднорідністю й різною достовірністю.

Для формалізації інформаційного простору автономної платформи введено множину інформаційних потоків

$$I(t) = [I_n(t), I_e(t), I_s(t), I_m(t)]^T, \quad (22)$$

де $I_n(t)$ – навігаційна інформація; $I_e(t)$ – енергетичні параметри; $I_s(t)$ – технічний стан систем; $I_m(t)$ – параметри морського середовища.

Встановлено, що використання традиційних схем моніторингу не дозволяє враховувати взаємозв'язок між окремими підсистемами та забезпечувати прогнозування змін технічного стану.

У зв'язку з цим запропоновано багаторівневу архітектуру цифрового двійника, яка забезпечує інтеграцію фізичної платформи, інформаційного рівня, аналітичного ядра та системи підтримки прийняття рішень (рис. 16).



Рисунок 16 – Потoki інформації в морській автономній платформі

Аналіз структури інформаційних потоків показав, що ефективне управління автономними морськими транспортними засобами потребує не лише збору та обробки даних, а й формування єдиного інформаційно-аналітичного середовища, здатного забезпечувати безперервне оцінювання технічного стану, прогнозування розвитку ситуації та підтримку прийняття рішень.

Для реалізації зазначених функцій запропоновано інтегровану архітектуру цифрового двійника морської автономної платформи, яка поєднує фізичний об'єкт, інформаційно-комунікаційну інфраструктуру, аналітичні модулі та механізми адаптивного управління (рис. 17).



Рисунок 17 – Архітектура інтегрованої системи цифрового двійника морської автономної платформи в умовах невизначеності

Формалізацію цифрового двійника представлено кортежем $DT = x(t), \hat{x}(t), M, S$, де $x(t)$ – реальний стан платформи; $\hat{x}(t)$ – оцінений стан; M – множина моделей; S – множина сценаріїв функціонування.

Синхронізація фізичної системи та цифрового двійника визначається співвідношенням $\hat{x}(t + \Delta t) = F(x(t), z(t), u(t))$, де $z(t)$ – вектор вимірювань; $u(t)$ – керуючі впливи (рис. 18).

Для оцінювання технічного стану автономної платформи запропоновано інтегральний індекс $H(t) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t)$, де $x_i(t)$ – нормалізовані показники окремих підсистем; w_i – вагові коефіцієнти важливості.

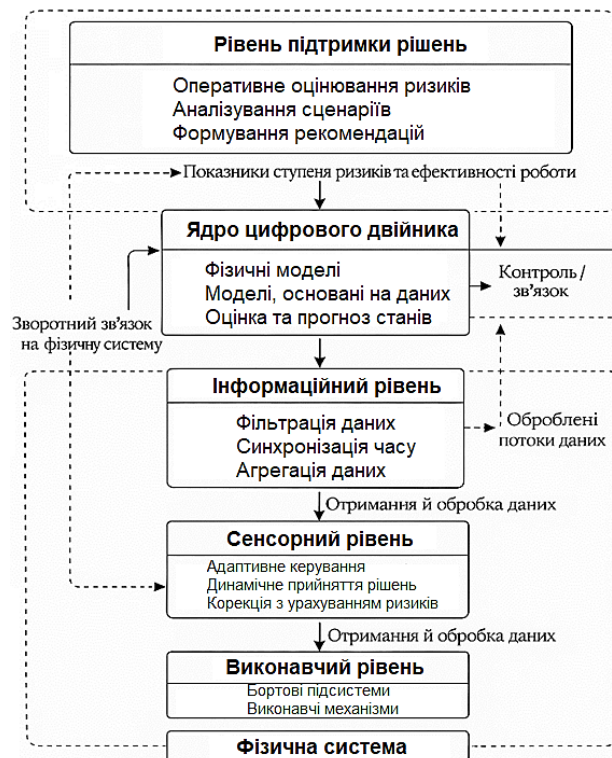


Рисунок 18 – Архітектура цифрового двійника морської автономної платформи

Індекс дозволяє здійснювати комплексне оцінювання працездатності платформи з урахуванням взаємозв'язку між навігаційними, енергетичними та технічними компонентами (рис. 19).



Рисунок 19 – Узагальнена схема аналітичної оцінки технічного стану

Для оцінювання ефективності функціонування автономної місії введено інтегральний показник

$$IEE(t) = \sum_{i=1}^N w_i (1 - D_i(t)), \quad (23)$$

де $D_i(t)$ – функція деградації i -го вузла.

Задачу управління ефективністю сформульовано як задачу оптимізації

$$\max_{u(t)} [IEE(t) - \alpha R(t) - \beta E(t)], \quad (24)$$

де $R(t)$ – інтегральний ризик; $E(t)$ – енергетичні витрати.

Для вибору оптимального сценарію функціонування цифровий двійник реалізує механізм прогнозно-сценарного аналізу $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ для якого прогнозна ефективність визначається $IEE_k(t + \tau) = \Phi(x(t), u_k(t), M)$.

Для реалізації прогнозно-адаптивного управління запропоновано інтегровану архітектуру цифрового двійника, яка забезпечує безперервну синхронізацію фізичної платформи з її віртуальною моделлю, формування сценаріїв функціонування, прогнозування зміни показників ефективності та підтримку прийняття управлінських рішень у реальному масштабі часу (рис. 20).

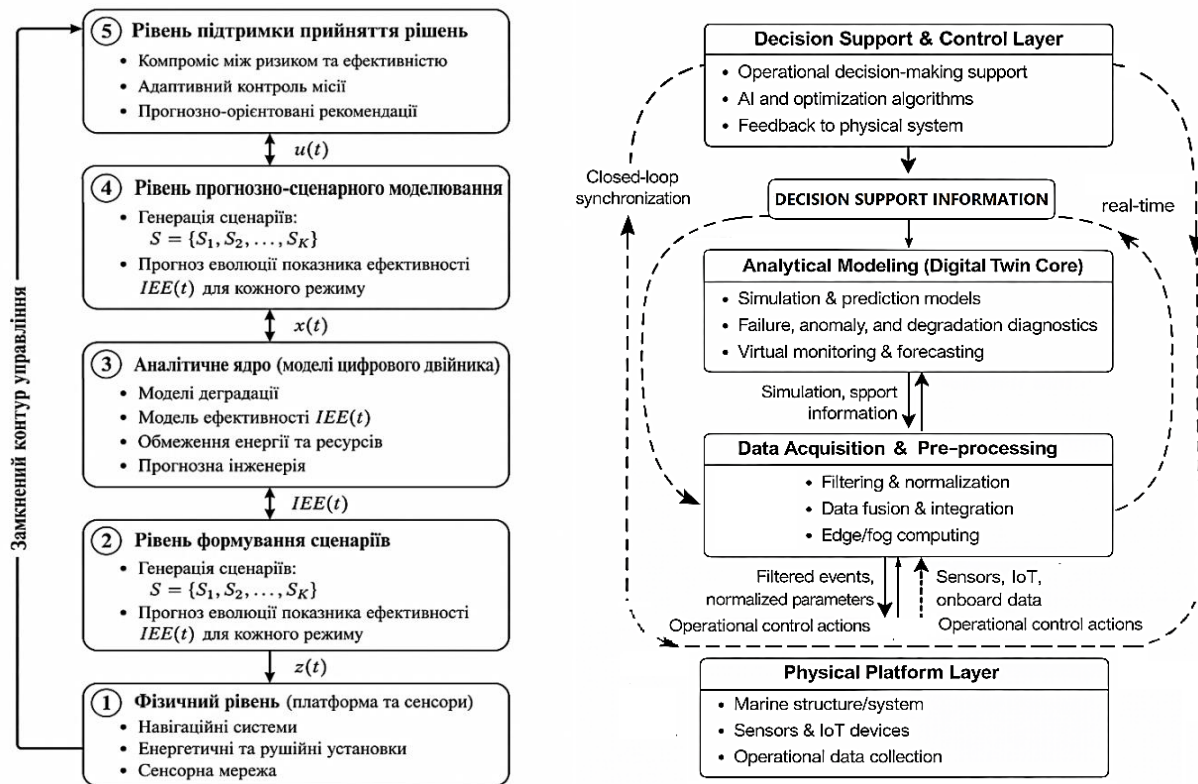


Рисунок 20 – Архітектура цифрового двійника та системи підтримки прийняття рішень морської автономної платформи

Запропонована архітектура поєднує фізичний рівень автономної платформи, підсистему збору та попередньої обробки даних, аналітичне ядро цифрового двійника, модулі сценарного прогнозування та систему підтримки прийняття рішень, що дозволяє реалізувати замкнений контур управління, в якому результати моделювання використовуються для коригування режимів функціонування АМТЗ, підвищення ефективності виконання місій та зниження рівня експлуатаційного ризику.

Розглянуто принцип антикрихкого управління АМТЗ із застосуванням цифрового двійника, введено «індекс антикрихкої адаптивності». 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 МРС-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.

Таким чином, у четвертому розділі розроблено концепцію цифрового двійника автономної морської платформи, сформовано інформаційну архітектуру інтеграції різнорідних потоків даних, запропоновано інтегральні показники технічного стану та ефективності функціонування, а також створено основу для побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в умовах багатофакторної невизначеності.

У п'ятому розділі «Інтелектуальні системи управління та енергоефективність морських автономних платформ» досліджено методи інтелектуального управління електромеханічними системами морських автономних платформ, моделі адаптивного керування електрорушійними комплексами, а також підходи до підвищення енергоефективності автономних морських технічних засобів. Особливу увагу приділено використанню нечіткої логіки та інтелектуальних регуляторів для забезпечення стійкої роботи виконавчих систем в умовах невизначеності морського середовища.

Інтелектуальне управління електрорушійними системами

Запропоновано спрощену нелінійну модель електромеханічної підсистеми морської автономної платформи на основі асинхронного електродвигуна з урахуванням змінних навантажень, нелінійності механічних характеристик та впливу зовнішніх збурень. Для опису динаміки електрорушії використано систему рівнянь:

$$\omega_{01} = \omega_0 \cdot \text{sign}(U_{\text{ТП}}), \quad (25)$$

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_{01}}, \quad (26)$$

$$M_{k1} = M_k \left(\frac{U_{\text{ТП}}}{U_{\text{ТПmax}}} \right)^2 \text{sign}(U_{\text{ТП}}), \quad (27)$$

$$M_d = \frac{2M_k(1+as)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (28)$$

$$M_c = M_{i\text{д}} \cdot \text{sign}(\omega_d), \quad (29)$$

$$\omega_d(t + \Delta t) = \omega_d(t) + \frac{M_d - M_c}{J_c} \Delta t. \quad (30)$$

Наведена модель дозволяє здійснювати імітаційне моделювання електромеханічних процесів морської автономної платформи та використовувати її для синтезу адаптивних систем керування (рис. 21).

Нечітке адаптивне керування

Для підвищення робастності системи керування запропоновано використання нечіткого контролера, який забезпечує ефективне функціонування при зміні параметрів об'єкта та зовнішніх збуреннях.

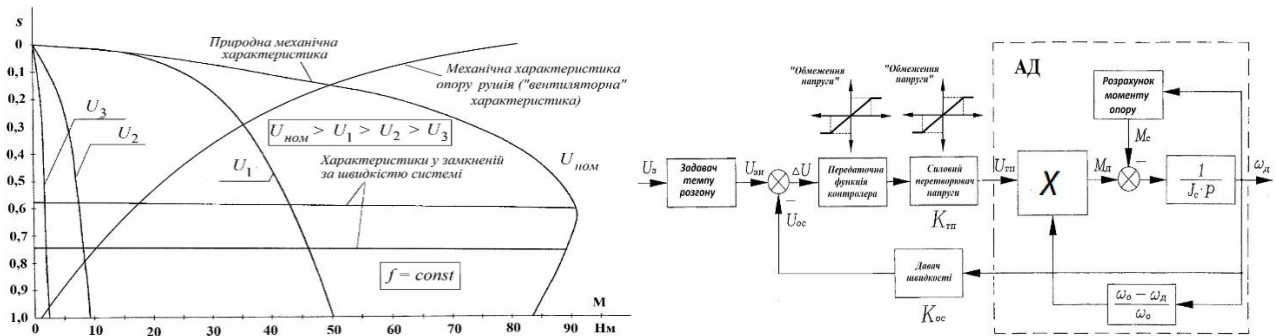


Рисунок 21 – Типові механічні характеристики електродвигуна (ліворуч) та узагальнена структурна схема системи управління електродвигуном морської автономної платформи (праворуч)

База знань нечіткого контролера формується множиною правил типу: $IF (x_1 \in A_1) \wedge (x_2 \in A_2) \wedge \dots \wedge (x_n \in A_n) \Rightarrow y \in B$. Для фазифікації використано трикутні функції належності з термами: NB, NS, ZE, PS, PB. Запропонована структура нечіткого регулятора включає: блок фазифікації, базу правил, механізм нечіткого висновку, блок дефазифікації та формування адаптивного керуючого впливу (рис. 22).

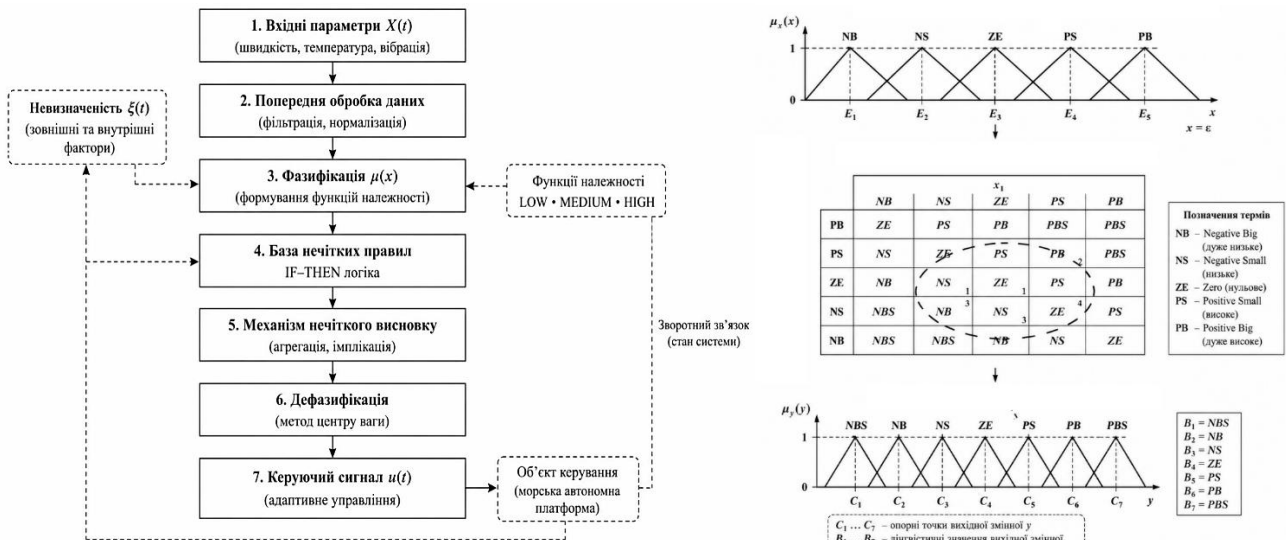


Рисунок 22 – Функціональна структура нечіткого контролера та структурна модель формування нечіткого висновку на основі функцій належності та бази правил

Результати моделювання системи керування

Проведене імітаційне моделювання підтвердило, що традиційний ПД-регулятор забезпечує задовільну якість керування лише у вузькому діапазоні номінальних параметрів системи (рис. 23). У разі варіації моменту інерції, динамічних змін зовнішніх навантажень або збурюючих впливів морського середовища показники якості регулювання суттєво погіршуються. Натомість

інтеграція нечіткого контролера (НК) дозволила мінімізувати динамічне перерегулювання, суттєво підвищити швидкодію системи та гарантувати її робастну стійкість до параметричних збурень. Крім того, застосування нечіткої логіки забезпечило вищу точність стабілізації кутової швидкості електрорушії в умовах високоінтенсивного стохастичного навантаження.

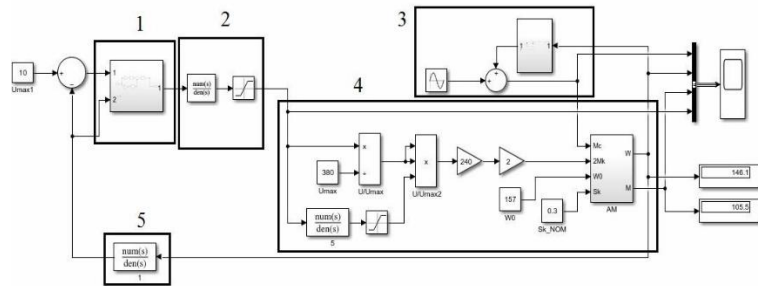


Рисунок 23 – Матлаб-модель системи стабілізації швидкості електрорушії з НК

Для оцінювання ефективності запропонованої системи інтелектуального керування проведено серію імітаційних експериментів у різних режимах функціонування автономної морської платформи. Досліджено перехідні процеси електромеханічної підсистеми за номінальних умов експлуатації, на знижених швидкостях руху та за дії зовнішніх стохастичних збурень (рис. 24). Отримані результати дозволяють оцінити швидкодію, стійкість і робастність запропонованого алгоритму керування.

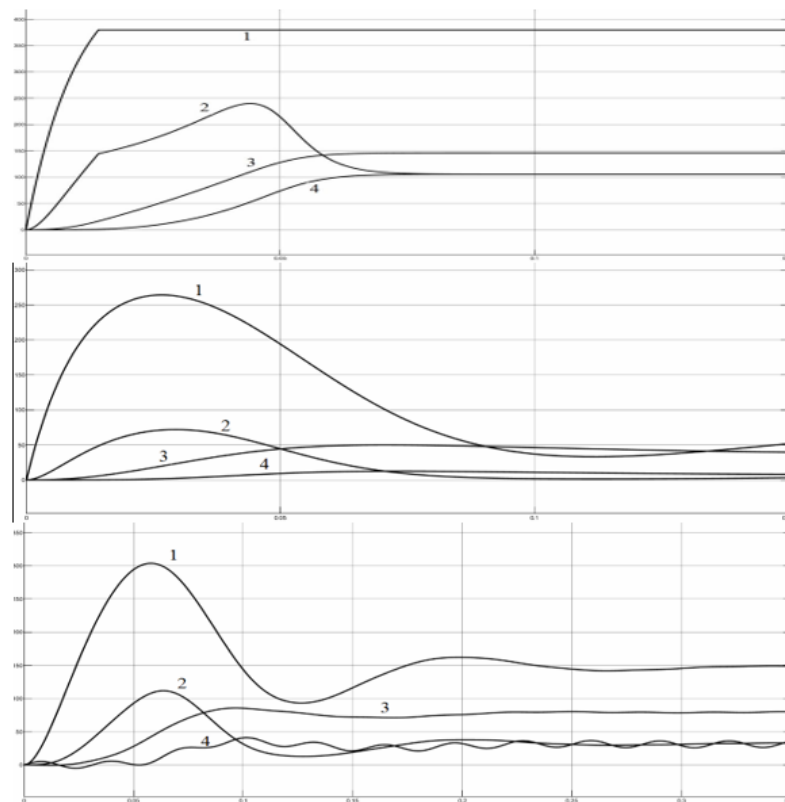


Рисунок 24 – Динамічні характеристики електромеханічної системи морської автономної платформи з нечітким адаптивним регулятором в умовах зміни режимів експлуатації

Як видно з рис. 24, запропонована система адаптивного керування забезпечує стійкі перехідні процеси в широкому діапазоні режимів експлуатації.

Навіть за наявності зовнішніх збурень система зберігає задані показники якості регулювання, демонструючи незначне перерегулювання та швидке затухання коливань. Отримані результати підтверджують доцільність використання нечітких адаптивних алгоритмів для керування електромеханічними комплексами автономних морських транспортних засобів.

Введено критерій ефективності АМТЗ з штучним інтелектом на основі переходу від класичної «ресурсної ефективності» до «когнітивного гомеостазу». 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 ІІІ над збереженням заданої траєкторії, запобігаючи виникненню аварійних ситуацій.

Енергоефективність морських автономних платформ

У роботі досліджено підходи до підвищення енергоефективності автономних морських платформ шляхом оптимізації режимів функціонування електромеханічних комплексів, допоміжних систем та енергетичних установок. Показано, що застосування адаптивного управління дозволяє раціонально розподіляти енергетичні ресурси залежно від умов виконання місії, поточного технічного стану платформи та зовнішніх збурень. Отримані результати свідчать про можливість зниження енергоспоживання допоміжних систем, підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів та збільшення тривалості автономного функціонування морських транспортних засобів.

Таким чином, в межах п'ятого розділу розроблено математичні моделі інтелектуального управління електромеханічними системами морських автономних платформ, які враховують нелінійність процесів та невизначеність зовнішнього середовища. Запропоновано структуру нечіткого контролера для адаптивного керування електрорушійними комплексами та обґрунтовано підходи до підвищення енергоефективності автономних морських технічних засобів. Результати моделювання підтвердили підвищення стійкості та ефективності роботи систем управління в умовах змінних режимів експлуатації.

У шостому розділі **«Структурно-сценарне моделювання режимів функціонування морських автономних платформ»** виконано комплексне математичне та імітаційне моделювання запропонованих моделей, методів і алгоритмів управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів. Дослідження проведено для різних сценаріїв функціонування автономних платформ з урахуванням змін технічного стану, впливу зовнішнього середовища, енергетичних обмежень та різного рівня невизначеності.

Для інтегрального оцінювання результативності функціонування автономної платформи використано узагальнений критерій ефективності

$$I_E = w_1 I_M + w_2 I_R + w_3 I_S + w_4 I_E^{en}, \quad (31)$$

де I_M – показник виконання місії; I_R – показник ризику; I_S – показник стійкості функціонування; I_E^{en} – показник енергоефективності. При цьому $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$.

Для оцінювання ефективності запропонованої робастної системи керування виконано моделювання руху морської автономної платформи в умовах гармонічних хвильових збурень. Порівняння проводилося із класичним пропорційним регулятором за критеріями точності відстеження, швидкодії та енергетичних витрат керування. Результати моделювання наведено на рис. 25.

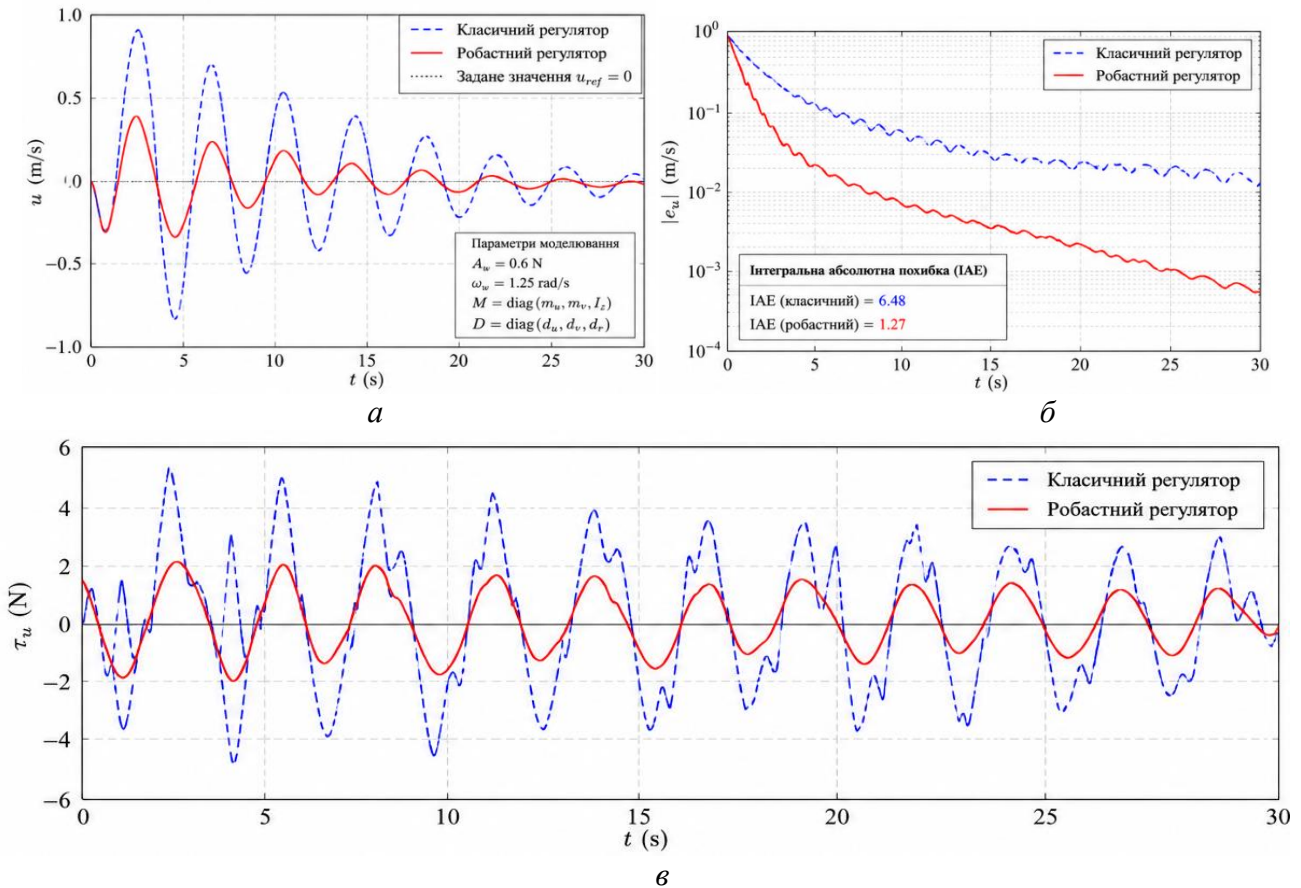


Рисунок 25 – Порівняння динамічних характеристик морської автономної платформи за класичного та робастного керування в умовах хвильових збурень: а – поздовжня швидкість; б – похибка відстеження; в – керуючий вплив

Результати моделювання показали, що зі зростанням рівня невизначеності ефективність традиційних підходів до управління суттєво знижується, тоді як запропонована система адаптивного управління забезпечує збереження необхідного рівня результативності автономної місії.

Для кількісного оцінювання впливу невизначеності використано коефіцієнт стійкості $K_s = \frac{I_E^{fact}}{I_E^{ref}}$ де I_E^{fact} – фактична ефективність; I_E^{ref} – еталонне значення ефективності.

Для оцінювання якості прийнятих рішень цифровим двійником використано показник прогнозної достовірності $A_p = 1 - \frac{|I_E - \hat{I}_E|}{I_E}$, де $\hat{I}_E$ – прогнозоване значення ефективності.

Отримані результати показали високу збіжність між прогнозними та фактичними значеннями показників ефективності, що підтверджує адекватність розроблених моделей цифрового двійника.

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 (рис. 26).

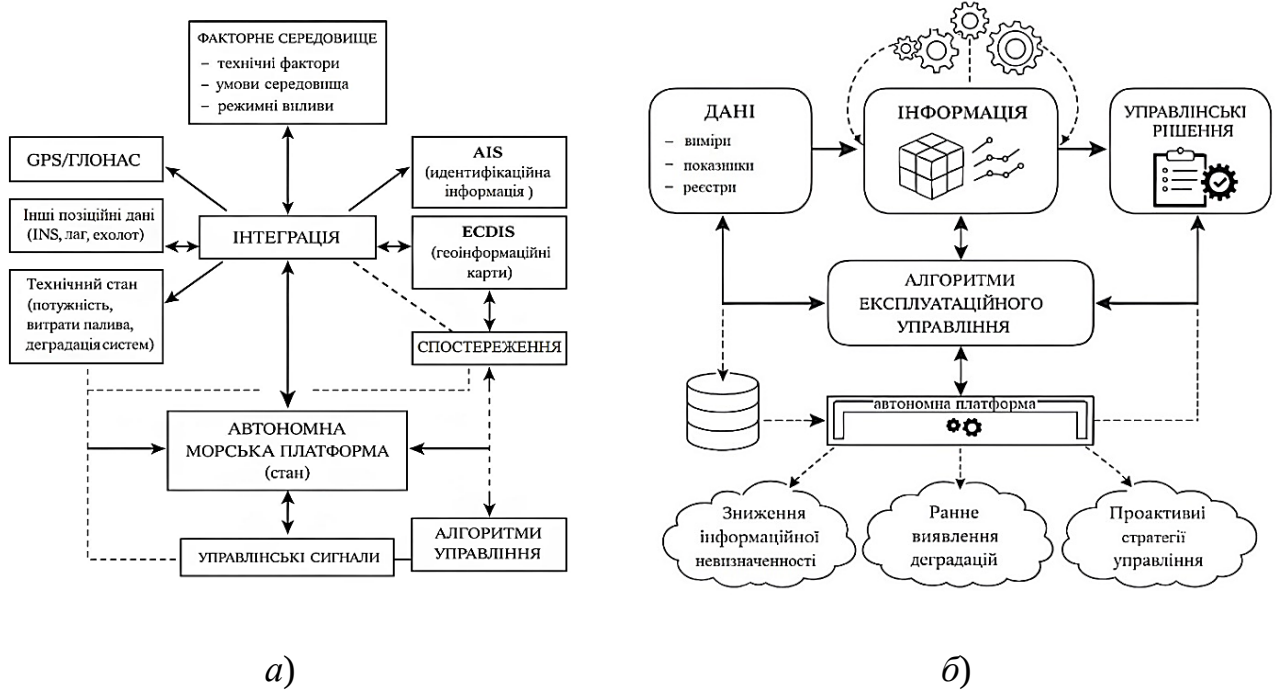


Рисунок 26 – Інформаційний рівень системи експлуатаційного управління морською автономною платформою: а – структура інтеграції інформаційних потоків; б – модель формування управлінських рішень на основі інтегрованих даних

Для формалізації процесу інтеграції неоднорідних інформаційних потоків введемо множину первинних даних морської автономної платформи $Z(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\}$, де $z_i(t)$ – інформаційний потік від i -го джерела даних.

З урахуванням різних часових масштабів функціонування платформи інтегральний інформаційний стан формується як $\hat{x}(t) = F(Z_f(t), Z_m(t), Z_s(t))$, де $Z_f(t)$ – швидкі навігаційні та керуючі потоки; $Z_m(t)$ – потоки середнього рівня динаміки; $Z_s(t)$ – повільні діагностичні та ресурсні потоки.

Для оцінювання достовірності інформаційного стану використано вагову інтеграцію даних

$$x(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i(t)}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (32)$$

де w_i – коефіцієнт достовірності відповідного джерела інформації.

У межах концепції цифрового двійника інформаційний стан використовується для прогнозування майбутнього режиму функціонування автономної платформи $x(t + \Delta t) = \Phi(x(t), u(t), E(t), R(t))$, $u(t)$ – керуючі впливи; $E(t)$ – енергетичний стан; $R(t)$ – рівень ризику; $\Phi(\cdot)$ – оператор цифрового прогнозування.

Інтегральний показник інформаційної узгодженості визначається співвідношенням

$$I_c = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|z_i(t) - \hat{x}(t)|}{\hat{x}(t)}, \quad (33)$$

де $I_c \in [0; 1]$.

Значення $I_c \rightarrow 1$ відповідає високому рівню узгодженості інформаційних потоків та мінімальній інформаційній невизначеності (рис. 27).

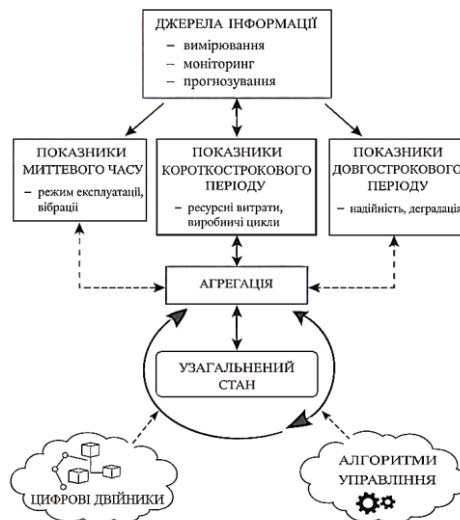


Рисунок 27 – Узгодження багатомасштабних інформаційних потоків у контурі експлуатаційного управління морською автономною платформою

Узагальнення результатів комплексного моделювання виконано шляхом порівняння основних показників функціонування автономних морських транспортних засобів (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка результатів використання запропонованої методології

Показник	Базова система	Запропонована система
Ефективність місії	0,71	0,89
Стійкість функціонування	0,68	0,91
Рівень ризику	0,34	0,24
Енергоефективність	0,73	0,88
Достовірність прогнозування	0,76	0,94

Отримані результати підтвердили ефективність запропонованої методології управління автономними морськими транспортними засобами, яка забезпечує підвищення результативності виконання місій, зниження ризиків, покращення енергоефективності та підвищення стійкості функціонування системи в умовах багатофакторної невизначеності.

Проведено сценарно-орієнтоване моделювання ризиків автономних морських платформ на основі методу dynamic DEMATEL framework, 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.

Таким чином, у шостому розділі експериментально підтверджено працездатність та ефективність розроблених моделей, методів і алгоритмів управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів, а також доведено доцільність використання адаптивного управління, цифрових двійників і систем підтримки прийняття рішень для забезпечення стійкого функціонування автономних платформ у складних умовах морського середовища.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему розроблення теоретико-методологічних засад управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів в умовах невизначеності на основі інтеграції адаптивного управління, цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, сценарного моделювання та методів інтегрального оцінювання ефективності.

У результаті виконаних досліджень отримано такі основні результати:

1. Проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку автономних морських транспортних засобів та встановлено, що існуючі підходи до управління переважно орієнтовані на вирішення окремих задач навігації, енергетичного менеджменту, діагностики або підтримки прийняття рішень і не забезпечують комплексного управління ефективністю автономних місій в умовах багатфакторної невизначеності.

2. Розроблено теоретико-методологічні засади управління ефективністю експлуатації автономних морських транспортних засобів. В основу покладено місійно-орієнтований підхід, який забезпечує комплексну інтеграцію технічних, інформаційних, енергетичних та експлуатаційних складових у межах єдиного контуру автоматизованого управління.

3. Запропоновано концепцію інтегрального оцінювання ефективності експлуатації автономних суден. На відміну від наявних підходів, вона одночасно враховує результативність виконання рейсового завдання (місії), поточний рівень навігаційного ризику, технічний стан судових систем, показники енергоефективності та загальну стійкість функціонування автономної платформи.

4. Розроблено математичні моделі оцінювання та прогнозування ефективності роботи автономних транспортних засобів, які адаптовані до умов стохастичних збурень зовнішнього середовища, жорстких ресурсних обмежень, динамічних змін технічного стану судна та впливу факторів невизначеності різної природи.

5. Вперше введено та формалізовано поняття алгоритмічної невизначеності як окремої категорії ризику автономних морських транспортних систем, що дозволило врахувати вплив похибок адаптивних алгоритмів, неповноти інформації та змінності параметрів моделей на ефективність виконання автономних місій.

6. Розроблено інтегровану багаторівневу архітектуру адаптивного управління автономними морськими транспортними засобами, яка поєднує механізми модельно-прогнозного керування, нечіткої логіки, навчання з підкріпленням та цифрових двійників і забезпечує адаптацію режимів функціонування платформи до змін умов експлуатації.

7. Отримано умови стійкості функціонування адаптивної системи управління на основі другого методу Ляпунова, що підтверджує працездатність запропонованих алгоритмів у середовищі з високим рівнем невизначеності та зовнішніх збурень.

8. Розроблено концепцію цифрового двійника автономної морської платформи та сформовано архітектуру інтеграції навігаційних, технічних, енергетичних і середовищних інформаційних потоків у межах єдиного інформаційно-аналітичного середовища управління.

9. Запропоновано інформаційні механізми підтримки прийняття рішень, які забезпечують прогнозування технічного стану автономних платформ, формування сценаріїв розвитку ситуацій та адаптивне коригування режимів функціонування в реальному масштабі часу.

10. Розроблено математичні моделі інтелектуального управління електромеханічними комплексами автономних морських платформ та запропоновано нечіткі адаптивні алгоритми керування, що забезпечують підвищення стійкості та якості функціонування виконавчих систем.

11. Досліджено вплив інтелектуального управління на показники енергоефективності автономних морських платформ та встановлено можливість зниження енергоспоживання допоміжних систем, підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів і збільшення тривалості автономних місій.

12. Розроблено структурно-сценарні моделі функціонування автономних морських транспортних засобів, які забезпечують прогнозування критичних режимів експлуатації та підтримку ризик-орієнтованого управління в умовах невизначеності.

13. Запропоновано застосовувати концепцію антикрихкості в управлінні АМТЗ замість компенсації збурень. Введений індекс антикрихкої адаптивності та опуклі цільові функції перетворюють екстремальні впливи на інформаційні стимули. Це дозволяє цифровому двійнику оперативно реконфігуруватися в реальному часі, зменшує знос і підвищує живучість системи.

14. Доведено доцільність об'єднання АМТЗ у багатоагентні рої під управлінням мережі цифрових двійників. Уточнено механізм колективного навчання за рахунок обміну «цифровим досвідом», що забезпечує стійкість системи та збереження зв'язку в критичних умовах.

15. Обґрунтовано критерії «когнітивного здоров'я» ШІ для безпеки безкіпажних платформ. Завдяки антикрихкому гомеостазу та туманно-межовій архітектурі система виявляє конфлікти даних (через вільну енергію та дисонанс сенсорів) і децентралізує обчислення в рої, надаючи пріоритет адаптивності моделей над траєкторією для запобігання аваріям.

16. Виконано комплексне математичне та імітаційне моделювання запропонованих моделей, методів і алгоритмів, результати якого підтвердили підвищення інтегральної ефективності експлуатації автономних морських транспортних засобів, зменшення рівня ризику, покращення енергоефективності та забезпечення стійкості функціонування автономних платформ у складних умовах морського середовища.

17. Практичну цінність результатів підтверджено їх впровадженням у діяльність підприємств морської галузі, використанням під час створення систем підтримки прийняття рішень, цифрових двійників та інтелектуальних систем управління, а також упровадженням у навчальний процес закладів вищої освіти морського профілю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 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. Volyanskyu, 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., Volyanskyu, 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 судових інформаційних систем в умовах зовнішніх кіберзагроз.

6. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Shumylo, O., Volyanskyu, 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., & Volyanskyu, S. (2024). Increasing maneuverability and positioning of self-propelled drilling platforms using driving modules. In A. Shukurov, O. Vovk, A. Zaporozhets, &

N. Zuievskaya (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., Volyansky, 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., Volyansky, 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., Volyansky, 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., & Aliksieichuk, 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 безпечними 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., Volyansky, 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 безпечних надводних суден.

13. Volyansky, 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., Лебедева, 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. Volyanskyu, 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](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](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. Volyanskyu, 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., Volyanskyu, 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 портів 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](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](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 морських автономних 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 електрорушійними 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 електрорушійними 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 електрорушійів 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., Яценко, 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., Яценко, 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.

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. Volyanskyu, S., Bulgakov, M., Shchenyavskiy, 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., Яценко, 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., & Добровольська, 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.

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 обумовлена стрімким розвитком автономного судноплавства, ускладненням структури морських автономних систем, зростанням рівня невизначеності морського середовища та необхідністю забезпечення стійкого функціонування автономних платформ у процесі 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 управління ефективністю 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 управління ефективністю 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 здійснювати прогнозування критичних режимів функціонування, оцінювання стійкості автономних місій та адаптивне коригування параметрів 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 при створенні перспективних автономних морських платформ, роботизованих морських комплексів та інтелектуальних систем управління морським транспортом нового покоління.

Отримані результати розвивають теорію управління транспортними системами, 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.

Підп. до друку 29.09.2026.
Формат 60×84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,79.
Тираж 100 пр. Зам. № И26-09-26

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003